





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

Juillet 2023



Office français de la biodiversité Pole « mer » de Brest Service ECUMM 16 quai de la Douane 29229 Brest cedex 2



# LOT 4

# Radars ornithologiques et météorologiques

# Synthèse bibliographique

Livrable 4.1

# **Titulaires**

Biotope, Météo France, IRD, Station ornithologique suisse

# **Auteurs**

ASSALI Camille<sup>1</sup>, DESERT Thibault<sup>2</sup>, DELCOURT Vincent<sup>1</sup>, JOUET Alban<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Biotope

<sup>2</sup> Météo France



# Partenaires scientifiques et techniques du lot 4









Office français de la biodiversité Pole « mer » de Brest Service ECUMM 16 quai de la Douane 29229 Brest cedex 2

# **Citation du document**

ASSALI, C., DESERT, T., DELCOURT, V., JOUET, A. 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*. 39 PP.

# **SUIVI DU DOCUMENT**

Maître d'œuvre du projet	Nina Cudennec	Office Français de la Piediversité	
	Florian Le Bail	Office Français de la blouiversite	
Coordinateurs scientifiques et	Yann Planque	France Energies Marines	
techniques du projet	Antoine Chabrolle	MNHN/CESCO	
	Camille Assali		
	Thibault Desert	Biotope Météo France	
Auteurieis	Vincent Delcourt	Biotope, weteo trance	
	Alban Jouet		
Titre du document	MIGRATLANE - Synthèse bibliographique Lot 4 (L4.1)		
Statut du document	Version finale, validée		
Date de sauvegarde 12/03/2024			
Date de diffusion	12/03/2024		
Version du document	Version 3, finale		
Nom du fichier	20230715_MIGRATLANE_L4.1_Synthèse_biblio_VF.pdf		
Nombre de pages	39		
Niveau de diffusion         Consortium / Gouvernance/ Public			

# **HISTORIQUE DES CHANGEMENTS**

Version	Date	Modifié par	Modifications / Sections	
1	10/08/2023	ҮР	Mise à jour de la mise en page	
2	10/11/2023	CA, VD	Compléments 4.2.2, 4.3.4, 4.3.5	
3	15/11/2023	ҮР	Mise à jour de la mise en page	

# **APPROBATION**

Version	Date	Approuvé par	Titre	
Finale	11/03/2024	Yann Planque, FEM Antoine Chabrolle, MNHN/CESCO	Coordinateurs scientifiques	
Signatures :				
Finale	12/03/2024	Nina Cudennec, OFB Florian Le Bail, OFB	Pilotage du projet	
Signature :	R. Cud	FB		

# Table des matières

Table o	des mat	ières				5
Lot 4	Ra	dars orni	tholog	gique	s et météorologiques	7
	4.1	Rappel	des ob	jectifs	- · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	7
	4.2	État de	l'art d	es dor	nnées existantes	7
	4.	.2.1 Ra	ppels :	princi	pe de l'utilisation de radars pour la visualisation des oiseaux	7
		4.2.1.1	Fond	tionne	ement des radars monostatiques et phénomènes observables	7
		4.2	2.1.1.1	Princi	pes de fonctionnement des radars	8
		4.2	2.1.1.2	Les or	ndes électromagnétiques émises par les radars	9
		4.2	.1.1.3	Valeu	rs enregistrées à la réception des signaux radar	10
			4.2.1	.1.3.1	Polarisation simple	10
			4.2.1	1.3.2	Double polarisation	
		4.2	2.1.1.4	Les di	fferents phenomenes observables par la technologie radar	13
	4. ac	cquises 15	chnolo	gies ra	dars deployees pour la détection des oiseaux et caracteristiques des donr	iees
		4.2.2.1	Rada	ars mé	téorologiques	15
		4.2	2.2.1.1	Donn	ées disponibles	
		4.2	2.2.1.2	Princi 16	paux defis de l'analyse des observations radar des biodiffuseurs par radar meteor	ologique
			4.2.2	.1.2.1	Effet de la taille du biodiffuseur sur l'amplitude du signal rétrodiffusé	16
			4.2.2	.1.2.2	Effet des formes complexes des biodiffuseurs	17
			4.2.2	.1.2.3	Effet de la diversité de la distribution dans un volume d'échantillonnage	17
		4.2	2.2.1.3	Les pi 18	opriétés physiques des grandeurs polarimétriques lors de l'observation des biod	liffuseurs
			4.2.2	.1.3.1	Facteur de réflectivité	18
			4.2.2	.1.3.2	Vitesse radiale et largeur du spectre	19
			4.2.2	.1.3.3	Réflectivité différentielle et taux de dépolarisation	19
			4.2.2	.1.3.4	Phase différentielle et phase différentielle spécifique	19
			4.2.2	.1.3.5	Coefficient de corrélation copolaire	19
		4.2	2.2.1.4	Autre	s grandeurs utilisées pour la détection de biodiffuseurs	
			4.2.2	.1.4.1		19
			4.2.2	1 4 2	SDR	20
			4.2.2	14.5	Textures des champs polarimétriques	20
		4.2	2.2.1.5	Valeu	rs représentatives des grandeurs pour caractériser un type de pixel	20
			4.2.2	.1.5.1	Échos d'oiseaux comparés aux précipitations et échos de sol	21
			4.2.2	.1.5.2	Différenciation des échos d'insectes et d'oiseaux	23
		4.2.2.2	Rada	ars avit	aune	24
		4.2	.2.2.1	Radar	vertical BirdScan MR1	24
			4.2.2	.2.1.1	Caractéristiques des enregistrements	24
			4.2.2	.2.1.2	Recensement des données existantes	25
		4.2	.2.2.2	Radar	2D	26
			4.2.2	.2.2.1	Caractéristiques des enregistrements	26
			4.2.2	.2.2.2	Recensement des données existantes	26
		4.2	.2.2.3	Radar	3D	27
			4.2.2	.2.3.1	Caractéristiques des enregistrements	27
		- ·	4.2.2	.2.3.2	Recensement des données existantes	27
	4.3	Descrip	tion de	es cho	ix technologiques et des méthodes envisagées	27
	4.	.3.1 Pro	otocole	es d'ac	quisition des données	
		4.3.1.1	Rada	ars mé	teorologiques	

	4.3.1.2	Radars orni	thologiques	
4.3	3.2 A	nalyse des don	nées des radars météorologiques	29
	4.3.2.1	, Classificatio	n pour la détection des biodiffuseurs	29
	4.	3.2.1.1 Métho	des pixel par pixel	
		4.3.2.1.1.1	Méthodes basées sur les seuils	
		4.3.2.1.1.2	Méthodes probabilistes	31
		4.3.2.1.1.3	Méthodes de classification multilinéaire	31
		4.3.2.1.1.4	Arbre de décision et forêt aléatoire	31
		4.3.2.1.1.5	Partitionnement (ou clustering)	32
	4.	3.2.1.2 Métho	des de convolution	32
	4.	3.2.1.3 Traite	nent des IPP et des mesures radar volumétriques pour obtenir des	profils de densité
	ď	oiseaux 32		
		4.3.2.1.3.1	Estimation du nombre d'oiseaux	32
		4.3.2.1.3.2	Estimation de la vitesse et de la direction de vol	33
		4.3.2.1.3.3	Post-traitement des profils de densité d'oiseaux	33
4.3	3.3 A	nalyse des don	nées des radars ornithologiques	34
	4.3.3.1	. Détection a	u sein du faisceau et radar cross section (RCS)	34
	4.3.3.2	Fréquence	de battement d'ailes	35
	4.3.3.3	Migration 1	raffic Rate (MTR)	
	4.3.3.4	Filtrage du	signal	
4 3	3.4 SV	nthèse de l'ex	oloitabilité des données dans le cadre du lot de MIGRATI ANF	35
		1 Prise en co	mote des données radar historiques et en cours d'acquisition	35
	т.Э.т.		inple des donnees radar historiques et en cours à acquisition	
	4.3.4.	2 Analyses c	roisées entre radars ornithologiques et météorologiques	
4.3	3.5 Li	stes des espèc	es ciblées	37
Références bib	liograpł	niques		

# Lot 4 Radars ornithologiques et météorologiques

# 4.1 Rappel des objectifs

Les objectifs du lot 4 sont d'étudier la migration des oiseaux sur de longues séries temporelles, à deux échelles spatiales : une échelle fine avec les radars ornithologiques, et une large échelle avec les radars météorologiques.

Les radars ornithologiques permettent de quantifier les flux migratoires diurnes et nocturnes de l'avifaune. Ces radars renseignent entre autres la taille des cibles et leur fréquence de battements d'ailes, permettant ainsi leur classification en grands groupes (insectes, classes d'oiseaux d'eau, etc.) et leur dénombrement précis dans le volume de détection du radar. Le volume de détection est limité (1000 à 2000 m d'altitude), mais les données acquises dans ce volume constituent une référence pouvant servir à une comparaison entre sites, une analyse précise de la phénologie, ou encore à la calibration d'autres méthodes.

Les dispositifs radars déployés à la côte permettront d'acquérir des connaissances par groupe d'espèces et notamment des données :

- d'effectifs dans la zone couverte par les instruments ;
- de hauteurs, directions et vitesses de vol ;
- de densité de passage à travers l'aire d'étude, en fonction de l'heure du jour et de la nuit ;
- de variabilité saisonnière et nycthémérale de ces paramètres.

Le radar ne permettant pas à lui seul d'identifier avec certitude l'espèce dont il suit la trajectoire, ni les effectifs lorsqu'un écho est constitué d'un vol dense de plusieurs individus, les informations obtenues par radar seront complétées par des données provenant de suivis visuels des migrateurs terrestres et des oiseaux marins (lot 3), par enregistreurs acoustiques (avifaune et chiroptères, lot 3) et par balises télémétriques (lot 2) issus du programme MIGRATLANE ou portés par différents organismes.

Les radars météorologiques offrent une couverture de l'ensemble du territoire métropolitain, et permettent d'étudier les flux d'oiseaux à une échelle macroscopique. Compte-tenu de l'importance de l'aire d'étude de MIGRATLANE, seuls les radars météorologiques permettront d'étudier les déplacements à l'échelle de façades.

Les données brutes des radars météo seront utilisées en parallèle des radars ornithologiques, pour caractériser et quantifier les flux et voies de déplacements des oiseaux, en continuité du projet SEMAFOR (2022-2024).

# 4.2 État de l'art des données existantes

#### 4.2.1 Rappels : principe de l'utilisation de radars pour la visualisation des oiseaux

#### 4.2.1.1 Fonctionnement des radars monostatiques et phénomènes observables

Le principe du radar repose sur l'émission et la réception d'ondes électromagnétiques dans l'atmosphère, qui sont rétrodiffusées par toute variation significative des constantes diélectriques ou diamagnétiques. Cela signifie qu'un objet solide ou tout autre changement significatif de la densité atomique rétrodiffuse les ondes radar. Le traitement de ce signal rétrodiffusé par rapport au signal émis permet de déduire des informations sur les caractéristiques de l'objet. Les radars les plus simples positionnent simplement les objets en chronométrant l'intervalle entre l'émission de l'onde radio et la réception du signal de retour. Les radars Doppler mesurent la vitesse radiale des cibles en comparant la phase de l'onde radio reçue avec la phase de l'impulsion émise. Certains radars, en particulier les radars météorologiques, peuvent émettre des ondes polarimétriques qui fournissent une quantité importante d'informations sur les échos : leur distribution, leur diversité, leur taille, leur forme, leur orientation, etc.

Le fonctionnement général des radars monostatiques est présenté succinctement ci-après ; pour plus de détails, voir Bringi et Chandrasekar 2001, Doviak 2006 et Meischner 2005.

#### 4.2.1.1.1 Principes de fonctionnement des radars

Un radar est composé de (voir Meischner 2005 et la Figure 1 ci-dessous) :

- L'émetteur qui produit l'impulsion d'ondes radio à des angles d'élévation et à des azimuts contrôlés par le mouvement de l'antenne.
- Le récepteur qui reçoit les signaux incidents rétrodiffusés par les cibles ou émis par d'autres dispositifs électromagnétiques.
- L'antenne dont le rôle est de focaliser et de diffuser l'onde électromagnétique provenant de l'émetteur à travers un guide d'ondes vers la cible avec un minimum de pertes. Ses mouvements en élévation et en azimut sont généralement contrôlés mécaniquement. L'antenne est également utilisée pour recevoir l'onde électromagnétique incidente.
- *Le duplexeur,* un commutateur électronique, qui dirige l'onde vers l'antenne lors de la transmission et le signal de retour de l'antenne vers le récepteur lors de la réception.
- Un processeur est utilisé pour déclencher la transmission des impulsions et pour traiter le signal de retour. Les signaux radar réfléchis reçus par le récepteur sont généralement très faibles et sont donc amplifiés pour être traités.



Figure 1 : Système radar monostatique (d'après Meishner 2005).

#### 4.2.1.1.2 Les ondes électromagnétiques émises par les radars

Un signal électromagnétique est caractérisé par une onde définie par une fréquence, une phase et une amplitude, qui se propage de manière égale dans toutes les directions de l'espace. Par exemple, la lumière émise par le soleil est un signal électromagnétique qui se propage dans toutes les directions. Pour un radar, l'objectif est de déterminer la position spatiale d'un objet touché par le signal. Le signal émis par le radar est donc focalisé dans une direction définie par un azimut et une élévation. Cependant, le signal radio ne peut pas être parfaitement focalisé : un lobe principal est émis dans la direction de propagation et des lobes secondaires, atténués pour avoir un gain beaucoup plus faible, sont émis dans d'autres directions (Figure 2). Le signal principal considéré pour les mesures radar est représenté par la partie du lobe principal incluse dans la largeur de faisceau de demi-puissance de l'antenne ( $\Theta$ ). Comme son nom l'indique, la puissance du signal sur les bords de la largeur du faisceau de demi-puissance est égale à la moitié de celle au centre du faisceau, ce qui correspond à -3dB. Pour effectuer les mesures radar, les deux hypothèses suivantes sont appliquées :

- Les lobes secondaires peuvent être négligés et la puissance totale générée est concentrée dans le lobe principal.
- La puissance totale est incluse dans la largeur de faisceau de demi-puissance de l'antenne et uniformément répartie à l'intérieur de celle-ci.

