

Techniques de Recherches et  
Identification par Drone de l'Avifaune



## LE DRONE AU SERVICE DE LA BIOLOGIE DE LA CONSERVATION

Synthèses bibliographiques sur l'application  
du drone au suivi des oiseaux marins

©Prodrone



Groupement d'Intérêt Scientifique  
Oiseaux Marins





# CORPUS DE SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

## Le drone appliqué à la conservation des espèces et à l'inventaire des oiseaux marins

Réalisé dans le cadre du projet TRIDA (Technique et Recherche pour l'Identification par Drone de l'Avifaune)

Auteurs : Philippe CANNESON<sup>1</sup>, Bénédicte FELTER<sup>1</sup>, Olivier SCHER<sup>2,6</sup>, Antoine COULOMBEL<sup>3</sup>, Bastien GAUTRON<sup>1</sup>, Benjamin GREAU<sup>3</sup>, Gauthier POIRIEZ<sup>7</sup>, Quentin VAN HECKE<sup>1</sup>, Souraya OUAIDAR<sup>4</sup>, Mourad BOUNEFFA<sup>4</sup>, Arnaud LEWANDOWSKI<sup>4</sup>, Grégory BOURGUIN<sup>4</sup>, Antoine CHABROLLE<sup>2</sup>, Bernard CADIOU<sup>2,5</sup>

1 Écosphère, 2 route de la Trésorerie. 62126 WIMILLE

2 GISOM, Groupement d'Intérêt Scientifique des Oiseaux Marins, MNHN, 55 rue Buffon, 75005 PARIS

3 Prodrone, 2 route de la Trésorerie. 62126 WIMILLE

4 LISIC, université de la Côte d'Opale, 50 rue Ferdinand Buisson, 62228 CALAIS

5 Bretagne Vivante - SEPNB, 19 rue de Gouesnou, 29200 BREST

6 CEN Occitanie 'immeuble le Thèbes', 26 allées de Mycènes, 34000 MONTPELLIER

7 Groupe Ornithologique et naturaliste, 5 rue Jules de Vicq, 59800 LILLE

Contact : philippe.cannesson@ecosphere.fr

Mise en page : Amandine DUBRULLE

Logo TRIDA : Ségolène ANTOINE-HOUY

Crédit Photos : page de couverture Prodrone

Citation : Cannesson P., Felter B., Scher O., Coulombel A., Gautron B., Greau B., Poiriez G., Van Hecke Q., Ouaidar S., Bouneffa M., Lewandowski A., Bourguin G., Chabrolle A., Cadiou B. 2024. CORPUS DE SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE : Le drone appliqué à la conservation des espèces et à l'inventaire des oiseaux marins. Projet TRIDA.



# AVANT-PROPOS

Les oiseaux marins ou oiseaux de mer fascinent tant par leur adaptation au milieu marin, leur diversité mais aussi par la symbolique qui leur est associée. Dans de nombreuses cultures, les oiseaux de mer sont les symboles de liberté et du voyage. Dans nos sociétés, ils peuvent être également considérés comme le reflet de la santé des écosystèmes qu'ils fréquentent.

Se reposant sur les plages, suivant les chalutiers, nichant sur les falaises ou naviguant au grand large, les oiseaux marins offrent un spectacle fascinant. Cependant, les populations de certaines espèces connaissent un déclin préoccupant. Pour exemple, en 2022 et 2023, d'importantes colonies de Sterne Caugek, de Fou de Bassan et de Mouettes sp. ont été décimées par l'influenza aviaire hautement pathogène sur les côtes bretonnes, normandes, du Pas-de-Calais, de mer du Nord ainsi que sur le littoral méditerranéen. Outre les maladies infectieuses, les colonies sont également soumises à des pressions anthropiques (dérangement, pollution, dégradation des sites de reproduction) pouvant avoir des effets sur leur développement et leur persistance.

C'est pourquoi l'état écologique des colonies et populations d'oiseaux marins sont suivis de près par différents acteurs impliqués dans la conservation de la biodiversité. Ces acteurs sont regroupés au sein d'un réseau, le Réseau d'Études Scientifiques sur les Oiseaux Marins, et sont des gestionnaires, scientifiques, associations, bureau d'études ou appartiennent à des services de l'Etat.

Dans le cadre de cette surveillance, différents protocoles sont mis en place et adaptés selon les espèces et le contexte de nidification. Ces dernières années, des protocoles basés sur l'utilisation de drone ont été de plus en plus employés par différents acteurs. Si cette méthode est intéressante, nous ressentons aujourd'hui le besoin de mettre à disposition un socle sur lesquels ces acteurs pourraient s'appuyer, afin de réaliser des suivis efficaces (économiquement et temporellement), qualitatifs et éthiques.

C'est dans ce contexte que le projet TRIDA a pris son essor. Ce projet est né de la collaboration entre des structures associatives (Groupement d'Intérêt Scientifique Oiseaux Marins, Groupement Ornithologique et Naturaliste du Nord-Pas-de-Calais) et privées (Laboratoire de recherche spécialisé en informatique et dans le traitement du signal et de l'image (LISIC), et de l'Office Français de la Biodiversité).



# **SOMMAIRE DES CHAPITRES**

**CHAPITRE 1 : Le drone, une technologie au service de la conservation de la biodiversité ? ..... 4**

**CHAPITRE 2 : Analyse comparative des outils existants pouvant être utilisés pour l’inventaire de la faune. .... 56**

**CHAPITRE 3 : Analyse bibliographique concernant l’utilisation du drone pour le recensement des colonies d’oiseaux marins et les outils d’analyse d’images, et retours d’expérience pour les suivis réalisés en France. .... 102**

**CHAPITRE 4 : Méthodes de recensement des oiseaux marins et côtiers en période de nidification sur le littoral français. .... 129**

**CHAPITRE 5 : Intelligence Artificielle pour le Traitement Automatique des Images d’Oiseaux par Drones. .... 156**



A stylized illustration of a drone with four rotors, shown in a grey tone with a yellow curved line indicating motion or rotation.

# CHAPITRE 1

## Le drone, une technologie au service de la conservation de la biodiversité ?

B. Felter, B. Gautron & P. Cannesson

### Résumé

---

L'utilisation du drone dans le domaine de l'expertise écologique, et notamment en biologie de la conservation a pris son essor au début des années 2010 et s'inscrit aujourd'hui dans un grand nombre d'études à travers le globe. Une analyse quantitative de l'évolution de l'utilisation de cet outil est présentée dans le présent chapitre, à partir d'un pool de 615 articles recensés entre 2005 et 2022.

Il existe un réel engouement pour cet outil qui se traduit par un nombre de publication au cours du temps exponentiel. Nous mettons notamment en évidence que le drone est employé dans la recherche sur les 6 continents, mais de façon relativement hétérogène.