Des corrections sont appliquées aux mesures radar pour compenser ces hypothèses. En cas de diffuseurs à forte réflectivité (échos de sol ou cellules orageuses), les signaux émis en dehors de la largeur du faisceau de demi-puissance et renvoyés au radar peuvent avoir un gain suffisant pour être visibles. Ainsi, les mesures peuvent être polluées par des phénomènes sousestimés et mal localisés.



Figure 2 : Diagramme d'antenne dans un graphique en coordonnées polaires (d'après www.radartutorial.eu)

Une grande variété de radars a été conçue en fonction de la taille des phénomènes à observer et de la distance que le signal radio peut parcourir sans subir d'atténuation excessive. La faible absorption des ondes radio par le milieu qu'elles traversent permet aux radars de détecter des objets à des distances relativement longues. L'atténuation et la distance parcourue par l'onde dépendent de sa fréquence : plus la fréquence est élevée, plus l'onde est atténuée dans le temps. Les radars

classiquement utilisés pour la détection des biodiffuseurs sont en bande X ( $\sim 10$ GHz ) et les radars météorologiques sont le plus souvent en bande C ( $\sim 5$ GHz ) ou en bande S ( $\sim 3$ GHz ).

En outre, pour que le radar détecte un phénomène, il faut que le gain du signal rétrodiffusé soit supérieur au bruit interne du radar. Le bruit est intrinsèquement produit par tous les composants électroniques du radar.

Pour une direction de propagation donnée, une onde peut être transmise dans différents plans perpendiculaires à la direction de propagation : les plans de polarisation. Les radars polarimétriques émettent des ondes à double polarisation : une dans le plan de polarisation horizontal avec des oscillations parallèles à l'horizon, et une dans le plan vertical orthogonal (**Figure 3** ci-dessous).



Figure 3 : Ondes radio à polarisation simple et double transmises par un radar (d'après Chilson, 2017).

Les deux ondes transmises perpendiculairement sont rétrodiffusées de différentes manières par les objets observés et les phénomènes atmosphériques. Ainsi, la comparaison du gain, de la phase et de la polarisation des ondes polarimétriques fournit des informations très précieuses pour la classification des objets. La polarimétrie radar est un outil important pour les météorologues car elle permet une meilleure estimation des précipitations, une meilleure discrimination entre les classes d'hydrométéores et une distinction entre les objets météorologiques et non météorologiques (Zrnic et Ryzhkov 1999, Chandrasekar et al. 2013).

#### 4.2.1.1.3 Valeurs enregistrées à la réception des signaux radar

Les valeurs enregistrées par le radar sont calculées à partir d'une combinaison des signaux rétrodiffusés dans un volume de mesure polaire. La taille des volumes de mesure dépend des caractéristiques du radar et de la discrétisation souhaitée. La longueur de l'impulsion électromagnétique émise par le radar définit la profondeur du volume et la discrétisation angulaire est choisie en fonction de la vitesse angulaire de l'antenne et de la largeur de son faisceau à mi-puissance.

#### 4.2.1.1.3.1 Polarisation simple

Sont décrites ici les grandeurs les plus couramment utilisées pour l'interprétation des mesures du radar Doppler à polarisation simple.

#### 4.2.1.1.3.1.1 Position

La distance entre le radar et le diffuseur est calculée à partir du temps de transit de l'impulsion radio émise et de sa vitesse de propagation (vitesse de la lumière). Le temps mesuré par le radar est le temps nécessaire à l'impulsion pour aller de l'antenne à la cible, puis de la cible à l'antenne après réflexion. L'incertitude sur la distance exacte entre le radar et l'objet est due à l'impossibilité de différencier la distance parcourue par deux signaux reçus en même temps mais émis au début et à la fin de l'intervalle de temps de transmission. De plus, la fréquence de répétition des impulsions (PRF) implique une distance maximale non ambiguë (**Figure 4**) qui limite la distance de détectabilité du radar.

La direction de propagation de l'impulsion est déterminée par la directivité de l'antenne. La direction de propagation (azimut et élévation) et la distance par rapport au radar permettent de positionner les diffuseurs dans des volumes de mesure polaires discrétisés.



Figure 4 : Visualisation de l'effet de portée sans ambiguïté, exemple pour un radar météorologique (d'après Meishner 2005).

# 4.2.1.1.3.1.2 Réflectivité

La réflectivité est calculée à partir de la puissance reçue dans un volume de mesure. L'équation radar tient compte de la longueur d'onde et du gain de l'onde radar, de la distance du diffuseur, de l'atténuation de la propagation atmosphérique, du bruit du radar, de la résolution de la portée, de la largeur du faisceau à mi-puissance et du facteur diélectrique des diffuseurs. La réflectivité est exprimée en dB (échelle logarithmique), elle décrit la densité des diffuseurs dans un volume. Par conséquent, pour une densité de diffuseurs équivalente dans des volumes différents, la réflectivité mesurée est supposée équivalente. La puissance réfléchie par un diffuseur est proportionnelle à sa section équivalente radar (SER ou RCS), qui est définie comme la surface effective d'un objet qui réémet de manière isotrope. Deux produits de réflectivité sont généralement utilisés sur la base de l'hypothèse du remplissage du volume par les diffuseurs : la réflectivité ( $\eta$ ) et le facteur de réflectivité (Z).

## 4.2.1.1.3.1.3 Vitesse radiale et largeur du spectre

Pour les radars Doppler, la vitesse des diffuseurs par rapport à la direction de propagation du faisceau est mesurée à l'aide de l'effet Doppler. L'effet Doppler désigne le décalage de fréquence observable par une onde réfléchie par un objet en mouvement. Ce décalage est proportionnel à la vitesse radiale de l'objet par rapport au système radar. Pour les radars, le décalage de fréquence est mesuré en évaluant la variation temporelle du déphasage entre le signal émis et le signal reçu, c'est pourquoi il est souvent appelé déphasage. La variation temporelle est discrétisée par la PRF, de sorte que les fréquences inférieures à la PRF ne peuvent pas être capturées. La périodicité de la phase (entre -pi et +pi) implique que les vitesses mesurées sont limitées par une valeur liée à la PRF : la vitesse de Nyquist.

C'est le dilemme Doppler : le choix de la PRF est un compromis entre une portée sans ambiguïté et une vitesse sans ambiguïté. Des méthodes sont appliquées pour étendre la portée du radar en utilisant plusieurs PRF associées, mais les erreurs sont fréquentes. La vitesse radiale ( $V_{rad}$ ) est calculée à partir des impulsions dans le volume comme la valeur moyenne du déphasage, et la largeur spectrale ( $\sigma V_{rad}$ ) représente l'écart-type. La largeur spectrale dépend de la différence de vitesse des objets dans le volume, mais aussi de la turbulence atmosphérique, du cisaillement de la couche limite et du mouvement circulaire de l'antenne.

#### 4.2.1.1.3.2 Double polarisation

La technologie de la double polarisation permet de calculer d'autres grandeurs très utiles pour l'interprétation des mesures radar. Dans la description de l'onde rétrodiffusée, le terme « copolaire » désigne la composante rétrodiffusée dans son plan de polarisation (non dépolarisée). Le terme « transpolaire » désigne la composante rétrodiffusée dans le plan perpendiculaire à sa polarisation (dépolarisée). Pour une onde à double polarisation, l'onde rétrodiffusée aura quatre composantes de diffusion : copolarisation horizontale, copolarisation verticale, polarisation horizontale croisée et polarisation verticale croisée.

Pour mieux comprendre les grandeurs polarimétriques, il faut tenir compte du fait que la phase des ondes horizontales et verticales a un impact sur toutes les grandeurs mesurées : l'onde rétrodiffusée dans un plan de polarisation est la somme cohérente des contributions copolaires et transpolaires et les ondes en phase opposée s'annulent, c'est-à-dire qu'une onde verticale déphasée par rapport à l'onde horizontale diminuera l'amplitude de l'onde horizontale lorsqu'elle sera dépolarisée. Il est également important de garder à l'esprit que les effets de propagation influencent fortement les mesures polarimétriques. Les deux plus importants sont l'atténuation différentielle et le déphasage différentiel. L'atténuation différentielle fait référence au fait que les composantes verticales et horizontales ne sont pas atténuées de la même manière dans l'atmosphère. Le déphasage différentiel fait référence au fait que les propagent plus lentement que les ondes verticales.

#### 4.2.1.1.3.2.1 Réflectivité différentielle et taux de dépolarisation

La réflectivité différentielle ( $Z_{DR}$ ) est le rapport entre le facteur de réflectivité mesuré pour la copolarisation verticale et la copolarisation horizontale. Pour les longueurs d'onde bien supérieures à la taille du diffuseur, cette valeur est directement liée à sa forme physique : les grandes valeurs positives de  $Z_{DR}$  indiquent des objets oblongs orientés horizontalement, les grandes valeurs négatives indiquent des objets prolates orientés verticalement, et les valeurs proches de zéro indiquent des sphères ou des groupes de particules orientées de manière aléatoire.

Le taux de dépolarisation est défini comme le rapport entre le facteur de réflectivité mesuré dans les canaux copolaires et transpolaires. Pour les radars à double polarisation, le rapport est linéaire (*LDR*) et pour les radars à polarisation circulaire, il est circulaire (*CDR*). Le taux de dépolarisation est extrêmement utile pour évaluer la forme géométrique d'un diffuseur, en particulier pour évaluer sa sphéricité. Pour mesurer le taux de dépolarisation, il est nécessaire de transmettre les ondes dans les plans de polarisation de manière séquentielle. Cependant, les radars météorologiques modernes utilisent une transmission simultanée à double polarisation, de sorte que le taux de dépolarisation ne peut pas être mesuré, mais est calculé par une approximation appelée *SDR* (Melnikov et al. 2013).

## 4.2.1.1.3.2.2 Phase différentielle et phase différentielle spécifique

La phase différentielle ( $\phi_{DP}$ ) est calculée comme la différence entre les phases dans les plans de polarisation horizontal et vertical. La phase différentielle mesurée est une combinaison de la phase différentielle rétrodiffusée (c'est-à-dire causée par les diffuseurs), du déphasage différentiel de propagation et du déphasage à l'émission et à la réception de l'onde, inhérents à chaque matériel radar [Melnikov, 2015]. En raison de toutes ces incertitudes, les météorologues utilisent la phase différentielle spécifique pour tenir compte de l'effet de la phase.

La phase différentielle spécifique ( $K_{DP}$ ) est la dérivée en distance de la phase différentielle de propagation. En d'autres termes, il s'agit de la pente de la variation de la phase différentielle avec la distance. Pour des objets beaucoup plus petits que la longueur d'onde, la phase différentielle de rétrodiffusion tend vers 0 et  $K_{DP}$  représente l'atténuation de la phase (Bringi et Chandrasekar 2001).  $K_{DP}$  est très couramment utilisé dans les applications météorologiques car il est indépendant de l'étalonnage absolu et n'est pas affecté par l'atténuation.

## 4.2.1.1.3.2.3 Coefficient de corrélation copolaire

Le coefficient de corrélation copolaire ( $\rho_{HV}$ ) décrit la similarité globale des ondes électromagnétiques reçues dans les deux plans de polarisation sur plusieurs impulsions. Les ondes reçues sont une combinaison complexe d'effets de propagation dans l'atmosphère, d'effets de diffusion et de variations au sein de l'équipement radar lui-même. Ces phénomènes entraînent des changements dans l'amplitude et la phase des signaux mesurés. Dans certains cas, ils ont un effet égal sur les ondes dans les deux polarisations, alors que dans d'autres cas, les signaux dans chaque polarisation sont affectés différemment. Ainsi, le coefficient de corrélation copolaire permet d'évaluer la diversité du type, de la forme et/ou de l'orientation des diffuseurs.

#### 4.2.1.1.4 Les différents phénomènes observables par la technologie radar

Les ondes électromagnétiques reçues par un radar peuvent être émises soit par le radar lui-même, soit par un autre phénomène générant des ondes dans la même gamme de fréquences. Les ondes générées par un autre phénomène sont appelées interférences radiofréquences (RFI) et sont facilement identifiables sur les images radar (**Figure 5**). Elles sont généralement générées par le soleil (levant ou couchant), d'autres radars ou des opérateurs télécoms.



**Figure 5 :** Divers phénomènes non météorologiques observables par un radar météorologique - Image NEXRAD de la côte californienne.

Les phénomènes non météorologiques capables de réfléchir l'onde transmise et donc d'être visualisés par le radar sont les suivants :

- Les échos de sol : ils sont dus à la réflexion des ondes transmises sur des corps solides au sol (bâtiments, végétation, montagnes, etc.). Ils sont assez facilement détectés car leur vitesse Doppler est nulle, leur réflectivité est très élevée et ils sont redondants sur les images successives générées par le radar, sauf dans des cas particuliers de propagation anormale, forêts par temps venteux ou moulins à vent et éoliennes.
- Les échos de paillettes (« chaff ») : ils sont dus à de petits morceaux d'aluminium, de fibre de verre métallisée ou de plastique libérés par les avions militaires. Il s'agit d'une contre-mesure radar visant à détourner les radars ennemis de leurs cibles. Ils forment des formes allongées reconnaissables sur les images radar (Figure 5).
- Les échos secondaires : ils sont dus à la réflexion de l'onde transmise sur des diffuseurs situés en dehors de la portée attendue du radar. Le système de mesure radar est basé sur l'hypothèse que les ondes reçues proviennent de la dernière onde transmise, de sorte que certains phénomènes à forte réflectivité situés loin du radar peuvent être captés et interprétés comme un phénomène à plus faible réflectivité proche du radar.
- Les échos des lobes latéraux : ils sont dus à la réflexion des lobes latéraux de l'onde transmise sur des cibles à forte réflectivité, ce qui entraîne un mauvais positionnement de l'objet et une sous-estimation de la réflectivité. Ils sont facilement identifiables car ils sont situés à proximité de la cible à forte réflectivité qui est également capturée par le lobe principal.
- Les échos de mer : il s'agit des échos radar des crêtes des vagues de la mer. Ces échos ont une vitesse Doppler de l'ordre de la vitesse du vent et fluctuent dans les images radar successives. Ils sont donc difficiles à identifier, notamment parce qu'ils sont très similaires aux échos d'air clair (Figure 5).
- Les échos d'air clair : ils sont causés soit par des cibles solides renvoyées par des corps biologiques (Figure 5), de la poussière ou d'autres particules, soit par des fluctuations spatiales de la réfractivité dont l'échelle est de l'ordre de la longueur d'onde du radar ou inférieure à celle-ci, appelées diffusions de Bragg. Ils s'étendent autour du radar pendant les périodes de fort ensoleillement (principalement vers midi) et au coucher du soleil (Figure 5 et Figure 6).

Les radars, en particulier les radars météorologiques, sont également utilisés pour observer les phénomènes météorologiques dans l'atmosphère :

- Les échos d'hydrométéores : ils sont causés par les nuages, les gouttes de pluie, les flocons de neige ou tout autre état de l'eau présent dans l'atmosphère. Ils sont très reconnaissables sur les images radar car ils présentent généralement de grandes structures se déplaçant à une vitesse relativement faible. La forme des hydrométéores dépend de leur état physique (bruine, neige, etc.). Ces échos sont utilisés par tous les services météorologiques pour estimer le taux de pluie, une donnée utilisée dans les modèles de prévision météorologique.
- Autres : certains phénomènes atmosphériques (limites d'écoulement, lignes de convergence, fronts de brise de mer, turbulence) sont visibles dans les échos d'air clair, en particulier dans l'air clair diurne qui est principalement composé de cibles aéroportées.



**Figure 6 :** Exemples de PPI de facteurs de réflectivité d'hydrométéores comparés à différents types d'air clair biologique -échos- générés par NEXRAD (d'après Gauthreaux et Diehl 2020).

# 4.2.2 Technologies radars déployées pour la détection des oiseaux et caractéristiques des données acquises

Cette partie répertorie les technologies radars disponibles et mises actuellement en œuvre pour la détection des oiseaux, plus particulièrement en France métropolitaine. Les paragraphes suivants détaillent le contenu spécifique des données radar acquises en fonction de la technologie déployée, dans la limite de la connaissance exacte du modèle de radar utilisé et du protocole d'acquisition (notamment radars avifaune).

## 4.2.2.1 Radars météorologiques

## 4.2.2.1.1 Données disponibles

Le réseau Aramis, opéré par Météo-France, comprend 31 radars météorologiques (bande C, S et X) permettant de couvrir une grande partie du territoire français et de la façade Atlantique (Figure 14). Pour les besoins du projet, une mosaïque

spécifique à la façade Atlantique sera générée pour servir d'outil de visualisation du flux spatiaux et temporels des oiseaux à grande échelle.

Les mesures sont réalisées en continu sur l'ensemble du territoire et des visualisations seront disponibles toutes les 5 minutes pendant l'ensemble de l'année (24h/24, 7j/7) sous la condition de la disponibilité des radars individuels. Pour les périodes antérieures à l'implication de Météo-France dans le projet, des rejeux seront réalisés pour assurer une continuité des données sur l'ensemble de la période du projet.

#### 4.2.2.1.2 Principaux défis de l'analyse des observations radar des biodiffuseurs par radar météorologique

L'analyse des observations de biodiffuseurs par radar météorologique est un véritable défi. Contrairement à ce qui se passe habituellement avec les hydrométéores, les biodiffuseurs ne sont pas uniformément répartis dans un volume d'échantillonnage, ni de forme régulière, et leur taille est de l'ordre de la longueur d'onde du radar.

## 4.2.2.1.2.1 Effet de la taille du biodiffuseur sur l'amplitude du signal rétrodiffusé

Le principe opérationnel d'un radar implique que l'onde renvoyée par les diffuseurs dépend de leur forme, de leur taille et de leur composition. La quantité de ce rayonnement incident qui est rétrodiffusée par l'objet peut être caractérisée en termes de section équivalente radar (SER ou RCS) de l'objet. La taille des biodiffuseurs par rapport aux longueurs d'onde radar déclenche des modifications complexes de la valeur de la SER, appelée régime résonant. Pour le comprendre, nous nous concentrons sur l'exemple d'une sphère dont la relation entre la taille et la SER est décrite par la théorie de Mie (**Figure 7**) (Stepanian et al. 2016) :

- Régime de Rayleigh : pour une sphère dont le diamètre de diffusion est beaucoup plus petit que la longueur d'onde du radar (par exemple, moins de 1/16 de la longueur d'onde), l'énergie renvoyée par la sphère est représentée par une seule oscillation car la phase de l'onde entrante varie peu sur la sphère. Dans ce régime, l'énergie renvoyée au radar est proportionnelle au carré du volume de la sphère : c'est ce qu'on appelle la diffusion de Rayleigh (Doviak 2006).
- Régime de résonance : pour une sphère de taille supérieure à la limite de Rayleigh, différentes parties de la structure interne de la sphère sont exposées à des phases d'ondes différentes et se comportent donc comme une collection de petites sphères pour lesquelles la condition de Rayleigh est valable. Ces oscillations non coordonnées à l'intérieur du corps de la grande sphère introduisent une résonance dans la valeur de la RCS, où dans certains cas l'amplitude des ondes renvoyées s'additionne et dans d'autres cas se soustrait, en fonction de leurs phases respectives.
- Régime optique : pour une sphère dont le diamètre de diffusion est beaucoup plus grand que la longueur d'onde du radar, les inhomogénéités internes dans les oscillations sont moyennées pour obtenir une amplitude rétrodiffusée stable.



**Figure 7**: Courbe de Mie associée à une schématisation du régime de résonance pour différentes tailles de biodiffuseurs. (A) Une sphère dans la limite de Rayleigh. (B-D) Grandes sphères conceptualisées comme une collection de petites sphères dans la limite de Rayleigh. (E) La courbe de Mie schématique et les valeurs RCS associées aux quatre sphères, ainsi que les dimensions verticales (rouge) et horizontales (bleu) d'un oiseau. (d'après Stepanian, 2016).

#### 4.2.2.1.2.2 Effet des formes complexes des biodiffuseurs

Alors que la plupart des hydrométéores ont des formes géométriques assez régulières, les biodiffuseurs ont des formes très complexes qui fluctuent dans le temps et dont la composition diffère selon la partie du corps. En particulier, les ailes des oiseaux, des chauves-souris et des insectes sont en mouvement la plupart du temps pendant le vol et modifient constamment la forme perçue par le signal radar. Toutes les grandeurs mesurées par un radar polarimétrique sont influencées par la complexité de la forme et son évolution dans le temps. En particulier, les grandeurs polarimétriques sont significativement affectées par la forme très différente perçue par les ondes transmises dans les plans de polarisation vertical et horizontal et par la dépolarisation causée par les formes fortement non-sphériques. De plus, les échos radar dépendent de la constante diélectrique du biodiffuseur, une grandeur liée à la composition interne de l'organisme et qui n'est pas bien connue.

L'influence de la forme et de la composition interne des biodiffuseurs sur les mesures radar constitue un sujet de microphysique très complexe, qui est étudié dans la littérature au moyen de modèles électromagnétiques et d'études expérimentales (Mirkovic et al. 2016, Wang et al. 2021, Addison et al. 2022). Dans le cas des radars météorologiques, le volume d'échantillonnage étant très grand, il existe une énorme incertitude sur le nombre et la composition des diffuseurs dans le domaine. Ainsi, la plupart des études simulant la RCS par modélisation électromagnétique simplifient les diffuseurs biologiques par une sphère ou un sphéroïde oblat d'eau (Alerstam et Lindström 1990, Martin et Shapiro 2007, Nebuloni et al. 2008).

## 4.2.2.1.2.3 Effet de la diversité de la distribution dans un volume d'échantillonnage

Contrairement à l'intérieur d'un nuage, qui peut être représenté de manière réaliste par une distribution de gouttes de tailles et d'orientations variées par  $m^3$ , les biodiffuseurs dans l'atmosphère sont loin d'être répartis uniformément en termes de position et d'espèces.

Un seul oiseau dans le volume d'échantillonnage d'un radar météorologique aura un écho très différent selon sa position par rapport au centre du volume, où le signal est le plus fort. Avec les seules mesures de réflectivité radar, il est très difficile de différencier l'écho d'un petit oiseau au centre du volume d'échantillonnage de l'écho d'un oiseau plus grand positionné en bordure du volume. Il est donc essentiel de disposer soit d'informations sur le positionnement, soit d'informations sur la taille du biodiffuseur afin d'interpréter correctement les réflectivités mesurées. En outre, il est difficile d'être sûr du nombre de diffuseurs dans le volume de mesure et de l'homogénéité des espèces. Nous supposons généralement que dans un volume de mesure, plusieurs espèces d'oiseaux ou de chauves-souris ainsi que des insectes sont probablement concentrés (**Figure 8**) (Chilson et al. 2012).



**Figure 8 :** Schéma d'un volume de mesure de radar météorologique polarimétrique peuplé de chauves-souris et de papillons. Cet exemple illustre la diversité possible de la distribution des biodiffuseurs qui peut être échantillonnée lors d'une observation par radar météorologique, d'après Chilson et al. (2017).

#### 4.2.2.1.3 Les propriétés physiques des grandeurs polarimétriques lors de l'observation des biodiffuseurs

Les biodiffuseurs ont des comportements, des compositions, des formes et des distributions volumétriques qui influencent les grandeurs polarimétriques mesurées par un radar météorologique. La **Figure 9** montre un exemple de PPI des grandeurs polarimétriques d'une observation de la migration des oiseaux (Radhakrishna et al. 2019).



**Figure 9 :** Exemple de PPI de grandeurs polarimétriques pour la visualisation de la migration de l'avifaune. IPP du radar à double polarisation en bande S de McGill à une élévation de 0,58°. Les cercles noirs superposés représentent les intervalles de portée de 30 km (d'après Radhakrishna, 2019).

#### 4.2.2.1.3.1 Facteur de réflectivité

Dans l'ensemble, les biodiffuseurs sont caractérisés par des valeurs de réflectivité inférieures à celles des précipitations. Cependant, la puissance de l'onde rétrodiffusée par un biodiffuseur dans le régime de Mie dépend de la longueur d'onde du radar émetteur. Ainsi, pour une forme de diffuseur donnée, la réflectivité est fortement influencée par la longueur d'onde du radar. De plus, le facteur de réflectivité est une variable qui a été créée pour quantifier une quantité d'hydrométéores : il est basé sur l'hypothèse que les diffuseurs sont des précipitations liquides remplissant un volume dans le régime de Rayleigh (Probert-Jones 1962). La réflectivité  $\eta$  est préférée pour la quantification des biodiffuseurs.

#### 4.2.2.1.3.2 Vitesse radiale et largeur du spectre

La vitesse radiale mesurée dépend de la nature du biodiffuseur. Lors d'une migration, les oiseaux et les chauves-souris ne sont pas aéroportés. La vitesse radiale de leur écho diffère donc de la vitesse du vent atmosphérique. Au contraire, les insectes sont aéroportés et se déplacent à une vitesse proche de celle du vent. Dans l'ensemble, les biodiffuseurs ne volent pas tous dans la même direction et les PPI des vitesses radiales mesurés par les radars météorologiques sont bruités. De plus, comme les biodiffuseurs battent des ailes, la vitesse radiale mesurée est influencée par le mouvement des ailes et varie fortement d'un pixel à l'autre.

La largeur du spectre est également influencée par le mouvement des ailes. Cependant, cette grandeur est influencée par un très grand nombre de phénomènes et n'est pas très utile pour différencier les biodiffuseurs des précipitations (Gauthreaux et Diehl 2020).

#### 4.2.2.1.3.3 Réflectivité différentielle et taux de dépolarisation

Pour les diffuseurs dans le régime de Rayleigh, la réflectivité différentielle mesurée peut être utilisée pour déterminer si les objets sont orientés horizontalement ou verticalement. Pour les biodiffuseurs, l'interprétation de cette quantité est plus difficile car la résonance affecte chaque polarisation indépendamment et les ondes envoyées dans les deux plans de polarisation interagissent en raison de la forme très irrégulière des objets. Comme deux effets de résonance se chevauchent, la réflectivité différentielle dépend aussi fortement de la longueur d'onde du système radar (Melnikov et al. 2012). De plus, la forme des biodiffuseurs induit une dépolarisation importante des signaux. Ainsi, le  $Z_{DR}$  dépend fortement des contributions des ondes transpolaires et de la phase à laquelle ces contributions sont décalées (Ryzhkov et Zrnić 2007).

Le taux de dépolarisation *SDR* permet d'évaluer la sphéricité des diffuseurs, il est donc utilisé pour différencier les échos météorologiques.

## 4.2.2.1.3.4 Phase différentielle et phase différentielle spécifique

Comme pour la réflectivité différentielle, la forme très irrégulière des biodiffuseurs induit une interaction des ondes dans les deux plans de polarisation, de sorte que l'interprétation de la phase différentielle est une tâche difficile. La phase différentielle mesurée dépend très fortement de la différence de phase des deux ondes envoyées par le radar ; par conséquent, les mesures de la phase différentielle varient fortement d'un radar à l'autre pour des mêmes diffuseurs.

La phase différentielle spécifique a été conçue pour la propagation à travers des diffuseurs météorologiques. Pour les échos d'air clair et les biodiffuseurs, la densité de distribution est plus faible et l'énergie des ondes atténuées et retardées est négligeable par rapport à l'énergie qui passe autour des diffuseurs. La différence de phase est donc supposée nulle et est rarement utilisée pour la détection (Melnikov et al. 2015).