De même, l'outil drone a permis de donner un nouveau souffle et d'apporter de nouvelles perspectives à l'étude comportementale, physiologique ou à la surveillance de la biodiversité. En effet, les études recensées font état de l'utilisation possible du drone pour une grande diversité de compartiments terrestres, marins, ou d'espèces microscopiques (bactéries) ou de grandes tailles. L'outil drone est également utilisé pour étudier l'évolution ou la qualité des habitats terrestres (prairial, bocager, steppique, forestier...) aquatiques ou marins, et permet par exemple le suivi et l'évaluation d'une restauration écologique. Les capacités de l'outil n'ont pas encore fini de nous surprendre, notamment dans l'étude du milieu marin, de sa faune et de sa flore.

Cependant, l'outil drone présente certaines limites à son utilisation. Une analyse qualitative de son usage en biologie de la conservation a permis d'identifier 2 groupes d'obstacles dépendant (i) des objectifs des inventaires et du type de données collectées, (ii) et du contexte environnemental, administratif et réglementaire du site d'étude. Quatre limites distinctes peuvent être identifiées au sein de ces deux groupes.

Certaines évolutions technologiques et du couplage drone avec l'Intelligence Artificielle (IA) permettront de franchir les obstacles les plus cités dans la littérature. Les futures recherches et la production de lignes de conduite permettront également d'avoir une recherche plus éthique. En effet, l'accompagnement des chercheurs et acteurs opérationnels dans le choix de drones, de capteurs et dans les protocoles à travers des outils accessibles et pédagogiques est essentiel, afin d'accompagner au mieux la croissance et l'appropriation de cet outil.

# SOMMAIRE CHAPITRE 1



<b>I. Introduction</b> .....	6
<b>II. Matériels &amp; Méthodes</b> .....	7
A. Les recherches bibliographiques .....	7
B. Étude de la répartition des études à travers le globe .....	8
C. Étude de l'évolution des publications au cours du temps .....	9
D. Étude de la diversité des études recensées .....	9
<b>III. Résultats</b> .....	10
A. Le drone, un outil devenu incontournable en biologie de conservation ? .....	10
B. Le drone appliqué à la biologie de la conservation, un outil uniformément étudié à travers le monde ? .....	12
C. Le drone, un outil adapté à tous les biotopes ? .....	13
D. Le drone, un outil adéquat pour étudier tous les compartiments des écosystèmes ? .....	14
E. Le drone, un outil sans faille ? .....	17
F. Le drone en France .....	26
<b>IV. Conclusion</b> .....	28
<b>V. Références</b> .....	29



# I. Introduction

Depuis son apparition, lors du sommet de la Terre à Rio de Janeiro en 1992, le mot « biodiversité » a mis en lumière et amplifié l'engouement pour la conservation et la protection de la nature. La conservation de cette biodiversité<sup>1</sup>, est devenue un enjeu mondial face aux constats de l'extinction massive et rapide des espèces. Ce concept fédérateur mobilise une grande diversité de domaines d'expertise, tels que les biologistes, écologues, agronomes, géographes mais aussi les économistes, les personnalités de la classe politique et les médias (Blandin, 2009 ; Casetta & Delord, 2016 ; Craven et al., 2019).

La rapidité de l'extinction des espèces est telle que certains auteurs l'identifient comme la sixième extinction de masse (Ceballos, et al., 2015 ; Naggs, 2017). L'origine de cette extinction est principalement humaine et serait liée aux changements climatiques, aux pollutions, à la dégradation et la fragmentation des milieux naturels, à l'introduction d'espèces exotiques envahissantes...

The IUCN Red List of Threatened Species<sup>2</sup> évalue que 28 % des espèces connues et évaluées dans le monde sont menacées. En Europe, 13 % des oiseaux évalués sont menacés (8 espèces en danger critique, 15 espèces en danger, et 48 espèces vulnérables ; *European Red List of Birds, 2021*). Parmi eux, les oiseaux marins sont le deuxième groupe le plus touché avec 28 espèces menacées ou quasi-menacées en Europe, et avec environ 33 % des espèces en régression (*European Red List of Birds, 2021*).

« Depuis quelques années, la technologie est détournée, adaptée ou développée pour la mettre au service de la conservation de la biodiversité et de la connaissance. Parmi elles, de plus en plus d'auteurs testent ou invitent à utiliser le drone dans le cadre de suivis naturalistes ou d'études comportementales. »

L'érosion de cette biodiversité interpelle et invite à acquérir davantage de connaissances sur les espèces qui nous entourent et les interactions entre elles et leur milieu, à repenser nos pratiques et à innover. Innover, pour comprendre l'origine de l'extinction rapide de nombreuses espèces, pour mieux connaître et suivre l'évolution des populations, et pour trouver des solutions afin freiner les extinctions. La connaissance sur l'état des populations, leur dynamique et leur évolution est une des clefs pour mieux appréhender les enjeux et mettre en place des actions en faveur de ces espèces (Jewell, 2013).

Depuis quelques années, la technologie est détournée, adaptée ou développée pour la mettre au service de la conservation de la biodiversité et de la connaissance. Parmi elles, de plus en plus d'auteurs testent ou invitent à utiliser le drone dans le cadre de suivis naturalistes ou d'études comportementales.

Le drone ou l'aile volante<sup>3</sup> est un aéronef qui a la particularité d'être piloté à distance (depuis le sol par exemple) par un télépilote. Cette technologie, créée par Elmer Ambrose Sperry, Lawrence Sperry et Peter Cooper Hewitt, fait sa première apparition en 1916 aux États-Unis (Gonzalez-Aguilera & Rodriguez-Gonzalvez, 2017). Leur drone avait pour objectif de lancer des torpilles aériennes sans aucun pilote à son bord.

Depuis quelques années, l'utilisation du drone a été détournée du contexte militaire pour s'implanter dans différents domaines d'activité tels que la télésurveillance, la cartographie, l'agriculture, mais également pour la pratique de loisirs et le tourisme (Whitehead & Hugenholtz, 2014 ; Crutsinger et al., 2016).

1 Le concept de biodiversité peut être traduit et perçu de bien des manières (Casetta & Delord, 2016 ; Devictor, 2015). Dans le présent document, nous désignons par le terme biodiversité, l'ensemble des êtres vivants, les écosystèmes dans lesquels ils vivent, ainsi que les interactions des espèces entre elles et avec leurs milieux.

2 La Liste rouge de l'UICN est un indicateur essentiel de la santé de la biodiversité mondiale. C'est un outil puissant pour éclairer les actions et les politiques de conservation. Il fournit des informations sur l'aire de répartition des espèces, la taille de la population, les habitats et l'écologie, l'utilisation et le commerce, les menaces et les actions de conservation qui aident à éclairer les décisions de conservation.

3 Aéronef dont les ailes sont prédominantes

Les premiers articles évoquant son utilisation dans le cadre d'études scientifiques en écologie datent de 1998 (Charbonneau & Lemaître, 2021). D'après les recherches de ces auteurs, les scientifiques ont privilégié, dans un premier temps, l'aile volante pour réaliser des suivis sur de larges zones d'étude. Puis, peu à peu, le drone a supplanté cette dernière pour être aujourd'hui majoritairement utilisé. Le drone a l'avantage d'être plus polyvalent et plus précis que l'aile volante. Il permet à la fois de cartographier ou photographier des éléments du paysage ou des individus sur des points fixes ou bien de réaliser des vols dynamiques sur quelques kilomètres (Wich & Kho, 2018).