#### 4.2.2.1.3.5 Coefficient de corrélation copolaire

Pour les biodiffuseurs, les mesures de  $\rho_{HV}$  sont généralement inférieures à celles des hydrométéores. La forme, la position du corps et l'orientation des biodiffuseurs sont très variables, de sorte que la corrélation entre les signaux à chaque polarisation est faible (Doviak et al. 2000). En outre, la non-homogénéité de la distribution des diffuseurs dans le volume de l'échantillon entraîne une diminution du coefficient de corrélation copolaire (Ryzhkov 2007) et le mouvement du vol entraîne une évolution dynamique de la forme, ce qui modifie les caractéristiques de rétrodiffusion d'une impulsion à l'autre.

#### 4.2.2.1.4 Autres grandeurs utilisées pour la détection de biodiffuseurs

#### 4.2.2.1.4.1 Réflectivité

La réflectivité  $\eta$  convient mieux à la quantification des biodiffuseurs que le facteur de réflectivité, car elle est calculée sans l'hypothèse de diffuseurs d'eau dans le régime de Rayleigh. Cependant, l'hypothèse de remplissage du volume est toujours

appliquée au calcul de cette grandeur, de sorte qu'elle n'est représentative que dans les cas où la densité d'oiseaux est suffisamment élevée. Le nombre de biodiffuseurs dans un volume peut être calculé directement à partir de la réflectivité et d'une valeur RCS représentative.

Pour faciliter l'interprétation biologique, il est recommandé de l'exprimer en cm2/km3 (Gasteren et al. 2008, Dokter et al. 2011). Cependant, il est important de garder à l'esprit qu'une valeur de réflectivité peut représenter une multitude de cas de distribution possibles et de types de biodiffuseurs. Chilson (2012) l'illustre par l'exemple suivant : une valeur de 690 cm2/km3 pourrait être produite, par exemple, par environ 86 parulines des saules par kilomètre cube (9 g et RCS = 8 cm2) ou 345 grives musiciennes par kilomètre cube (70 g et RCS = 2 cm2) ou 17 pigeons ramiers par kilomètre cube (500 g et RCS = 40 cm2), où les valeurs de masse et RCS sont tirées de Alerstam, 1990.

#### 4.2.2.1.4.2 SDR

Le SDR est calculé à partir du coefficient de corrélation copolaire et de la réflectivité différentielle (Melnikov et al. 2013). C'est l'une des grandeurs les plus puissantes pour séparer les cibles ayant des formes régulières ou symétriques, comme les gouttes de pluie, des cibles ayant des formes irrégulières, comme les oiseaux ou les cibles au sol (Kilambi et al. 2018).

#### 4.2.2.1.4.3 VGZ

La densité des biodiffuseurs évolue drastiquement avec l'altitude, comme le montre l'exemple suivant (**Figure 10**, Bruderer et al. 2018), avec plus de 50% des oiseaux se trouvant à des altitudes inférieures à 1000m et un petit nombre d'oiseaux volant au-dessus de 3000m. En revanche, les gouttes d'eau se déplacent des nuages vers le sol par gravité dans une densité relativement uniforme, et les échos au sol sont caractérisés par des valeurs de réflectivité très élevées à basse altitude. Ainsi, le gradient vertical de réflectivité (VGZ) est une grandeur qui pourrait fournir des informations sur la nature des objets contenus dans un volume (Radhakrishna et al. 2019).



**Figure 10 :** Exemple de distribution verticale des biodiffuseurs lors de la migration prénuptiale capturée par le radar de Trappes, France (d'après Bruderer, 2018).

#### 4.2.2.1.4.4 Textures des champs polarimétriques

La texture d'une grandeur mesurée par radar est définie par une mesure statistique de la variabilité (p. ex. écart-type, variance, écart quadratique moyen) des valeurs des pixels environnants (Chandrasekar et al. 2013). Les textures polarimétriques sont liées à la variabilité de la répartition, du type et/ou de l'orientation dans les volumes de résolution. En général, les textures de réflectivité différentielle, de phase différentielle et de vitesse radiale (Dokter et al. 2011) sont utilisées pour détecter la présence de biodiffuseurs car ce sont les quantités les plus impactées par l'hétérogénéité des diffuseurs (Radhakrishna, 2019).

#### 4.2.2.1.5 Valeurs représentatives des grandeurs pour caractériser un type de pixel

Dans cette partie, toutes les études présentées ont été réalisées sur des radars en bande S. Il est donc important de garder à l'esprit que pour les radars en bande C ou en bande X, les grandeurs mesurées ne seront pas exactement les mêmes, mais que la capacité des quantités individuelles à différencier les classes de diffuseurs est comparable. En outre, étant donné que la plupart des études publiées utilisent le facteur de réflectivité (dBZ) pour caractériser les échos des biodiffuseurs, cette grandeur est utilisée pour caractériser la réflectivité dans la présente section.

#### 4.2.2.1.5.1 Échos d'oiseaux comparés aux précipitations et échos de sol

Les échos de précipitations, de sol et de biodiffuseurs peuvent être différenciés en contrôlant les grandeurs polarimétriques mesurées à l'intérieur du volume. Quelques valeurs représentatives des différents diffuseurs à différencier pour une classification correcte des pixels sont présentées ici. La **Figure 11**, extraite de Radhakrishna (2019), présente les lois de densité de probabilité extraites de 9h de données sélectionnées pour couvrir les situations les plus représentatives. Les quantités évaluées ont été présentées précédemment : les textures sont calculées à partir de la variation standard des huit cellules dans la zone de 1° x 1 km et les VGZ sont calculées entre les scans avec une PRF identique pour éviter les artefacts possibles découlant des changements de PRF. Ainsi, les VGZ sont calculées à partir des élévations x et x + 2 au lieu des élévations x et x + 1 suivantes (Cho et al. 2006).



**Figure 11 :** Distributions de densité normalisées f(x) et fonctions d'appartenance estimées fm(x) des variables non polarimétriques observées au radar et dérivées des précipitations (ligne continue noire), des cibles au sol (ligne pointillée noire) et des oiseaux (ligne pointillée grise). L'ombrage gris indique la zone de chevauchement

des trois courbes de distribution de la densité normalisée. Les données sont extraites du radar McGill (bande S) (de Radhakrishna, 2019).

Les grandeurs les plus représentatives de chaque classe d'échos sont les suivantes :

- Échos de sol : la vitesse radiale et la réflectivité sont utilisées pour différencier les échos de sol des autres types d'échos. Ils sont caractérisés par une réflectivité élevée et une vitesse radiale très faible : les cibles au sol sont généralement grandes et stationnaires.
- Précipitations : le coefficient de corrélation et le taux de dépolarisation sont très efficaces pour identifier les pixels contenant des précipitations : les gouttes de forme sphérique qui remplissent le volume induisent une faible dépolarisation et une forte corrélation entre les ondes horizontales et verticales.
- Oiseaux : aucune grandeur n'est vraiment discriminante à partir des lois de densité de probabilité pour les pixels contenant des biodiffuseurs, il est nécessaire de considérer toutes les grandeurs pour déterminer si un pixel contient des biodiffuseurs. Le **Tableau 1** représente le poids des différentes grandeurs utilisées pour différencier les précipitations, les échos de sol et les oiseaux dans la logique floue mise en œuvre par Radhakrishna (2019) : la texture de la réflectivité différentielle et la phase différentielle sont importantes pour la classification des biodiffuseurs.

**Tableau 1 :** Poids estimés des fonctions d'appartenance en logique floue polarimétrique et non polarimétrique (Radhakrishna, 2019). Les poids normalisés sont indiqués entre parenthèses.

	Weight			
Parameter	Polarimetric	Without polarimetric		
Reflectivity (dBZ)	_	1.0 (0.086)		
Doppler velocity $(m s^{-1})$	_	6.72 (0.576)		
$\sigma_{V_r}$ (m s <sup>-1</sup> )	3.76 (0.054)	1.6 (0.137)		
Spectral width $(m s^{-1})$	4.23 (0.061)	1.73 (0.149)		
$\rho_{\rm HV}$	11.03 (0.158)	_		
$Z_{\rm DR}$ (dB)	3.23 (0.046)	_		
$\Phi_{\rm DP}$ (°)	2.95 (0.042)	_		
$\sigma_{Z_{\rm DR}}$ (dB)	17.98 (0.257)	_		
$\sigma_{\Phi_{\rm DP}}$ (°)	13.31 (0.19)	_		
SDR	13.4 (0.192)	_		
$VGZ (dBZ deg^{-1})$		0.61 (0.052)		

Dans la méthode de classification pixel par pixel, les quantités polarimétriques sont plus efficaces que la réflectivité, le gradient vertical de réflectivité et la vitesse Doppler pour isoler les biodiffuseurs. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que les grandeurs polarimétriques sont plus indépendantes du contexte que les grandeurs à polarisation simple. En effet, l'interprétation de la réflectivité est ambiguë car elle dépend de la taille des cibles dans le volume de résolution du radar mais aussi du nombre de cibles. La vitesse Doppler dépend du vent atmosphérique : les oiseaux volent plus vite que les insectes, mais les insectes qui volent passivement un jour de grand vent peuvent migrer à des vitesses plus importantes que les oiseaux qui volent activement dans un champ de vent faible (Jatau et al. 2021).

En l'absence de grandeurs polarimétriques, la vitesse Doppler est la grandeur la plus efficace pour la classification à l'aide de la logique floue. Une méthode basée sur un seuil s'appuie également sur la vitesse Doppler pour isoler les pixels de type oiseau (Gasteren et al. 2008, Dokter et al. 2011). Cette méthode appliquée à l'ensemble du volume polaire du radar permet de sélectionner les pixels formant le front migratoire et d'estimer la vitesse et la direction de vol d'un groupe de biodiffuseurs par convergence des vitesses radiales. Cette méthode est efficace mais elle ne fournit qu'une seule information de vitesse et de direction de déplacement par radar.

Les franges des cellules de précipitations représentent la caractéristique la plus difficile à différencier des biodiffuseurs car le rapport signal/bruit est faible et le calcul des moments polarimétriques souffre d'erreurs relatives importantes (Mäkinen et al. 2022).

## 4.2.2.1.5.2 Différenciation des échos d'insectes et d'oiseaux

La différenciation des échos d'insectes et d'oiseaux est un sujet peu traité dans la littérature, car il y a un manque d'études comparant les mesures de radars météorologiques avec les données de radars ornithologiques *in-situ*. Il est donc difficile pour une étude d'être certain que les cibles observées sont exclusivement des oiseaux ou des insectes. Certaines études supposent que les échos diurnes des biodiffuseurs sont des insectes et que les échos nocturnes pendant les périodes de migration sont des oiseaux, mais les données issues des radars ornithologiques montrent que cette hypothèse est fausse.

Sont détaillés ci-après les résultats de deux études basées sur l'observation des PPI dans lesquelles l'identité des cibles a été validée soit par des observateurs au sol, soit par la connaissance générale des schémas comportementaux des différents biodiffuseurs dans une région donnée, en fonction de l'heure du jour et de l'année. La **Figure 12** montre les histogrammes des pixels classés comme précipitations, insectes et hirondelles noires sur un seul PPI tiré de (Stepanian et al. 2016). La **Figure 13** présente la phase différentielle rétrodiffusée (phase différentielle  $\delta$  induite par le diffuseur) en fonction de la réflectivité différentielle selon la nature de la cible d'après Zrnic et Ryzhkov (1999), les grandeurs mesurées proviennent de deux moments distincts.



**Figure 12 :** Histogrammes de fréquence normalisés des produits radar pour les trois types de diffuseurs identifiés sur un PPI du radar NEXRAD de l'Alabama (bande S) le 11 août 2015 à 11:15 UTC (d'après Stepanian, 2016).



**Figure 13 :** Les nuages de points ZDR- $\delta$  pour les insectes et les oiseaux. Les données concernant les insectes ont été collectées le 10 août 1993 dans la matinée. Les données pour les oiseaux ont été collectées le 7 octobre 1996, pendant la nuit. Les données proviennent du radar WSR-88D (bande S) (Zrnic, 1999).

Les grandeurs qui permettent une meilleure distinction entre les oiseaux et les insectes sont principalement celles décrites par Zrnic (1999) : la phase différentielle rétrodiffusée et la réflectivité différentielle. Néanmoins, la **Figure 12** montre que le coefficient de corrélation, la réflectivité et la vitesse radiale peuvent aider à distinguer les deux principaux types de biodiffuseurs. Ainsi, les insectes se distinguent des oiseaux par une phase différentielle rétrodiffusée plus faible, un Zdr plus élevé, une réflectivité plus faible, un coefficient de corrélation plus élevé et une vitesse radiale plus faible. Ces résultats sont également corroborés par Gauthreaux et Diehl (2020).

Pour une étude approfondie des valeurs rapportées des grandeurs polarimétriques (coefficient de corrélation, réflectivité différentielle et phase différentielle) pour différents types de biodiffuseurs, voir Gauthreaux (2020) ; cet article montre notamment que les valeurs peuvent varier fortement d'une étude à l'autre. Cette conclusion est assez rationnelle puisque le type de diffuseur n'a pas forcément été validé sur le terrain et que le type de biodiffuseur (insectes ou oiseaux) rassemble un très grand nombre de spécimens de tailles et de formes très différentes.

#### 4.2.2.2 Radars avifaune

## 4.2.2.2.1 Radar vertical BirdScan MR1

## 4.2.2.2.1.1 Caractéristiques des enregistrements

Le radar BirdScan MR1 est un système radar compact conçu pour la surveillance quantitative à long terme des oiseaux, insectes et prochainement des chauves-souris. Il utilise une antenne à ouverture large de forme conique dirigée verticalement et mise en rotation (Figure 14). Cette configuration permet d'enregistrer de nombreuses informations pour chaque cible :

- enregistrement précis de la hauteur de la cible au-dessus du sol
- fréquence de battement d'ailes et surface de réflexion de la cible pour classifier les échos en différentes catégories, notamment précipitation, insectes, oiseaux avec sous-groupes (par exemple : passereau, oiseau d'eau, grand oiseau, groupe d'oiseaux);
- direction de vol et vitesse de la cible.