L'utilisation de drones ou d'ailes volantes apporte de nouvelles perspectives et de nouveaux moyens pour inventorier la faune et la flore et pour acquérir de nouvelles connaissances sur les populations étudiées. Cette technologie est principalement utilisée pour accéder à des milieux spécifiques ou pour pallier les limites des différentes méthodes d'inventaire existantes. En effet, de son approche par les cieux, le drone permet de percevoir le monde à plus large échelle, observer des milieux inaccessibles à l'humain et percevoir la faune autrement via des capteurs spécifiques (infrarouge, thermique, RGB).

Certains auteurs considèrent que le drone est aujourd'hui incontournable dans la surveillance et la préservation de la biodiversité, la contribution à des recherches scientifiques, mais aussi dans la protection des espèces contre le braconnage (Linchant et al., 2014 ; Schofield et al., 2017 ; Sun et al., 2020 ; Ngabinzeke et al., 2022).

Néanmoins, nous nous sommes interrogés : l'utilisation du drone est-elle aussi répandue que le laisse penser ces auteurs ? Le drone est-il le nouvel allié de la conservation de la faune et de la flore ? Existe-t-il des limites à son utilisation, ou des contextes à éviter ou à privilégier ?

Il existe à ce jour un nombre important d'articles et de review qui synthétisent les différents travaux réalisés sur le sujet (par exemple : Chabot et al., 2015 ; López et al., 2019 ; Balestrieri et al., 2021 ; Charbonneau & Lemaître, 2021).

« Ainsi, le premier Chapitre du présent document vise à brosser un portrait de la littérature scientifique accessible traitant du sujet. Plus spécifiquement, ce vaste sujet a été étudié à travers le prisme du nombre d'études intégrant ou évaluant l'outil drone à travers le temps et l'espace, et des limites auxquelles nous pourrions être confrontés. »

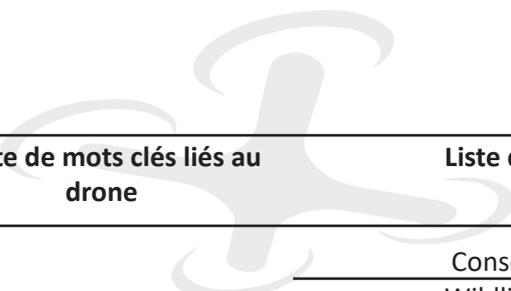
## II. Matériels & Méthodes

### A. Les recherches bibliographiques

Les recherches bibliographiques ont été réalisées sur les moteurs de recherche « Google Scholar », à partir d'une association de mots clefs faisant référence à la technologie drone et au monde de l'écologie. La langue privilégiée était l'anglais afin de pouvoir recenser et accéder aux articles publiés sur les 6 continents dans des revues internationales. Il a été associé à chacune des recherches un mot désignant la technologie drone, à au moins un mot désignant le domaine d'étude qui nous intéresse : la biologie de la conservation et l'écologie.

Le Tableau 1, liste les mots qui ont été associés (1 mot faisant référence au drone a pu être utilisé pour plusieurs mots faisant référence à l'écologie ou la conservation, et vice-versa).

Les résultats présentés dans ce chapitre s'appuient sur les 615 articles référencés et sur les nombreuses review sur le sujet. L'analyse présentée ici est non exhaustive, mais tend à une forme de représentativité des principales tendances et sujets étudiés à l'aide du drone en écologie.



Liste de mots clés liés au drone	Liste de mots clés liés à la conservation/l'écologie	
Drone UAV	Conservation	Biodiversity monitoring
	Wildlife	Fauna
	Forest	Plant
	Habitat	Ecology
	Automated analysis	Algorithm emagery
	Guidelines	Protected area

**Tableau 1 :** Synthèse des mots-clefs utilisés pour la recherche bibliographique

## ➤ B. Étude de la répartition des études à travers le globe

Nous avons cherché à comprendre comment se répartissait l'utilisation du drone à travers le globe. Pour ce faire, nous avons attribué à chaque article un pays de référence. Ce pays correspond au pays où ont eu lieu les expérimentations terrains ou le pays où se situe l'université de rattachement du premier auteur pour les review, guidelines ou les articles ne portant que sur le développement d'algorithmes. La carte résultante a été réalisée sur ArcGis Pro (v3.0.3).



**Figure 1 :** Montage photos de la grande diversité de la faune et de la flore pouvant être étudiée grâce au drone à travers le monde.

## ➤ C. Etude de l'évolution des publications au cours du temps



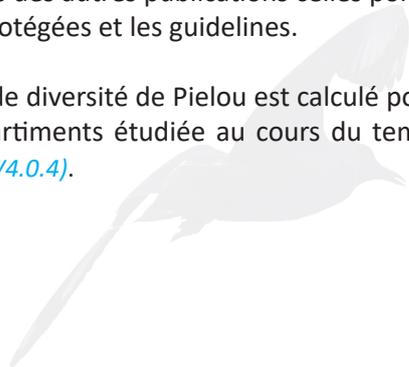
Afin d'étudier les orientations principales des recherches portant sur l'utilisation du drone en biologie de la conservation ou en écologie, nous avons associé à chaque article une modalité révélant son axe de recherche principal. Nous avons identifié 8 axes de recherche principaux :

- Inventaire : utilisation expérimentale pour détecter ou inventorier des composantes de l'écosystème étudié ;
- Physiologie-santé : évaluation de la santé des individus ou étude physiologique ;
- Comportement : étude du comportement des individus à l'approche du drone ou étude du comportement des individus vus du ciel ;
- Protection : utilisation du drone afin de protéger des espèces du braconnage, ou les aires protégées, à aider à gérer les conflits humains-faune sauvage, ou en protégeant la faune des collisions avec les lignes électriques, ou à protéger les chercheurs en limitant leur proximité avec des prédateurs ;
- Protocole : étude relatant des lignes de conduites et des protocoles à adopter pour inventorier les différentes composantes des écosystèmes ;
- Analyse : étude majoritairement axée sur le développement d'algorithmes ou de logiciels afin d'automatiser le traitement des données produites lors des inventaires par drone ;
- Review : synthèse bibliographique de l'utilisation du drone sur un ou plusieurs compartiments.

## ➤ D. Etude de la diversité des études recensées

Au cours du temps, le drone a été le sujet d'une grande variété d'études. Ces dernières varient tant par leur sujet que par le compartiment de la biodiversité testé. Afin d'étudier cette diversité, nous avons associé à chaque étude un compartiment désignant les grands groupes faunistiques, les strates de végétation, ou bien les habitats. Nous distinguons des autres publications celles portant sur les Espèces Exotiques Envahissantes ([EEE](#)), celles centrées sur les aires protégées et les guidelines.

Un indice de diversité de Pielou est calculé pour chaque année afin de rendre compte de l'évolution de la diversité des compartiments étudiée au cours du temps. Les graphiques ont été réalisés à l'aide du package ggplot2 du logiciel R ([V4.0.4](#)).



### III. Résultats

#### A. Le drone, un outil devenu incontournable en biologie de conservation ?

L'utilisation du drone en écologie est mentionnée dans les articles scientifiques dès 1998 (Charbonneau & Lemaître, 2021). Cependant, son utilisation dans le cadre d'études scientifiques prend réellement son essor au début des années 2000 (Whitehead & Hugenholtz, 2014). Depuis les années 2010, le nombre de publications à partir de cette décennie explose et augmente de façon exponentielle (Fig. 2). Notre échantillonnage révèle que 2018 est une année record avec 87 articles portant sur l'utilisation du drone en biologie de la conservation.

Ce pattern est révélateur de l'intérêt porté par les scientifiques à l'utilisation du drone en biologie de la conservation et des nouvelles perspectives et possibilités qu'offrent ces outils dans le cadre d'études écologiques.

En écologie, et notamment en biologie de la conservation, la connaissance sur les espèces, l'état des populations, le comportement, l'état écologique des écosystèmes et leur connectivité, la délimitation et la gestion d'aires protégées et des espèces exotiques envahissantes sont des sujets primordiaux, conditionnés par la disponibilité et l'accès aux informations et aux données.

L'accès à ces informations est rendu possible, ou tout du moins simplifié, par l'utilisation de systèmes d'aéronef sans pilotes (UAS) (ou drones). En effet, outre le fait de réaliser des inventaires moins invasifs pour la faune, le drone permet d'aller dans des environnements inaccessibles ou dangereux, tout en préservant le pilote (Whitehead & Hugenholtz, 2014) et permettant ainsi d'étudier une large gamme d'espèces d'habitats à travers le monde, à travers des protocoles répliquables dans le temps et l'espace (Jewel, 2013).

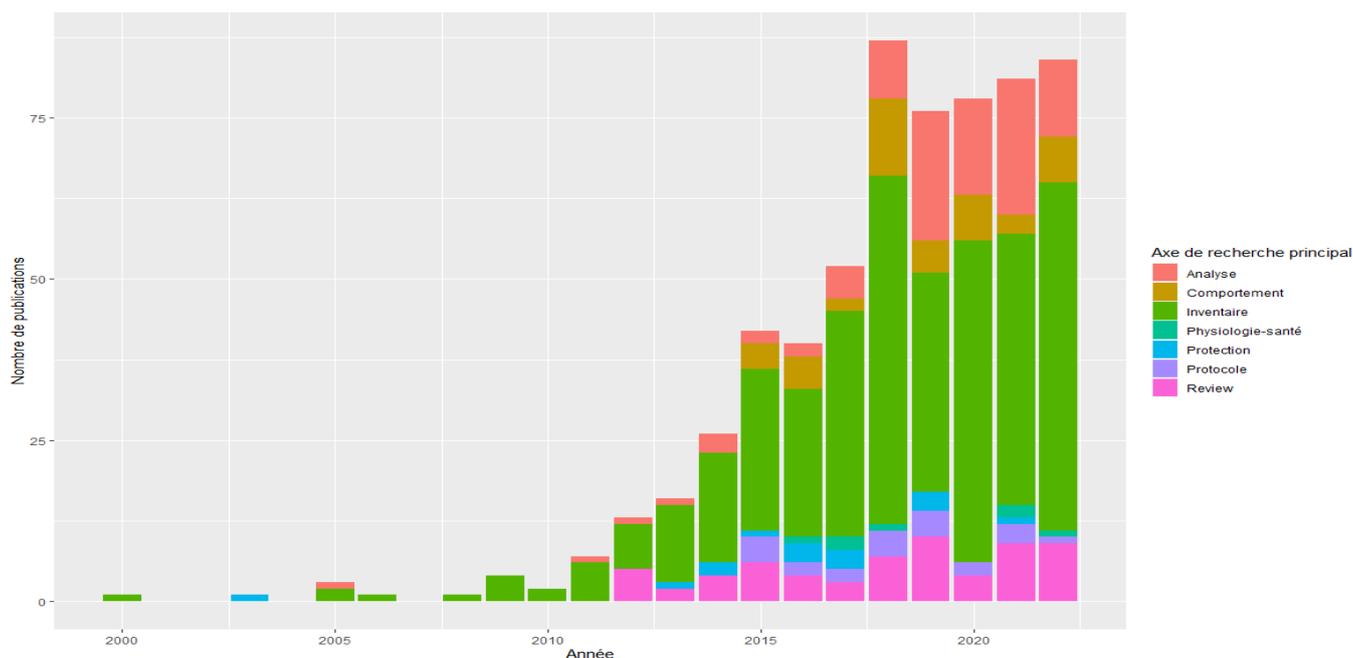


Figure 2 : Evolution du nombre d'articles publiés portant sur l'utilisation du drone (ou UAV) en biologie de la conservation d'après les 615 articles consultés, en fonction de leurs principaux axes de recherche.

Enfin, le développement récent des systèmes d'aéronef sans pilotes (UAS) (ou drones) a permis également d'examiner les processus et changements environnementaux qui se produisent aux niveaux spatiaux et temporels et qui seraient difficiles, voire impossibles, à détecter depuis des plateformes de télédétection (*Whitehead & Hugenholtz, 2014*).

C'est pourquoi nous observons un nombre croissant d'études au cours du temps, axées sur l'inventaire et la détection des différents taxons et compartiment des écosystèmes ou de review (*Fig. 2 & Fig. 3*). Nous notons néanmoins des variations dans la manière d'approcher le sujet au cours du temps. En effet, à partir de 2015, les axes de recherche se diversifient.

« Le traitement des images produites peut se montrer chronophage et minutieux, de ce fait les traitements automatisés permettent de s'affranchir de cette éventuelle limite. »

Plusieurs auteurs utilisent le drone dans le cadre d'études comportementales réalisées in natura (par exemple : *Evans et al., 2015*) ou s'intéressent au comportement des individus étudiés à l'approche du drone (par exemple *Pomeroy et al., 2015*) ; tandis que d'autres dressent des protocoles afin d'optimiser les détections et inventorier les différents compartiments selon les contextes environnementaux (par exemple : *Junda et al., 2015 ; Ratcliffe et al., 2015*).

Les études portant sur la santé des taxons ou leur physiologie sont publiées dès 2016 ; cependant elles restent pour le moment relativement rares (par exemple : *Christiansen et al., 2016 ; Pirota et al., 2017*). La diversité des sujets étudiés à l'aide du drone est très largement référencée dans plusieurs review récentes, telles que *Charbonneau & Lemaître (2021), Yang et al., (2022), Lyu et al., (2022), Nowak et al., (2018), Schad & Fischer (2022), ou encore Edney et al., (2023)*, ils ne seront donc pas détaillés dans le présent document.

C'est également lors de cette période charnière que nous observons une augmentation exponentielle d'études visant à optimiser ou automatiser l'analyse des images (par exemple : *Lhoest et al., 2015 ; Corcoran et al., 2020 ; Corregidor-Castro et al., 2022*). En effet, le traitement des images produites peut se montrer chronophage et minutieux, de ce fait les traitements automatisés permettent de s'affranchir de cette éventuelle limite, et le développement de processus d'analyses permet aux chercheurs de s'ouvrir à de nouvelles perspectives et de s'assurer de la précision et de la fiabilité des données recueillies.