Figure 14: Illustration du fonctionnement du radar BirdScan MR1.

Le BirdScan MR1 (fabricant Swiss Bird Radar Solutions, swiss-birdradar. com) est un radar marin en bande X modifié (Bridgemaster©, 25 kW, 9,4 GHz, longueur d'onde d'environ 3,2 cm) avec une antenne Horn verticale de 20 dB (angle de faisceau nominal de 17,5° à -3 dB). Il utilise généralement une émission à impulsions courtes de 70 ns pour une résolution de 10 m et une portée de détection maximale de 1500 m, ou une émission à impulsions longues de 750 ns pour une résolution de 110 m et une portée de détection maximale de 6000 m. Un logiciel automatisé détecte les objets traversant le faisceau et numérise les signaux d'écho détectés (fréquence d'échantillonnage = 425-450 Hz). Le numériseur convertit le signal reçu en dBm sur la base de mesures d'étalonnage avec une unité de traitement du signal (Test Set 75, Gigaset) et une puissance de référence de 1 IW.

L'intensité de l'écho varie au fur et à mesure que l'oiseau traverse le faisceau radar, produisant une signature caractéristique du vol de l'oiseau. En utilisant les signatures des échos, il est possible de classer les groupes d'oiseaux en fonction de leur type de vol (battement ou vol intermittent, Zaugg et al. 2008), de la fréquence des battements d'ailes, et d'estimer leur taille (Schmid et al. 2019). Une rotation de l'antenne avec une légère inclinaison de l'axe vertical permet également d'évaluer les directions de vol et la vitesse au sol des oiseaux. En mode impulsions courtes, les petits passereaux sont détectés jusqu'à 800 m au-dessus du sol, 1000-1200 m au-dessus du sol pour les passereaux plus grands. Les insectes sont aussi détectés par ce radar, principalement dans les 300 premiers mètres au-dessus du radar (Schmid et al. 2019). Ainsi, en fonction du temps, de la hauteur et de la classe, les échos sont agrégés en taux de trafic migratoire (MTR) selon la résolution spatio-temporelle souhaitée (par exemple MTR par heure et intervalle de hauteur de 100 m).

## 4.2.2.2.1.2 Recensement des données existantes

## 4.2.2.2.1.2.1 MIGRATLANE

Dans le cadre du lot de Migratlane, quatre radars BirdScan MR1 (Swiss Birdradar Solutions) seront mobilisés (cf. paragraphe 4.3.1). Le déploiement de BirdScan MR1 dans la zone couverte par des radars météorologiques permettra de valider les résultats du traitement des données (cf. paragraphe 4.3.4.2).

## 4.2.2.2.1.2.2 MIGRALION

Deux radars BirdScan MR1 sont déployés le long du Golfe du Lion dans le cadre du projet MIGRALION (2021-2025). Tel que décrit plus haut, ces radars (un radar fixe sur 1 site en Camargue; un radar mobile sur 7 sites entre Banyuls et Toulon) renseignent les caractéristiques des mouvements migratoires enregistrés (en continu pour le radar fixe; par session d'une semaine par site lors des saisons de migration pour le radar mobile): directions et altitudes de vol, flux (MTR), grands groupes d'espèces identifiés (ex : oiseaux d'eau, passereaux, etc.). Les données produites dans le cadre de

MIGRALION sont disponibles et seront directement comparables avec celles produites dans le cadre de MIGRATLANE (intercalibration des radars réalisée).

# 4.2.2.2.1.2.3 Radars opérés par les Fédérations de chasseurs

Depuis 2017, une flotte atteignant aujourd'hui 7 radars BirdScan est déployée par les fédérations de 14 chasse. comptabilisant (en 2023) sites suivis (application AéroRad : https://aerorad.chasseurdefrance.com/). Si les données produites sont équivalentes à celles collectées dans le cadre du lot 4 de MIGRATLANE, les radars ici cités, à notre connaissance, ne sont pas intercalibrés (ni entre eux, ni avec les radars utilisés pour MIGRATLANE et MIGRALION). Ce constat limite l'exploitabilité des données dans leur ensemble dans le cadre du projet MIGRATLANE, notamment dans la perspective de fournir des résultats quantitatifs (cf. paragraphe 4.3.4), mais les données disponibles seraient intéressantes à des fins de comparaison et de contextualisation.

## 4.2.2.2.2 Radar 2D

# 4.2.2.2.2.1 Caractéristiques des enregistrements

Les radars 2D sont classiquement des radars de navigation (bande X ou S) paramétrés pour l'enregistrement des déplacements de l'avifaune. Les données se présentent sous forme d'images acquises à un pas de temps déterminé par l'utilisateur ou de trajectoires numérisées. Après traitement des signaux, les données produites par ces radars en balayage horizontal sont composées de **trajectoires 2D** d'oiseaux, et permettent notamment de renseigner l'**activité aviaire** et **les directions de vol** dans la zone couverte par le radar. En balayage vertical, ce type de radar produit des données permettant d'estimer les **flux** et **altitudes de vol** associées, notamment des petites espèces (passereaux) pour les radars en bande X.

# 4.2.2.2.2.2 Recensement des données existantes

# 4.2.2.2.2.2.1 Parc éolien en mer de Dieppe le Tréport

Des suivis depuis la côte par **radar mobile 2D en mode horizontal et vertical** (avril 2009-janvier 2010) puis par **radar 2D fixe horizontal** (octobre 2010 – mai 2011) ont été conduits dans le cadre de l'étude d'impact du parc éolien en mer de Dieppe – Le Tréport.

# 4.2.2.2.2.2.2 Parc éolien en mer de Fécamp

Parallèlement aux recensements effectués par transects en mer (avion/bateau) et depuis la côte, une étude des mouvements d'oiseaux par radar a été réalisée depuis un bateau à l'ancre sur la zone de projet, à raison de 48h par mois entre octobre 2008 (= séance de test) et octobre 2009 (9 sorties entre octobre 2008 et avril 2009 puis de septembre à octobre 2009). Les données produites sont composées de **trajectoires 2D** d'oiseaux, principalement marins, à large échelle (6 à 12 milles nautiques) et ont permis de renseigner l'**activité aviaire** et **les directions de vol** dans la zone couverte par le radar. Quelques données en mode vertical ont également été acquises.

# 4.2.2.2.2.2.3 Parc éolien en mer de Saint-Brieuc

Un suivi par radar 2D en mode horizontal et vertical est en cours (2022-2026) dans le cadre du développement et de l'exploitation du parc éolien en mer de Saint-Brieuc. La nature des données produites n'est pas connue en détails mais ces dernières permettraient de renseigner les flux et les altitudes de vol au cours des périodes de migration prénuptiale et postnuptiale. Un suivi temporaire (2 sessions de 7 jours) a aussi été réalisé à partir d'un radar horizontal et un radar vertical depuis la côte.

# 4.2.2.2.2.2.4 Suivi LPO à la Pointe de Grave

Dans le cadre de l'Observatoire Régional de la Migration des Oiseaux en Aquitaine, un suivi par radar 2D a été mené lors de la migration prénuptiale 2013 (avril, mai) pour la Ligue de Protection des Oiseaux (LPO). Ce suivi a permis la description des **flux** migratoires ainsi que des **directions de vol** des cibles enregistrées.

## 4.2.2.2.3 Radar 3D

## 4.2.2.3.1 Caractéristiques des enregistrements

Les données radar citées ci-dessous proviennent de radars 3D FlightTrack développés par la société Diadès Marine (radars en bande X). Ce type de radar intègre un algorithme de suivi de cibles permettant la production des trajectoires en 3 dimensions des objets environnants, dont les oiseaux (paramétrage adapté).

## 4.2.2.3.2 Recensement des données existantes

# 4.2.2.2.3.2.1 Fécamp

De mai 2021 à avril 2022, une mesure de suivi dans le cadre du développement du parc éolien de Fécamp a consisté en l'acquisition et l'analyse de données **radar 3D** depuis le mât de mesures de Fécamp. Ces données sont constituées de **trajectoires 3D** d'oiseaux (ou groupes d'oiseaux) surtout marins, dans la limite de la détectabilité des cibles relative à la technologie elle-même, aux paramétrages et aux conditions météorologiques rencontrées. Les trajectoires ont renseigné l'altitude et la direction des oiseaux détectés, en plus de fournir une **estimation quantitative de l'activité aviaire** dans la zone prospectée.

## 4.2.2.2.3.2.2 Dunkerque

De décembre 2021 à décembre 2022, une étude des mouvements d'oiseaux par radar depuis la côte pour le projet éolien de Dunkerque a été menée par le biais d'un **radar 3D**. Ce suivi est réitéré depuis avril 2023 (acquisitions en cours). Tout comme précédemment, les données produites sont constituées de **trajectoires 3D** d'oiseaux (ou groupes d'oiseaux) surtout marins, dans la limite de la détectabilité des cibles relative à la technologie elle-même, aux paramétrages et aux conditions météorologiques rencontrées. Les trajectoires renseignent l'**altitude** et la **direction** des oiseaux détectés, en plus de fournir une **estimation quantitative de l'activité aviaire** dans la zone prospectée.

# 4.3 Description des choix technologiques et des méthodes envisagées

Pour le lot4 de MIGRATLANE, deux types de radar seront utilisés : des radars météorologiques, et des radars ornithologiques.

# 4.3.1 Protocoles d'acquisition des données

#### 4.3.1.1 Radars météorologiques

La couverture des radars météorologiques est présentée dans la figure suivante.



#### Figure 15 : localisation des radars météorologiques.

Pour rappel, les mesures seront réalisées en continu sur l'ensemble du territoire et des visualisations seront disponibles toutes les 5 minutes pendant l'ensemble de l'année (24h/24, 7j/7) sous la condition de la disponibilité des radars individuels. Pour les périodes antérieures à l'implication de Météo-France dans le projet, des rejeux seront réalisés pour assurer une continuité des données sur l'ensemble de la période du projet.

#### 4.3.1.2 Radars ornithologiques

4 radars Birdscan MR1 (Swiss Birdradar Solutions) seront utilisés pour les 3 années d'acquisition.

La répartition spatiale des radars se fera comme suit :

- Un radar sur le même site pendant 3 ans sur la façade atlantique
- Un radar déplacé chaque année sur la façade atlantique
- Un radar sur le même site pendant 3 ans sur la façade Manche
- Un radar déplacé chaque année sur la façade Manche.

Le positionnement de la première année a été défini en fonction de la proximité de radars météorologique côtiers et des autorisations d'émission. Les sites retenus sont les suivants : bassin d'Arcachon, ile de Noirmoutier, Cotentin, Baie de Somme.



Figure 16 : localisation des radars ornithologiques pour l'année 1.

Les radars enregistreront les données 24/24h, de juillet/août à mai/juin.

# 4.3.2 Analyse des données des radars météorologiques

Les paragraphes suivants détaillent les méthodes de traitement des échos enregistrés par radar météorologique pour la détection de présence et l'estimation du comportement des oiseaux.

Dans la littérature, la plupart des études de classification des échos radar sont axées sur la séparation des différents types d'hydrométéores pour une plus grande précision dans les QPE (quantitative precipitation estimation) et autres applications météorologiques (Chandrasekar et al. 2013). Dans ces études, les échos non météorologiques sont considérés comme du fouillis et sont éliminés sans distinction entre les airs clairs (par exemple, Zrnić et Ryzhkov 2004, Kilambi et al. 2018). Par conséquent, les méthodes de détection des échos d'oiseaux à partir de données polarimétriques sont basées sur les méthodologies construites pour isoler les précipitations et identifier les hydrométéores, cependant, la détection des biodiffuseurs est plus difficile car les échos sont plus faibles, les diffuseurs ne sont pas uniformément distribués et la microphysique induite par leur mouvement et leurs formes est très complexe.

Dans cette section, nous décrivons les différents types d'algorithmes utilisés pour isoler les pixels contenant des biodiffuseurs (oiseaux et/ou insectes), puis nous présentons des méthodes volumétriques permettant de déduire des informations sur le nombre de biodiffuseurs ainsi que sur leur vitesse et leur direction de vol.

#### 4.3.2.1 Classification pour la détection des biodiffuseurs

On distingue deux types de méthodes pour la classification des pixels : les méthodes dites pixel par pixel, qui se basent uniquement sur la valeur de grandeurs calculées de la même manière pour chaque pixel, et les méthodes convolutionnelles qui se basent sur la convolution d'une fonction de forme sur différentes tailles de fenêtres. Nous présentons ici exclusivement les méthodes utilisées dans la littérature pour la classification des échos de biodiffuseurs.

#### 4.3.2.1.1 Méthodes pixel par pixel

#### 4.3.2.1.1.1 Méthodes basées sur les seuils

Les méthodes de classification les plus élémentaires sont basées sur des seuils observés par les opérateurs. Grâce à la polarimétrie, ces méthodes sont très efficaces pour identifier les phénomènes non météorologiques. Les critères les plus utilisés sont ceux évaluant la sphéricité des diffuseurs :

- Coefficient de corrélation :  $\rho_{HV} < 0.95$  [Tang, 2014], (Dokter et al. 2019)
- Taux de dépolarisation : SDR > -12 dB (Kilambi, 2018)

Ces critères peuvent être combinés avec une condition de réflectivité maximale (dBZ < 35) pour traiter les événements météorologiques à grande échelle qui peuvent contenir des hydrométéores de forme non sphérique.