De nombreuses review ont été rédigées (64 ont été présentement identifiées), permettant ainsi de suivre l'évolution de l'utilisation de cet outil technologique et de tenir informée la communauté scientifique ou opérationnelle des avancées et des possibilités qu'offre un tel outil. Afin de préserver la faune et garantir une bonne utilisation de cet outil, nous avons pu observer depuis 2016 la parution de « guidelines », et de réflexions éthiques (par exemple *Vas et al., 2015*). En raison de l'essor de l'utilisation du drone et de son accessibilité à un large public, ces lignes de conduite sont et vont devenir de plus en plus précieuses.

Ainsi, le drone a su faire ses preuves et semble être devenu un outil incontournable en biologie de la conservation. Néanmoins, la dynamique des publications sur le sujet laisse à penser que les recherches appliquant la technologie drone à la biologie de la conservation ne sont pas encore épuisées. L'apparition constante de nouvelles technologies (drones ou capteurs), et le développement d'algorithmes de type deep learning, continuent d'alimenter la recherche, nous permettent de transcender les limites, et de développer une expertise toujours plus précise.

Plusieurs auteurs utilisent le drone dans le cadre d'études comportementales réalisées in natura (par exemple : *Evans et al., 2015*) ou s'intéressent au comportement des individus étudiés à l'approche du drone (par exemple *Pomeroy et al., 2015*) ; tandis que d'autres dressent des protocoles afin d'optimiser les détections et inventorier les différents compartiments selon les contextes environnementaux (par exemple : *Junda et al., 2015 ; Ratcliffe et al., 2015*). Les études portant sur la santé des taxons ou leur physiologie sont publiées dès 2016 ; cependant elles restent pour le moment relativement rares (par exemple : *Christiansen et al., 2016 ; Pirota et al., 2017*). La diversité des sujets étudiés à l'aide du drone est très largement référencée dans plusieurs review récentes, telles que *Charbonneau & Lemaître (2021), Yang et al., (2022), Lyu et al., (2022), Nowak et al., (2018), Schad & Fischer (2022), ou encore Edney et al., (2023)*, ils ne seront donc pas détaillés dans le présent document.

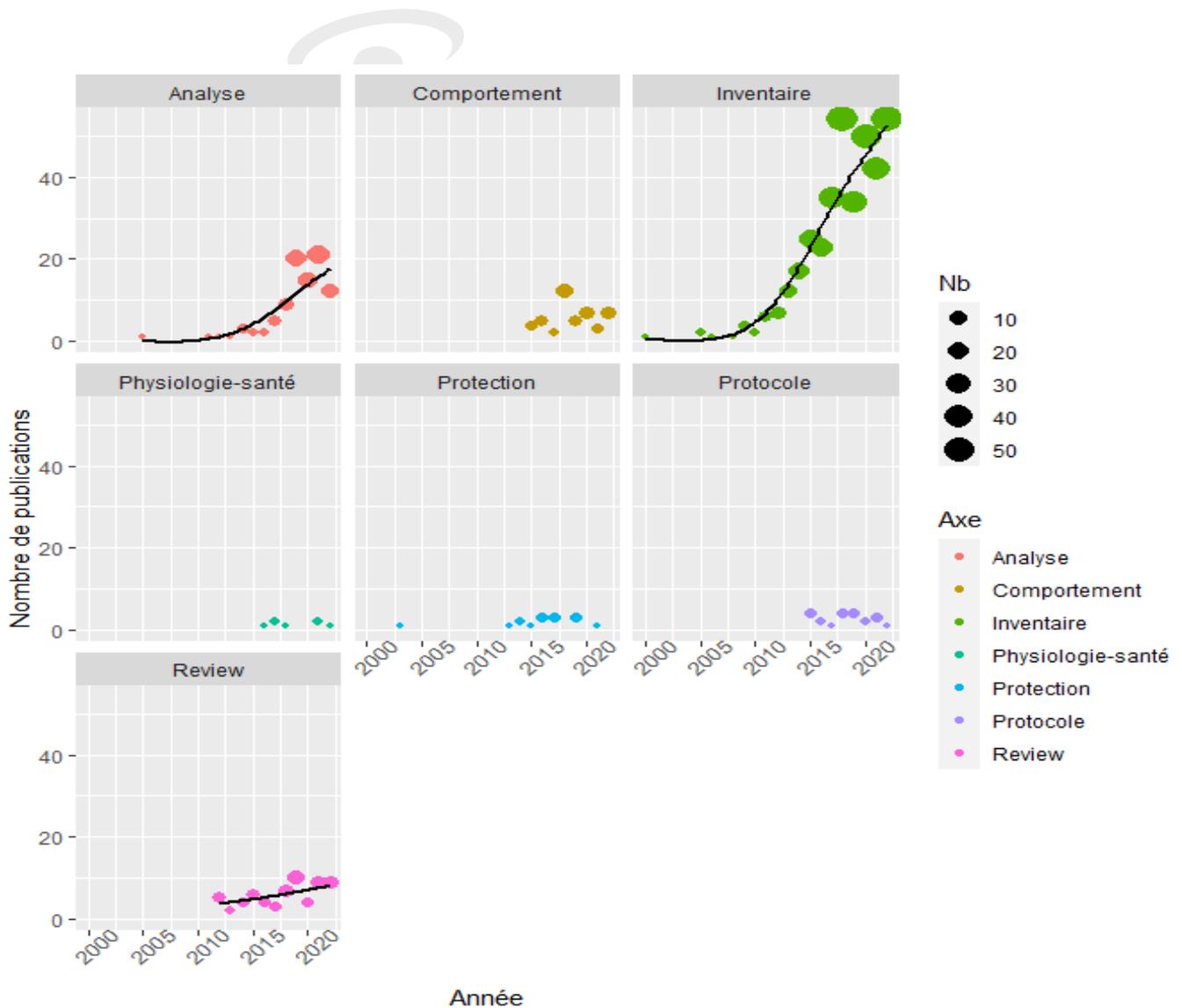


Figure 3 : Evolution du nombre de publications sur les 7 axes de recherche identifiés au cours des années.

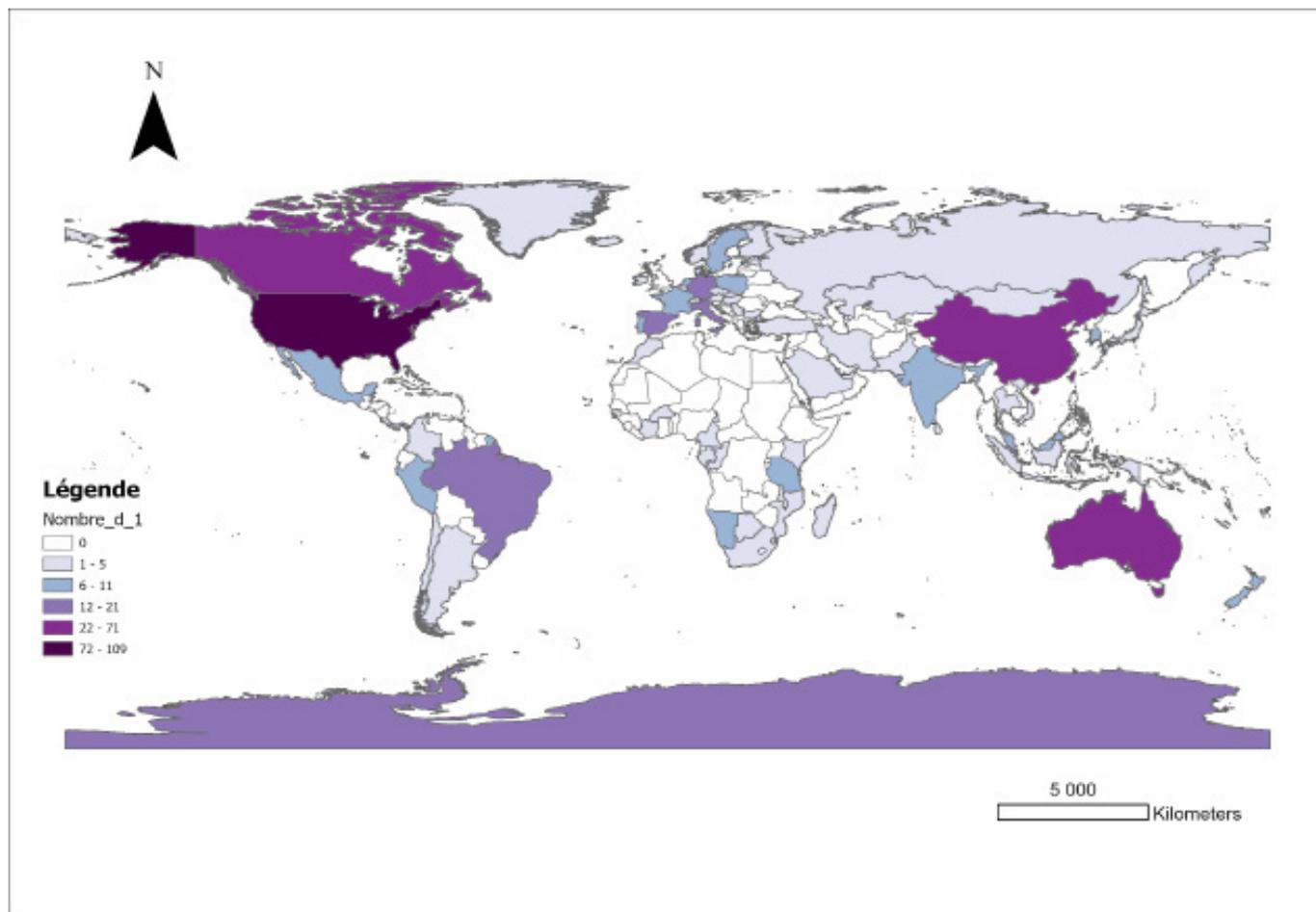
## ➤ B. Le drone appliqué à la biologie de la conservation, un outil uniformément étudié à travers le monde ?

Parmi les articles recensés, le drone a été utilisé dans 78 pays différents à travers les 6 continents, dans le cadre d'études écologiques ou portant sur la conservation des espèces et des écosystèmes. Son application est néanmoins répartie de façon hétérogène à travers le globe (Fig. 4). Une quantité importante d'études recensées (18 %) ont été réalisées aux USA (dont Alaska), ainsi qu'en Australie (12 %), au Canada (7 %) et en Chine (6,5 %).

D'après les articles recensés, le drone appliqué à la biologie de la conservation ne semble pas avoir été utilisé en Afrique centrale, ainsi que dans quelques pays d'Amérique du Sud (par exemple le Venezuela ou la Bolivie) et dans des pays du continent indonésien (par exemple, l'Afghanistan ou l'Ouzbékistan). En revanche, son application a été testée sur des pays en bordure de l'Arctique (comme le Groenland) et en Antarctique (3,4 % des études recensées).

L'ensemble des études réalisées sur le continent Européen représente 25 % des études recensées.

Cependant, seuls 27 pays sur les 51 présents au sein du continent européen ont fait l'objet d'au moins une étude utilisant le drone dans le cadre d'études écologiques (soit 53 % des pays). Parmi ces pays, l'Allemagne, l'Espagne ont vraisemblablement porté une attention particulière à cet outil. En revanche, encore assez peu d'études ont été réalisées en France (1,3 % des études recensées). Cependant, ces chiffres sont à prendre avec prudence car de nombreuses utilisations ne font pas systématiquement l'objet de publications, ou du moins de publications à comité de lecture.



**Figure 4 :** Carte représentant l'intensité du nombre d'études portant sur l'application du drone à la biologie de la conservation selon les pays à travers le monde.

## ➤ C. Le drone, un outil adapté à tous les biotopes ?

Les études référencées démontrent que cet outil peut être utilisé dans des contextes environnementaux très variés. Des études ont pu être ainsi menées dans un contexte polaire (par exemple : [Barnas et al., 2018](#)), de forêt tempérée ([Charron et al., 2020](#)), tropicale ([Koh et al., 2012](#)) ou aride (par exemple : [Baena et al., 2017](#)), de dunes (par exemple : [Duffy et al., 2018](#) ; [Cosella et al., 2020](#)), des milieux agricoles (par exemple : [Abd-Elrahman et al., 2005](#) ; [Berni et al., 2009](#)), des prairies, steppes ou des maquis (par exemple : [Valente et al., 2022](#) ; [Breckenridge et al., 2011](#) ; [Barasona et al., 2014](#) ; [Hanlon et al., 2017](#)), des milieux rivulaires ou zones humides (par exemple : [Afán et al., 2018](#) ; [Belcore et al., 2022](#)), de savane (par exemple : [Oldeland, et al 2017](#) ; [Aubert et al., 2021](#)), des habitats côtiers ou îlots (par exemple : [Andrew et al., 2017](#)) ou encore en mer (par exemple : [Arona et al., 2018](#) ; [Aoki et al., 2021](#))

De ce fait, le drone peut être utilisé sur une variété de substrats (sable, végétation, forêt, falaise, roche, eau ou océan, glace ou neige ...) et ce, dans une gamme importante de conditions thermiques ou hygrométriques.

Enfin, équipé de LiDAR<sup>1</sup> ou de capteurs adaptés, le drone peut également servir à mesurer les caractéristiques structurelles d'un territoire (Hughey et al., 2018 ; Tuia et al., 2022) et à mesurer les évolutions au cours du temps des différents habitats (Olsoy et al., 2018). Les images prises par drone associées à des modèles informatiques peuvent permettre d'étudier le déplacement des espèces en fonction de la structure de l'habitat via la reconstruction tridimensionnelles des différents habitats (Strandburg-Peshkin et al., 2017).

La capacité de cet outil à s'utiliser dans une grande diversité de contextes et d'habitats, même dans des conditions difficiles pour les humains, combinée avec l'évolution technologique, laisse à penser qu'il pourrait être à l'avenir utilisé à travers la mosaïque d'habitats présente à travers les 6 continents.