Cependant, ces méthodes ne permettent pas de différencier les différents types d'air clair. Les méthodes basées sur des seuils utilisées dans la littérature pour isoler les biodiffuseurs sont principalement basées sur l'étude de la vitesse Doppler. Gasteren (2008) a proposé une méthode basée sur la convergence des vitesses horizontales (VVP) pour discriminer les mesures de vent de haute qualité des profils de vent contaminés par les oiseaux. Le principe consiste à évaluer la vitesse horizontale moyenne à une hauteur donnée par la méthode VAD et à calculer un critère d'écart-type pour isoler les données altitudinales contaminées par les oiseaux :  $\sigma_r^2 = 2 m. s^{-1}$  (Gasteren, 2008 ; Dokter, 2019) pour la bande C et  $\sigma_r^2 = 1 m. s^{-1}$  pour la bande S (Dokter, 2019). Selon l'idée que le front migratoire suit une direction uniforme, les pixels aberrants par rapport à la valeur moyenne de la vitesse ( $V_{diffmax} = 10m. s^{-1}$ ) sont considérés comme du bruit.

Dokter (2011) propose également un critère de texture de la vitesse radiale  $\sigma_{cell}^2 = 5 m. s^{-1}$  pour discriminer les oiseaux des insectes en se basant sur l'hypothèse que la variance de la vitesse radiale est plus faible pour les diffuseurs portés par le vent (hydrométéores et insectes) que pour les oiseaux effectuant un vol actif. La **Figure 17** montre l'effet de l'application de seuils sur  $\sigma_{cell}^2$  ainsi qu'une réflectivité maximale ( $Z_e > 20 dBZ$ ) sur la densité d'oiseaux évaluée par les mesures radar météorologiques (basées sur une SER – ou RCS – moyenne - voir section ref) en comparaison avec une mesure radar ornithologique in-situ sur une campagne de mesure d'un mois. Cette figure montre que la grande majorité des densités d'oiseaux non nulles sont observées pour des couches de hauteur avec  $\sigma_r^2 > 2 m. s^{-1}$ .



**Figure 17 :** Écart-type sr de la vitesse radiale en fonction de la réflectivité brute (a, réflectivité incluant les échos non liés aux oiseaux) et en fonction de la réflectivité liée aux oiseaux (b, réflectivité nettoyée des échos non liés aux oiseaux). Chaque point de dispersion se réfère à une couche de hauteur temporelle, c'est-à-dire une couche de hauteur spécifique mesurée à un moment précis (du 22 septembre au 21 octobre 2007). En couleur, la densité des oiseaux est indiquée, telle que mesurée simultanément par le radar à oiseaux (d'après Dokter, 2011).

Gasteren (2008) propose également une méthode de seuil basée sur la vitesse horizontale moyenne (VAD) pour séparer les oiseaux des insectes. Cette méthode repose sur l'hypothèse que les fortes densités d'insectes se produisent par temps chaud et calme et que la vitesse des insectes est proche de la vitesse du vent (Gauthreaux Jr et Belser 2003). Il applique donc un seuil de vitesse minimum de  $6 m. s^{-1}$  pour supprimer l'air clair considéré comme des insectes associés à des vitesses de vent faibles. Cependant, il est très probable que cette méthode préserve principalement les échos d'insectes sans les isoler des échos d'oiseaux. Des insectes ont été observés à des vitesses supérieures à ce seuil (Melnikov, 2015).

#### 4.3.2.1.1.2 Méthodes probabilistes

Les méthodes probabilistes sont basées sur l'apprentissage automatique supervisé pour construire des fonctions de densité de probabilité (telles que celles présentées dans la **Figure 17**) associées aux classes. Les fonctions sont construites pour chaque paramètre et chaque classe et représentent la probabilité des différentes valeurs des paramètres sachant que le pixel est classé dans une certaine classe. Dans notre cas, les paramètres sont les grandeurs présentées précédemment (**Figure 17**) et les classes sont les différents objets : oiseaux, insectes, précipitations... Ainsi, chaque classe est représentée par une densité de probabilité pour chaque paramètre. Et, pour un nouveau pixel à classer, les valeurs des paramètres sont évaluées et associées à une probabilité pour chaque classe ; puis les probabilités sont associées pour assigner une classe "la plus probable" à ce pixel. Il est également envisagé par Nussbaumer (2021] d'associer la probabilité de présence d'insectes et d'oiseaux comme des proportions des différents biodiffuseurs dans le volume, du fait que les volumes de mesure ne sont pas uniformément distribués avec le même biodiffuseur.

Deux méthodes probabilistes sont principalement utilisées pour le calcul des probabilités issues de l'apprentissage supervisé de la classification des diffuseurs radar :

- Inférence bayésienne (Mäkinen, 2022) : cette méthode est basée sur le théorème de Bayes. Fondamentalement, la probabilité pour le pixel d'appartenir à une classe connaissant la valeur des paramètres est calculée comme la probabilité pour les paramètres d'avoir ces valeurs si le pixel appartient à cette classe (probabilité de vraisemblance), multipliée par la probabilité pour le pixel d'être de cette classe (probabilité a priori) :
  - Probabilité de vraisemblance : elle est calculée à l'aide des lois de densité de probabilité. Dans le cas d'un classificateur bayésien naïf, les paramètres sont supposés être statistiquement indépendants et la vraisemblance est calculée comme le produit des probabilités des lois de densité de probabilité.
  - Probabilité a priori : elle est construite à partir d'observations statistiques de la classification des pixels.
     Dans notre cas, elle peut être construite à partir de la position géographique du pixel, de la phénologie des différents biodiffuseurs et des conditions atmosphériques.
- Logique floue (Jatau et Melnikov 2018, Radhakrishna et al. 2019) : cette méthode est basée sur une construction empirique de la loi de combinaison des probabilités entre les différents paramètres considérés. La plus couramment utilisée est la loi multiplicative, qui est comparable à une loi d'inférence bayésienne naïve sans probabilité a priori.

## 4.3.2.1.1.3 Méthodes de classification multilinéaire

Les méthodes de classification multilinéaire sont basées sur la régression multilinéaire d'une fonction permettant de différencier les classes en fonction de leurs paramètres. Une méthode utilisée dans la littérature pour la classification des oiseaux et des insectes est le classificateur Ridge (Jatau, 2021).

#### 4.3.2.1.1.4 Arbre de décision et forêt aléatoire

Un arbre de décision est une structure arborescente composée de nœuds et de branches. L'ensemble de données est divisé en fonction de l'une des caractéristiques d'entrée à chaque nœud, ce qui génère deux branches ou plus en sortie. Ce processus itératif augmente le nombre de branches générées et divise les données originales en différentes classes. Les arbres de décision ont rapidement évolué vers des forêts aléatoires plus sophistiquées. Il s'agit d'un algorithme qui construit un grand nombre d'arbres de décision à partir de sous-ensembles de données construits en divisant et en associant les données d'entrée. La classification finale est construite en associant les sous-classifications réalisées par les différents arbres de décision. Jatau (2021) a utilisé un classificateur à arbre de décision et l'a comparé à un classificateur Ridge sur des données classées empiriquement comme oiseaux ou insectes. Ils ont montré que le classificateur Ridge réussissait mieux que l'arbre de décision à classer ces données. Gauthreaux et Diehl (2020) ont utilisé un classificateur de forêt aléatoire dans une étude impressionnante classant différents types de diffuseurs : insectes en essaim, insectes diurnes présentant un mouvement linéaire, oiseaux aquatiques et grues, migrants trans-golfe, hirondelles noires, chauves-souris à queue libre, grèbes à cou noir et précipitations. À ce jour, il s'agit de la seule étude dans la littérature qui tente de classer plusieurs espèces de biodiffuseurs. Bien entendu, la séparation des différentes espèces d'oiseaux n'est pas très réussie si l'on se base uniquement sur les valeurs des pixels.

#### 4.3.2.1.1.5 Partitionnement (ou clustering)

Le partitionnement (ou clustering) est une méthode non supervisée d'exploration des données et d'identification de groupes d'objets similaires. Cette méthode a la particularité de s'affranchir de l'intervention de l'opérateur impliqué dans les méthodes d'apprentissage supervisé, qui biaise l'interprétation des données par rapport à ce qui est "connu". Cependant, la labellisation doit encore être effectuée après l'identification des principaux groupes de données.

Lukach (2022) a mis en œuvre une approche « descendante » dans laquelle tous les points de données multivariées sont d'abord considérés comme un groupe principal, puis divisés en un nombre optimal de sous-groupes dans le cadre d'une procédure récursive en appliquant l'analyse en composantes principales (ACP) à chaque étape de division distincte. L'objectif est d'isoler les échos de différents types. La classification est effectuée a posteriori en étudiant les principales caractéristiques des différents groupes et le lien avec les propriétés physiques des mesures radar.

#### 4.3.2.1.2 Méthodes de convolution

Les méthodes de convolution font référence aux réseaux neuronaux convolutifs (CNN), qui sont des méthodes de deep learning largement utilisées pour la détection d'objets sur les images. Le fonctionnement des CNN consiste à balayer une image à travers une fenêtre de taille variable et à appliquer différents traitements sur les données afin de localiser les composants principaux de chaque fenêtre. Les données issues des différentes fenêtres et des différents traitements sont injectées dans un réseau neuronal qui permet l'interconnexion des différentes variables par des fonctions mathématiques. Les CNN nécessitent un apprentissage supervisé pour la classification des données. Ces méthodes ont l'avantage de détecter des objets entiers sur les images et donc de prendre en compte les corrélations spatiales entre les pixels.

Lin (2019) a développé un CNN appelé MistNet pour détecter les structures de précipitations sur les PPI à partir de données de radar météorologique à polarisation simple. Cet algorithme a été construit pour les utilisateurs de données radar qui souhaitent écarter les précipitations pour observer les échos de biodiffuseurs et qui n'ont pas accès au coefficient de corrélation ou au taux de dépolarisation pour détecter efficacement les précipitations. Ce type d'approche peut également être efficace pour détecter les franges de précipitations, qui renvoient des grandeurs polarimétriques proches de celles renvoyées par les biodiffuseurs.

#### 4.3.2.1.3 Traitement des IPP et des mesures radar volumétriques pour obtenir des profils de densité d'oiseaux

#### 4.3.2.1.3.1 Estimation du nombre d'oiseaux

Le nombre d'oiseaux dans un volume de mesure est estimé à partir de la réflectivité et de la surface équivalente radar (SER ou RCS) (Dokter, 2011 ; Chilson, 2012). Il est donc très important d'estimer correctement la SER des diffuseurs pour quantifier correctement leur nombre. Les valeurs représentatives de SER pour les oiseaux rapportées dans la littérature sont comprises entre  $SER = 11cm^2$  (Dokter, 2011) et  $SER = 15cm^2$  (Diehl et al. 2003). Presque toutes les études de la littérature utilisent la SER de Dokter (2011) estimée à partir des mesures des radars météorologiques comparées aux mesures in situ des radars d'oiseaux pendant une campagne de mesure d'un mois. Ainsi, le nombre d'oiseaux quantifié dans les études bibliographiques est basé sur une SER très fortement moyennée.

La surface équivalente radar dépend de la taille du diffuseur, de sa forme, de son inclinaison et de la position de ses ailes. La **Figure 18** présente la SER évaluée par la méthode de la matrice T pour des sphéroïdes d'eau de forme prolate. Une SER de  $11cm^2$  peut correspondre à plusieurs situations différentes en fonction du poids de l'objet et de son inclinaison. Ainsi, pour une estimation efficace de la SER, il est nécessaire de modéliser l'objet à partir de sa forme et de son inclinaison. Melnikov (2015) a construit un code de modélisation pour estimer les quantités polarimétriques générées par différentes distributions papillons et ajuster les grandeurs mesurées pour dériver la distribution et la densité les plus probables. Cette approche est très prometteuse, mais elle nécessite de connaître le type de diffuseurs observés. De plus, l'étude portant sur les insectes, l'hypothèse de Rayleigh est respectée, le régime de Mie résonant rencontré par les oiseaux ajoute de la complexité au problème.



**Figure 18 :** Estimation de l'ordre de grandeur de la SER d'un oiseau à 2,8 GHz (bande S). Le corps de l'oiseau est modélisé par une sphéroïde d'eau prolate avec un rapport axial de 2 : 1. Les courbes exactes et asymptotiques relatives à une sphère d'eau sont également indiquées à titre de référence. Plus précisément, la ligne droite en pointillés noirs correspond à l'approximation optique. La SER du sphéroïde prolate a été calculée par la méthode de la matrice T (d'après (Nebuloni et al. 2008).

#### 4.3.2.1.3.2 Estimation de la vitesse et de la direction de vol

Dans la littérature, les études sur les oiseaux estiment la vitesse et la direction de vol des oiseaux par bande d'altitude pour former un profil de densité d'oiseaux par radar avec l'hypothèse d'un alignement commun. La méthode généralement utilisée est la VAD (vertical azimuth display), elle est basée sur le champ de vitesse relative mesuré pour chaque pixel. Le principe de la méthode est d'effectuer une régression linéaire pour déterminer le vecteur vitesse qui représente le mieux l'ensemble des mesures de vitesse relative. Cette méthode est la plus utilisée (Dokter et al. 2011, Van Doren et Horton 2018) car elle est très efficace dans le cas d'un alignement commun. Il existe une autre méthode d'estimation de l'orientation des biodiffuseurs basée sur des grandeurs polarimétriques (Lang et al. 2004, Stepanian et Horton 2015). Elle est basée sur le fait que, contrairement à la plupart des diffuseurs météorologiques, les biodiffuseurs ne sont pas symétriques en rotation autour d'un axe vertical ; c'est-à-dire que l'apparence d'un individu dépend de l'angle sous lequel il est observé, qu'il soit de face, de derrière ou de côté. Ainsi, les grandeurs polarimétriques étant directement liées à la forme de l'objet dans le volume, l'alignement commun des biodiffuseurs peut être déduit de la variation des grandeurs polarimétriques en fonction de l'angle de vue (**Figure 9**). A notre connaissance, aucune étude dans la littérature n'a encore proposé une estimation de la direction et de la vitesse de vol pour chaque pixel des PPI dans le but de construire des profils de vitesse sur l'ensemble du territoire au lieu d'un profil par radar.