## ➤ D. Le drone, un outil adéquat pour étudier tous les compartiments des écosystèmes ?

Les études recensées ont été classées en 28 compartiments. Parmi eux nous avons identifié :

- 10 compartiments liés à la faune : faune (taxons mixtes), mammifère, avifaune, reptile, amphibien, poisson, insecte, mollusque, crustacé, récif coralien ;
- 8 compartiments liés à la flore : communauté végétale mixte, espèces de la strate herbacée, espèces de la strate arbustive, espèces de la strate arborescente ou de forêt, mangrove, liane, bryophyte, algue ;
- 2 autres compartiments particuliers : les espèces exotiques envahissantes, les bactéries ;
- 5 compartiments liés à un habitat : habitat terrestre, zone humide, habitat aquatique, dune, et habitat marin ;
- 2 compartiments liés à la géomorphologie : le sol et les sédiments ;
- 1 compartiment éco-géographique : les aires protégées.

Cette répartition met en évidence que les différents compartiments des écosystèmes semblent avoir fait l'objet d'au moins une étude entre 2000 et 2022.

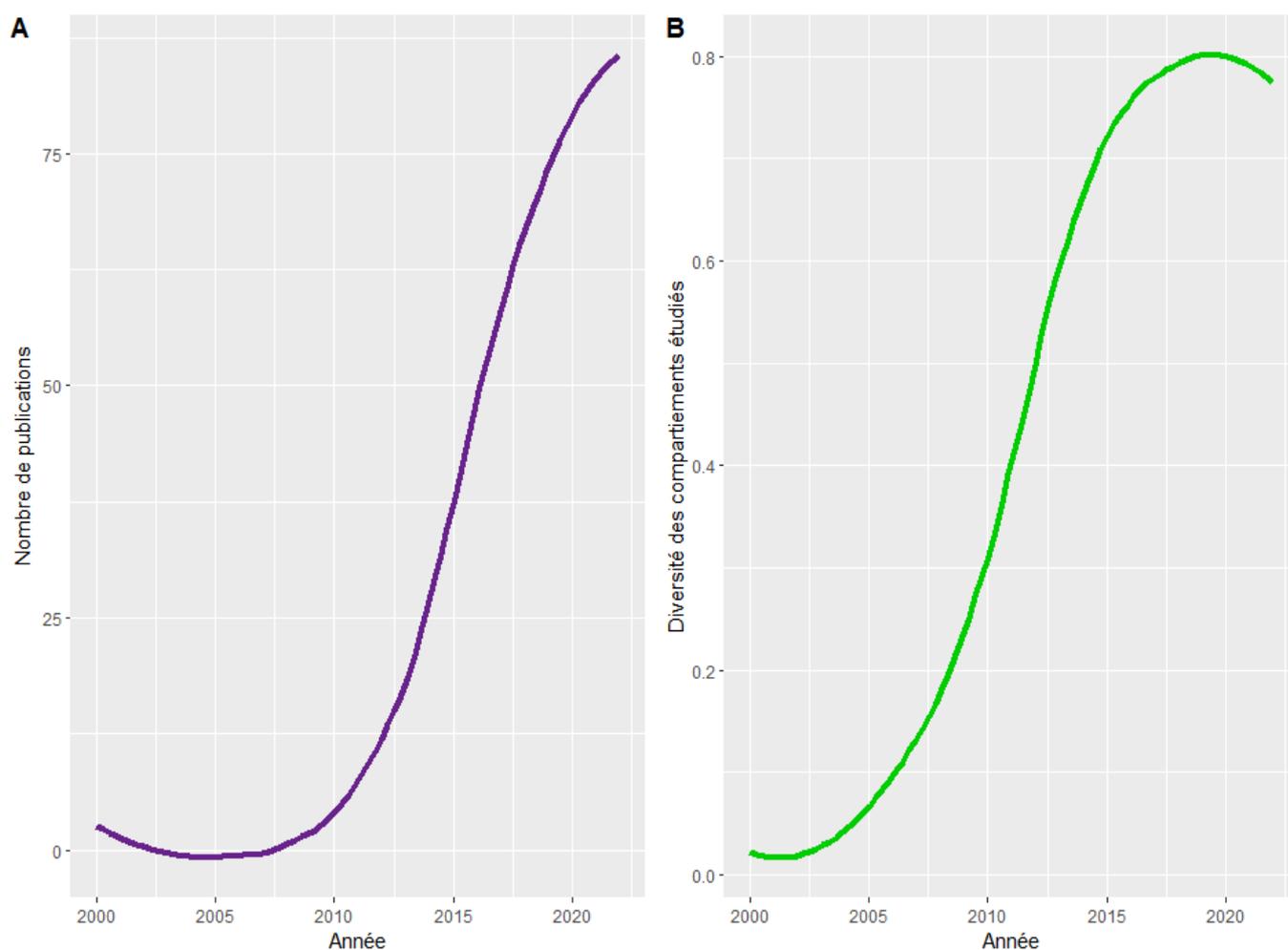
La croissance<sup>2</sup> rapide de cette diversité des compartiments étudiés au cours du temps (Fig. 5) démontre que les potentialités du drone pour répondre à des problématiques écologiques diverses ont rapidement été appréhendées et testées par les chercheurs. Néanmoins, à partir de 2018, la diversité étudiée atteint une forme de plateau. Ce plateau peut éventuellement signifier que les auteurs cherchent à davantage expérimenter au sein de compartiments préalablement identifiés, que de tester l'outil drone sur de nouveaux compartiments. L'objectif étant d'améliorer les processus de détection et d'automatisation du traitement de l'image sur des compartiments que l'on sait pouvoir étudier, ou d'étendre l'expérimentation à d'autres espèces ou d'autres contextes que préalablement testés.

1 LiDAR est un acronyme de l'expression anglaise de « light detection and ranging » ou « laser imagining detection and ranging ». Cette technique permet de déterminer la distance d'un objet via l'analyse des propriétés d'un faisceau de lumière (un laser) renvoyé vers son émetteur. Plus spécifiquement, la distance est donnée par la mesure du délai (aussi appelé « temps de vol ») entre l'émission d'une impulsion et la détection d'une impulsion réfléchie, connaissant la vitesse de la lumière.

2 A noter que la diversité des compartiments étudiée augmente avec le nombre de publications recensées par an (p-value= 4.275e-11, rho=0.96 ; Fig.3).

Notre analyse met en évidence que l'ensemble des compartiments ne sont pas étudiés uniformément. En effet, nous notons que le drone a été plus largement utilisé pour étudier la faune (55 %) et dans une moindre mesure la flore (26 %). Plus précisément, les compartiments les plus étudiés à l'aide du drone sont les mammifères (environ 28 % des articles ciblant un taxon ou un habitat particulier), l'avifaune (environ 16 %), la forêt et strate arborescente (environ 11%), la flore herbacée (environ 7,5 %), et enfin les habitats aquatiques (environ 4,5 %) (Fig. 6).