## 4.3.2.1.3.3 Post-traitement des profils de densité d'oiseaux

Après avoir estimé les profils de densité d'oiseaux, Nussbaumer (2019) propose de les étudier pour revoir la classification des pixels considérés. La **Figure 19** montre les profils de réflectivité en sortie de l'algorithme vol2bird (Dokter, 2011) évoluant au cours du temps. Les profils de réflectivité de la pluie sont facilement distinguables à l'œil des profils de réflectivité des oiseaux observés le reste du temps. La diffusion au sol laisse également un écho résiduel qui peut être

facilement quantifié et retiré des profils évalués. Cette approche est intéressante et montre que la prise en compte de la dimension verticale des données mesurées peut aider à affiner la classification des diffuseurs. C'est l'idée du paramètre VGZ présenté précédemment, mais il est probablement possible de trouver un critère plus efficace pour la classification.



**Figure 19 :** Profil de réflectivité en fonction du temps sur le radar de Zaventem, Belgique (50°54'19 "N, 4°27'28 "E). Illustration de l'observation des échos de pluie et de la diffusion du sol dans la sortie de l'algorithme vol2bird (modifié d'après Nussbaumer, 2019).

Les profils de densité sont également post-traités par (Nussbaumer et al. 2021) pour reconstruire les mesures à basse altitude où il n'y a pas de données. Dans le cas d'une estimation des profils de réflectivité sur l'ensemble du territoire, cette étape sera essentielle car plus on s'éloigne du radar, moins on dispose de données à basse altitude.

# 4.3.3 Analyse des données des radars ornithologiques

Les grands principes de la méthode déployée pour traiter les données obtenues par radar ornithologique (BirdScan MR1), présentés ci-après, sont tirés de la publication de Schmid et al. 2019.

Pour rappel, la technologie radar repose sur l'émission d'ondes électromagnétiques se propageant dans un faisceau en trois dimensions le long d'un axe principal. La forme et la dimension du faisceau définissent le volume d'air scanné par le radar.

En plus des caractéristiques propres au système radar déployé, l'échelle de détection d'une cible -et par conséquent le volume scanné- dépend de la taille de l'objet et de ses propriétés intrinsèques à refléter les ondes électromagnétiques (i.e. les grands objets reflétant de manière importante les ondes sont détectés (1) plus loin et (2) à un angle à l'axe principal du faisceau plus important que les petits objets).

# 4.3.3.1 Détection au sein du faisceau et radar cross section (RCS)

La perte d'énergie en fonction de la distance au radar relève d'une équation connue. Ainsi, la taille d'un objet peut être estimée à partir de sa réflectivité appelée RCS (radar cross section). Cette RCS est une valeur réelle si l'objet est détecté au centre du faisceau, sinon elle est considérée comme une valeur estimée. La RCS permet de corriger l'effet de la perte d'énergie avec la distance au radar.

La puissance de l'écho diminue aussi lorsque l'angle par rapport à l'axe principal du faisceau augmente. Les cibles scannées en bordure de faisceau apparaissent donc plus petites que si elles avaient été détectées au centre du faisceau. Les RCS apparentes sont donc à considérer comme une valeur *a minima* des RCS réelles. Le volume scanné pour un objet de RCS donnée est ainsi défini en fonction de sa distance de détection et de la RCS spécifique liée à la largeur angulaire du faisceau.

#### 4.3.3.2 Fréquence de battement d'ailes

La fréquence de battement d'ailes des oiseaux est fortement corrélée à leur taille (les oiseaux les plus gros battant généralement plus lentement des ailes, e.g. Bruderer et al. 2010). Au sein du signal radar, la fréquence de battement d'ailes d'une cible peut être estimée à partir de la variation de son intensité au cours du temps (signature de l'écho). Ainsi, la taille d'un oiseau peut aussi être estimée à partir de sa fréquence de battement d'ailes, indépendamment de la RCS apparente. En associant la fréquence de battement d'ailes à la RCS, le volume scanné spécifique par type d'oiseaux est estimé pour permettre une correction et une quantification précise des flux.

## 4.3.3.3 Migration Traffic Rate (MTR)

Le MTR est une mesure standard des mouvements d'oiseaux qui correspond au nombre d'oiseaux traversant un transect virtuel d'un kilomètre pendant une heure. Le MTR prend ainsi en compte la RCS et la variation du volume scanné avec la distance. Pour un objet de RCS donnée, on peut estimer la largeur du faisceau à sa distance de détection. Le rapport entre 1 km de transect et la largeur de faisceau est utilisé comme facteur de correction pour calculer les facteurs MTR de chaque cible. Ces facteurs MTR sont sommés pendant une période donnée et rapportés à l'heure (proportion).

#### 4.3.3.4 Filtrage du signal

La sensibilité du radar est forte à proximité et diminue lorsque la distance au radar augmente. Pour écarter les échos parasites des analyses, un premier filtre supprimant les cibles d'intensité très faible est appliqué. Un second filtre (STC, pour Sensitivity Time Control), dépendant de la distance, permet quant à lui de supprimer les petites cibles proches qui ne sont pas des oiseaux.

## 4.3.4 Synthèse de l'exploitabilité des données dans le cadre du lot de MIGRATLANE

#### 4.3.4.1 Prise en compte des données radar historiques et en cours d'acquisition

Les données existantes identifiées précédemment (cf. paragraphe 4.2.2.1, 4.2.2.2) sont issues de différentes technologies radar, ce qui a pour conséquence une grande variabilité d'échelles d'observation, de résolution des détections, et des potentiels d'analyse qui en découlent. A cela, s'ajoute la diversité des cibles détectées (dont oiseaux marins, oiseaux terrestres migrateurs, sans quantification possible des uns et des autres dans les données radar). Les métriques déduites (flux, nombre de trajectoires, densité) ne sont donc **pas directement comparables** entre les différentes études.

Si tous les jeux de données identifiés ne sont donc pas compilables pour une méta-analyse incluant une quantification de l'activité aviaire, ils demeurent **complémentaires à titre qualitatif**, et permettent d'ajouter des éléments de contexte aux travaux qui seront menés au sein du lot 4 de MIGRATLANE.

	Type de radar	Echelle d'observation	Nombre de	Objets/oiseaux détectés	Propriétés analysées
			dimensions		
Technologies	Radar	Large échelle	3	Nuages de cibles	Densité ; direction
utilisées au	météorologique			biologiques	de vol ; altitudes de
sein du lot 4					vol

de MIGRATLANE	Radar ornithologique BirdScan	Fine échelle	1	Individus et groupes d'individus, espèces petites à grandes	Groupes d'espèces ; Flux quantifiés ; altitudes de vol
	Radar ornithologique BirdScan	Fine échelle	1	Individus et groupes d'individus, espèces petites à grandes	Groupes d'espèces ; Flux quantifiés ; altitudes de vol ; pas d'intercalibration
	Radar 2D en mode vertical	Méso-échelle (<3km)	2	Toutes tailles d'oiseaux	Flux relatifs ; altitudes de vol
Technologies employées dans les suivis recensés	Radar 2D en mode horizontal	Méso-échelle (<10km)	2	Gros individus seuls, groupes de petits individus ; pas de petits individus isolés ; principalement oiseaux marins	Directions de vol ; activité aviaire (relative)
	Radar 3D	Méso-échelle (<7km)	3	Gros individus seuls, groupes de petits individus ; pas de petits individus isolés ; principalement oiseaux marins	Directions de vol ; altitudes de vol ; activité aviaire (relative)

4.3.4.2 Analyses croisées entre radars ornithologiques et météorologiques

Les radars ornithologiques et météorologiques sont des instruments complémentaires :

• Les radars météorologiques informent sur les flux à large échelle des oiseaux migrateurs, en fournissant des données de densité des oiseaux et de direction et de vitesse de vol moyennes.

• Les radars ornithologiques (MIGRATLANE, MIGRALION) fournissent des informations précises sur les déplacements d'oiseaux à fine échelle, et permettent une quantification précise et un premier niveau de classification des groupes d'espèces grâce aux caractéristiques des échos (taille, fréquence des battements d'ailes) et des trajectoires (vitesse, direction).

Les données acquises par radar météorologique et radar ornithologique au sein du lot 4 de MIGRATLANE feront l'objet d'un développement méthodologique spécifique qui permettra de contextualiser les observations acquises par l'une et l'autre des technologies. Pour la classification ainsi que pour la quantification du nombre d'oiseaux en vol, une comparaison des mesures de radars météorologiques et des radars ornithologiques est en effet indispensable afin de calibrer les outils développés. Une partie de ce travail aura d'ores et déjà été réalisée au sein du projet SEMAFOR mais le projet MIGRATLANE permettra d'affiner la calibration de l'ensemble du réseau.

C'est cette analyse croisée des deux sources de données qui permettra de caractériser les mouvements d'oiseaux à l'échelle de deux façades.

#### 4.3.5 Listes des espèces ciblées

Les radars ornithologiques détectent l'ensemble des cibles volant dans leurs volumes de détection. L'intégralité des espèces d'oiseaux en vol dans les rayons de suivi seront donc détectées, que ce soient des espèces terrestres ou marines. Les insectes sont aussi détectés, et prochainement les chauves-souris. Cependant, bien que la détection soit performante, il n'est pas possible à ce jour d'identifier les cibles au niveau de l'espèce. Les radars ornithologiques fournissent un premier niveau de classification des cibles en grands groupes (insectes, oiseaux d'eaux, passereaux, etc.).

# **Références bibliographiques**

- Adamík, P., T. Emmenegger, M. Briedis, L. Gustafsson, I. Henshaw, M. Krist, T. Laaksonen, F. Liechti, P. Procházka, V. Salewski, and S. Hahn. 2016. Barrier crossing in small avian migrants: individual tracking reveals prolonged nocturnal flights into the day as a common migratory strategy. Scientific Reports 6:21560. https://doi.org/10.1038/srep21560.
- Addison, F. I., T. Dally, E. J. Duncan, J. Rouse, W. L. Evans, C. Hassall, and R. R. Neely. 2022. Simulation of the Radar Cross Section of a Noctuid Moth. Remote Sensing 14:1494. https://doi.org/10.3390/rs14061494.
- Agostini, N., M. Panuccio, and C. Pasquaretta. 2015. Morphology, flight performance, and water crossing tendencies of Afro-Palearctic raptors during migration. Current Zoology 61:951–958.
- Alerstam, T. 1991. Ecological causes and consequences of bird orientation. Orientation in birds:202–225.
- Alerstam, T., and Å. Lindström. 1990. Optimal Bird Migration: The Relative Importance of Time, Energy, and Safety. Pages 331–351 in E. Gwinner, editor. Bird Migration. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-74542-3\_22.
- Alerstam, T., M. Rosén, J. Bäckman, P. G. P. Ericson, and O. Hellgren. 2007. Flight speeds among bird species: allometric and phylogenetic effects. PLoS biology 5:e197.
- Aurbach, A., B. Schmid, F. Liechti, N. Chokani, and R. Abhari. 2018. Complex behaviour in complex terrain Modelling bird migration in a high resolution wind field across mountainous terrain to simulate observed patterns. Journal of Theoretical Biology 454:126– 138. https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2018.05.039.
- Becker, J., G. M. ceophysjcat Oiiice, and M. Foyal. 1994. The significance of birdtams/birdstrike warnings for military and civil aviation. Pages 257–262 22nd IBSC Conference. International Bird Strike Committee.
- Serthold, P. 2001. *Bird Migration: A General Survey*. Oxford University Press.
- Bradarić, M., W. Bouten, R. C. Fijn, K. L. Krijgsveld, and J. Shamoun-Baranes. 2020. Winds at departure shape seasonal patterns of nocturnal bird migration over the North Sea. Journal of Avian Biology 51. https://doi.org/10.1111/jav.02562.
- Bringi, V. N., and V. Chandrasekar. 2001. Polarimetric Doppler weather radar: principles and applications. Cambridge university press.
- Bruderer, B., and A. Boldt. 2001. Flight characteristics of birds: I. radar measurements of speeds. Ibis 143:178–204. https://doi.org/10.1111/j.1474-919X.2001.tb04475.x.
- Bruderer, Bruno, Peter, Dieter, Boldt, Andreas, et al. Wing-beat characteristics of birds recorded with tracking radar and cine camera. Ibis, 2010, vol. 152, no 2, p. 272-291.
- Bruderer, B., S. Meyer, and R. Spaar. 2000. To cross the sea or to follow the coast? Flight directions and behaviour of migrating raptors approaching the Mediterranean Sea in autumn. Behaviour 137:379–399.
- Bruderer, B., and D. Peter. 2022. Topography and wind moulding directions of autumn migration between Europe and the West African savannas. Journal of Ornithology 163:357–371. https://doi.org/10.1007/s10336-022-01971-8.
- Bruderer, B., D. Peter, and F. Korner-Nievergelt. 2018. Vertical distribution of bird migration between the Baltic Sea and the Sahara. Journal of Ornithology 159:315–336. https://doi.org/10.1007/s10336-017-1506-z.
- Chandrasekar, V., R. Keränen, S. Lim, and D. Moisseev. 2013. Recent advances in classification of observations from dual polarization weather radars. Atmospheric Research 119:97–111. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.08.014.
- Chilson, P. B., W. F. Frick, P. M. Stepanian, J. R. Shipley, T. H. Kunz, and J. F. Kelly. 2012. Estimating animal densities in the aerosphere using weather radar: To Z or not to Z? Ecosphere 3:art72. https://doi.org/10.1890/ES12-00027.1.
- Schilson, P. B., P. M. Stepanian, and J. F. Kelly. 2017. Radar aeroecology. Pages 277–309 Aeroecology. Springer.
- Cho, Y.-H., G. W. Lee, K.-E. Kim, and I. Zawadzki. 2006. Identification and Removal of Ground Echoes and Anomalous Propagation Using the Characteristics of Radar Echoes. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 23:1206–1222. https://doi.org/10.1175/JTECH1913.1.
- S Diehl, R. H., R. P. Larkin, and J. E. Black. 2003. Radar observations of bird migration over the Great Lakes. The Auk 120:278–290.
- Obkter, A. M., P. Desmet, J. H. Spaaks, S. van Hoey, L. Veen, L. Verlinden, C. Nilsson, G. Haase, H. Leijnse, A. Farnsworth, W. Bouten, and J. Shamoun-Baranes. 2019. bioRad: biological analysis and visualization of weather radar data. Ecography 42:852–860. https://doi.org/10.1111/ecog.04028.

- Obkter, A. M., A. Farnsworth, D. Fink, V. Ruiz-Gutierrez, W. M. Hochachka, F. A. La Sorte, O. J. Robinson, K. V. Rosenberg, and S. Kelling. 2018. Seasonal abundance and survival of North America's migratory avifauna determined by weather radar. Nature Ecology & Evolution 2:1603–1609. https://doi.org/10.1038/s41559-018-0666-4.
- Obkter, A. M., F. Liechti, H. Stark, L. Delobbe, P. Tabary, and I. Holleman. 2011. Bird migration flight altitudes studied by a network of operational weather radars. Journal of The Royal Society Interface 8:30–43. https://doi.org/10.1098/rsif.2010.0116.
- Oviak, R. J. 2006. *Doppler radar and weather observations*. Courier Corporation.
- Oviak, R. J., V. Bringi, A. Ryzhkov, A. Zahrai, and D. Zrnić. 2000. Considerations for Polarimetric Upgrades to Operational WSR-88D Radars. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 17:257–278. https://doi.org/10.1175/1520-0426(2000)017<0257:CFPUTO>2.0.CO;2.
- Erni, B., F. Liechti, and B. Bruderer. 2005. The role of wind in passerine autumn migration between Europe and Africa. Behavioral Ecology 16:732–740. https://doi.org/10.1093/beheco/ari046.
- Erni, B., F. Liechti, L. G. Underhill, and B. Bruderer. 2002. Wind and rain govern the intensity of nocturnal bird migration in central Europe A log-linear regression analysis. Ardea 90:155–166.
- Gasteren, H. V., I. Holleman, W. Bouten, E. V. Loon, and J. Shamoun-Baranes. 2008. Extracting bird migration information from Cband Doppler weather radars: Bird migration extracted from weather radars. Ibis 150:674–686. https://doi.org/10.1111/j.1474-919X.2008.00832.x.
- van Gasteren, H., K. L. Krijgsveld, N. Klauke, Y. Leshem, I. C. Metz, M. Skakuj, S. Sorbi, I. Schekler, and J. Shamoun-Baranes. 2019. Aeroecology meets aviation safety: early warning systems in Europe and the Middle East prevent collisions between birds and aircraft. Ecography 42:899–911.
- S Gauthreaux Jr, S. A., and C. G. Belser. 2003. Radar ornithology and biological conservation. The Auk 120:266–277.
- Gauthreaux, S., and R. Diehl. 2020. Discrimination of Biological Scatterers in Polarimetric Weather Radar Data: Opportunities and Challenges. Remote Sensing 12:545. https://doi.org/10.3390/rs12030545.
- Geil, S., H. Noer, and J. Rabøl. 1974. Forecast models for bird migration in Denmark. Report published by Bird Strike Committee Denmark.
- Guilherme, J. L., V. R. Jones, I. Catry, M. Beal, M. P. Dias, S. Oppel, J. A. Vickery, C. M. Hewson, S. H. M. Butchart, and A. S. L. Rodrigues. (n.d.). Connectivity between countries established by landbirds and raptors migrating along the African-Eurasian flyway. Conservation Biology n/a. https://doi.org/10.1111/cobi.14002.
- Hahn, S., S. Bauer, and F. Liechti. 2009. The natural link between Europe and Africa 2.1 billion birds on migration. Oikos 118:624–626. https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2008.17309.x.
- Huuskonen, A., E. Saltikoff, and I. Holleman. 2014. The Operational Weather Radar Network in Europe. Bulletin of the American Meteorological Society 95:897–907. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00216.1.
- S Jatau, P., and V. Melnikov. 2018. Bird detection algorithm for the WSR-88D radars:45.
- S Jatau, P., V. Melnikov, and T.-Y. Yu. 2021. A machine learning approach for classifying bird and insect radar echoes with S-band Polarimetric Weather Radar. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. https://doi.org/10.1175/JTECH-D-20-0180.1.
- Kilambi, A., F. Fabry, and V. Meunier. 2018. A simple and effective method for separating meteorological from nonmeteorological targets using dual-polarization data. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 35:1415–1424.
- Kranstauber, B., W. Bouten, H. van Gasteren, and J. Shamoun-Baranes. 2022. Ensemble predictions are essential for accurate bird migration forecasts for conservation and flight safety. Ecological Solutions and Evidence 3:e12158. https://doi.org/10.1002/2688-8319.12158.
- Lang, T. J., S. A. Rutledge, and J. L. Stith. 2004. Observations of Quasi-Symmetric Echo Patterns in Clear Air with the CSU–CHILL Polarimetric Radar. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 21:1182–1189. https://doi.org/10.1175/1520-0426(2004)021<1182:OOQEPI>2.0.CO;2.
- Lin, T., K. Winner, G. Bernstein, A. Mittal, A. M. Dokter, K. G. Horton, C. Nilsson, B. M. Van Doren, A. Farnsworth, F. A. La Sorte, S. Maji, and D. Sheldon. 2019. M IST N ET: Measuring historical bird migration in the US using archived weather radar data and convolutional neural networks. Methods in Ecology and Evolution 10:1908–1922. https://doi.org/10.1111/2041-210X.13280.
- Lippert, F., B. Kranstauber, P. D. Forré, and E. E. van Loon. 2022. Learning to predict spatiotemporal movement dynamics from weather radar networks. Methods in Ecology and Evolution.
- Lukach, M., T. Dally, W. Evans, C. Hassall, E. J. Duncan, L. Bennett, F. I. Addison, W. E. Kunin, J. W. Chapman, and R. R. Neely. 2022. The development of an unsupervised hierarchical clustering analysis of dual-polarization weather surveillance radar observations to assess nocturnal insect abundance and diversity. Remote Sensing in Ecology and Conservation 8:698–716. https://doi.org/10.1002/rse2.270.
- Mäkinen, T., J. Ritvanen, S. Pulkkinen, N. Weisshaupt, and J. Koistinen. 2022. Bayesian Classification of Nonmeteorological Targets in Polarimetric Doppler Radar Measurements. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 39:1561–1578.
- Martin, W. J., and A. Shapiro. 2007. Discrimination of Bird and Insect Radar Echoes in Clear Air Using High-Resolution Radars. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 24:1215–1230. https://doi.org/10.1175/JTECH2038.1.
- McCabe, J. D., B. J. Olsen, B. Osti, and P. O. Koons. 2018. The influence of wind selectivity on migratory behavioral strategies. Behavioral Ecology 29:160–168.
- S Meischner, P. 2005. Weather radar: principles and advanced applications. Springer Science & Business Media.
- Melnikov, V. M., R. J. Doviak, D. S. Zrnić, and D. J. Stensrud. 2013. Structures of Bragg Scatter Observed with the Polarimetric WSR-88D. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 30:1253–1258. https://doi.org/10.1175/JTECH-D-12-00210.1.
- Melnikov, V. M., M. J. Istok, and J. K. Westbrook. 2015. Asymmetric Radar Echo Patterns from Insects. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 32:659–674. https://doi.org/10.1175/JTECH-D-13-00247.1.

- Melnikov, V. M., R. R. Lee, and N. J. Langlieb. 2012. Resonance Effects Within S-Band in Echoes From Birds. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters 9:413–416. https://doi.org/10.1109/LGRS.2011.2169933.
- Mirkovic, D., P. M. Stepanian, J. F. Kelly, and P. B. Chilson. 2016. Electromagnetic Model Reliably Predicts Radar Scattering Characteristics of Airborne Organisms. Scientific Reports 6:35637. https://doi.org/10.1038/srep35637.
- Nebuloni, R., C. Capsoni, and V. Vigorita. 2008. Quantifying Bird Migration by a High-Resolution Weather Radar. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 46:1867–1875. https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.916467.
- Newton, I. 2010. Bird migration. British Birds 103:413–6.
- Nilsson, C., A. M. Dokter, L. Verlinden, J. Shamoun-Baranes, B. Schmid, P. Desmet, S. Bauer, J. Chapman, J. A. Alves, P. M. Stepanian, N. Sapir, C. Wainwright, M. Boos, A. Górska, M. H. M. Menz, P. Rodrigues, H. Leijnse, P. Zehtindjiev, R. Brabant, G. Haase, N. Weisshaupt, M. Ciach, and F. Liechti. 2019. Revealing patterns of nocturnal migration using the European weather radar network. Ecography 42:876–886. https://doi.org/10.1111/ecog.04003.
- Nussbaumer, R., S. Bauer, L. Benoit, G. Mariethoz, F. Liechti, and B. Schmid. 2021. Quantifying year-round nocturnal bird migration with a fluid dynamics model. Journal of The Royal Society Interface 18:20210194. https://doi.org/10.1098/rsif.2021.0194.
- Nussbaumer, R., L. Benoit, G. Mariethoz, F. Liechti, S. Bauer, and B. Schmid. 2019. A geostatistical approach to estimate high resolution nocturnal bird migration densities from a weather radar network. preprint, Ecology. https://doi.org/10.1101/690065.
- Nussbaumer, R., B. Schmid, S. Bauer, and F. Liechti. 2022. Favorable winds speed up bird migration in spring but not in autumn. Ecology and Evolution 12:e9146. https://doi.org/10.1002/ece3.9146.
- Probert-Jones, J. R. 1962. The radar equation in meteorology. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 88:485–495.
- Radhakrishna, B., F. Fabry, and A. Kilambi. 2019. Fuzzy Logic Algorithms to Identify Birds, Precipitation, and Ground Clutter in S-Band Radar Data Using Polarimetric and Nonpolarimetric Variables. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 36:2401–2414. https://doi.org/10.1175/JTECH-D-19-0088.1.
- Raissi, M., P. Perdikaris, and G. E. Karniadakis. 2019. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. Journal of Computational physics 378:686–707.
- Richardson, W. J. 1976. Autumn Migration Over Puerto Rico and the Western Atlantic: A Radar Study. Ibis 118:309–332. https://doi.org/10.1111/j.1474-919X.1976.tb02023.x.
- Ryzhkov, A. V. 2007. The Impact of Beam Broadening on the Quality of Radar Polarimetric Data. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 24:729–744. https://doi.org/10.1175/JTECH2003.1.
- Ryzhkov, A. V., and D. S. Zrnić. 2007. Depolarization in Ice Crystals and Its Effect on Radar Polarimetric Measurements. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 24:1256–1267. https://doi.org/10.1175/JTECH2034.1.
- Schmaljohann, H., F. Liechti, and B. Bruderer. 2009. Trans-Sahara migrants select flight altitudes to minimize energy costs rather than water loss. Behavioral Ecology and Sociobiology 63:1609–1619.
- Schmid, B., S. Zaugg, S. C. Votier, J. W. Chapman, M. Boos, and F. Liechti. 2019. Size matters in quantitative radar monitoring of animal migration: estimating monitored volume from wingbeat frequency. Ecography 42:931–941. https://doi.org/10.1111/ecog.04025.
- Shamoun-Baranes, J., J. A. Alves, S. Bauer, A. M. Dokter, O. Hüppop, J. Koistinen, H. Leijnse, F. Liechti, H. van Gasteren, and J. W. Chapman. 2014. Continental-scale radar monitoring of the aerial movements of animals. Movement Ecology 2:9. https://doi.org/10.1186/2051-3933-2-9.
- Shamoun-Baranes, J., F. Liechti, and W. M. G. Vansteelant. 2017. Atmospheric conditions create freeways, detours and tailbacks for migrating birds. Journal of Comparative Physiology A 203:509–529. https://doi.org/10.1007/s00359-017-1181-9.
- Sordello, R., J. Comolet-Tirman, J. C. De Massary, P. Dupont, P. Haffner, G. Rogeon, J. P. Siblet, J. Touroult, and J. Trouvilliez. 2011. Trame verte et bleue–Critères nationaux de cohérence–Contribution à la définition du critère sur les espèces. Rapport MNHN-SPN.
- Stepanian, P. M., and K. G. Horton. 2015. Extracting migrant flight orientation profiles using polarimetric radar. IEEE transactions on geoscience and remote sensing 53:6518–6528.
- Stepanian, P. M., K. G. Horton, V. M. Melnikov, D. S. Zrnić, and S. A. Gauthreaux Jr. 2016. Dual-polarization radar products for biological applications. Ecosphere 7:e01539.
- Van Belle, J., J. Shamoun-Baranes, E. Van Loon, and W. Bouten. 2007. An operational model predicting autumn bird migration intensities for flight safety. Journal of applied ecology 44:864–874.
- Van Doren, B. M., and K. G. Horton. 2018. A continental system for forecasting bird migration. Science 361:1115. https://doi.org/10.1126/science.aat7526.
- Wang, S., C. Hu, K. Cui, R. Wang, H. Mao, and D. Wu. 2021. Animal Migration Patterns Extraction Based on Atrous-Gated CNN Deep Learning Model. Remote Sensing 13:4998. https://doi.org/10.3390/rs13244998.
- Saugg, S., G. Saporta, E. van Loon, H. Schmaljohann, and F. Liechti. 2008. Automatic identification of bird targets with radar via patterns produced by wing flapping. Journal of The Royal Society Interface 5:1041–1053. https://doi.org/10.1098/rsif.2007.1349.
- Schnder, S., S. Åkesson, F. Liechti, and B. Bruderer. 2001. Nocturnal autumn bird migration at Falsterbo, South Sweden. Journal of Avian Biology 32:239–248. https://doi.org/10.1111/j.0908-8857.2001.320306.x.
- Strnic, D. S., and A. V. Ryzhkov. 1999. Polarimetry for weather surveillance radars. Bulletin of the American Meteorological Society 80:389–406.
- Szrnić, D. S., and A. V. Ryzhkov. 2004. Polarimetric properties of chaff. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 21:1017–1024.