L'utilisation de drones dans le cadre d'études écologiques permet de recueillir de l'information sur l'abondance et la répartition des espèces, de documenter le comportement, l'état de santé des individus (Inoue et al., 2019 ; López & Mulero-Pázmány, 2019 ; Aoki et al 2021), la densité des strates arborées (Belcore & Latella, 2022), ou encore estimer la biomasse (Husson et al., 2014 ; Zhou et al., 2018). Le drone permet également d'étudier les habitats des espèces (13 % des études recensées, par exemple : Olsoy et al., 2018 ; Nuhličková et al., 2021), ainsi que la qualité et l'état écologique de ces derniers (Chabot et al., 2014). Enfin, 2 % des études analysées soulignent également que le drone est utilisé pour étudier et protéger les aires protégées (Bergenas et al., 2013 ; Penny et al., 2019).



**Figure 3 :** Evolution du nombre de publications (graphique A. en violet) et de la diversité des compartiments étudiés (graphique B. en vert) au cours du temps.

Le nombre d'études faisant référence à l'utilisation du drone pour identifier la présence ou suivre l'évolution des stations d'Espèces Exotiques Envahissantes (EEE) tend à augmenter au cours du temps, notamment à partir de 2017. Les EEE font partie des principales causes de l'érosion de la biodiversité et elles sont particulièrement difficiles à gérer lorsqu'elles sont bien implantées sur un territoire. Ainsi, l'utilisation du drone pourrait aider les gestionnaires à identifier de façon précoce des EEE, en parcourant de larges zones, des zones difficilement accessibles ou des zones de quiétude à l'aide du drone et adapter les mesures de gestion en conséquence (Sladonja, et al., 2022 ; Rowe et al., 2022).

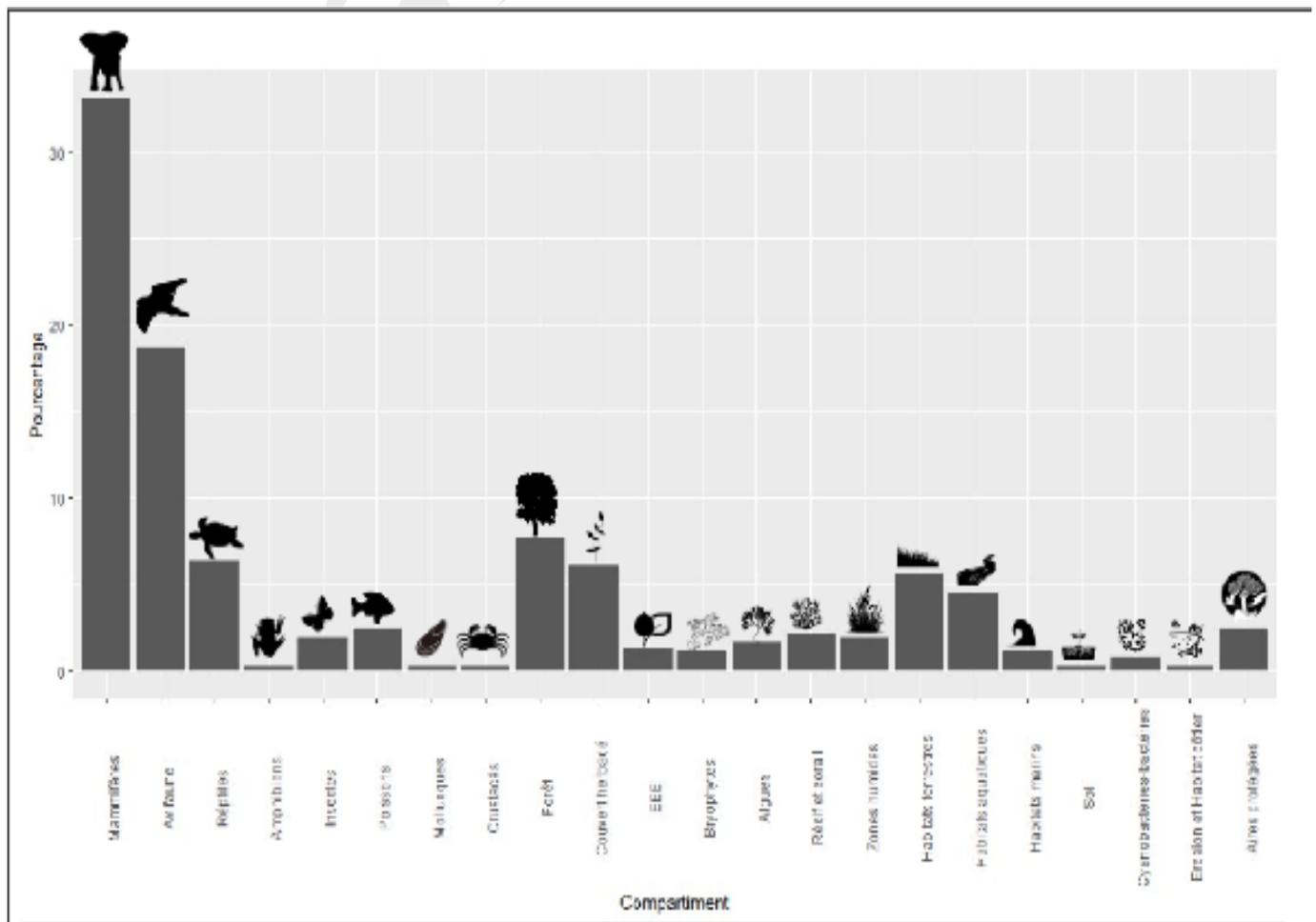


Figure 6 : Graphique en barre du pourcentage d'articles s'appuyant sur le drone pour étudier les différents compartiments des écosystèmes.

Enfin, nous mettons en évidence que les habitats continentaux restent pour le moment davantage étudiés à l'aide de drones que les habitats marins. Néanmoins, la [figure 7](#) met en évidence que, contrairement aux habitats terrestres, le nombre d'études sur les habitats marins ne cesse d'augmenter au cours du temps. Également, la dynamique de publication sur les oiseaux marins laisse à penser que le sujet est encore loin d'être épuisé. L'étude de taxons ou d'habitats marins demande de relever un nombre important de défis et peut se montrer plus complexe, notamment dans le développement d'algorithmes pour automatiser l'analyse des données ([Butcher et al., 2021](#) ; [Dujon & Schofield, 2019](#)).

Les progrès de la technologie de télédétection UAV et l'intégration inter-technologies ouvriront des opportunités innovantes pour explorer et comprendre ce qui reste inconnu sur l'océan ([Yang et al., 2022](#)). Nous nous attendons donc que les recherches portant sur la faune, la flore et les habitats marins à l'aide de drones se poursuivent.

L'analyse réalisée met ainsi en lumière que le drone peut être un allié de poids dans l'étude d'une grande diversité d'espèces ou de compartiments au sein des écosystèmes, en permettant l'accès à des connaissances sur les espèces ou les habitats qu'ils soient microscopiques ou de tailles importantes, présents dans des milieux dangereux, difficilement accessibles ou tropicaux, polaires ou tempérés, sur terre comme en mer. Également, le drone permet d'accéder à de nouvelles connaissances sur les bactéries et les microbiotes sans pratiquer de protocoles invasifs ou mortels pour l'espèce étudiée (exemple : [Aprill et al., 2017](#)). Les évolutions technologiques du drone et d'analyses permettent donc une recherche toujours plus fine et plus éthique.

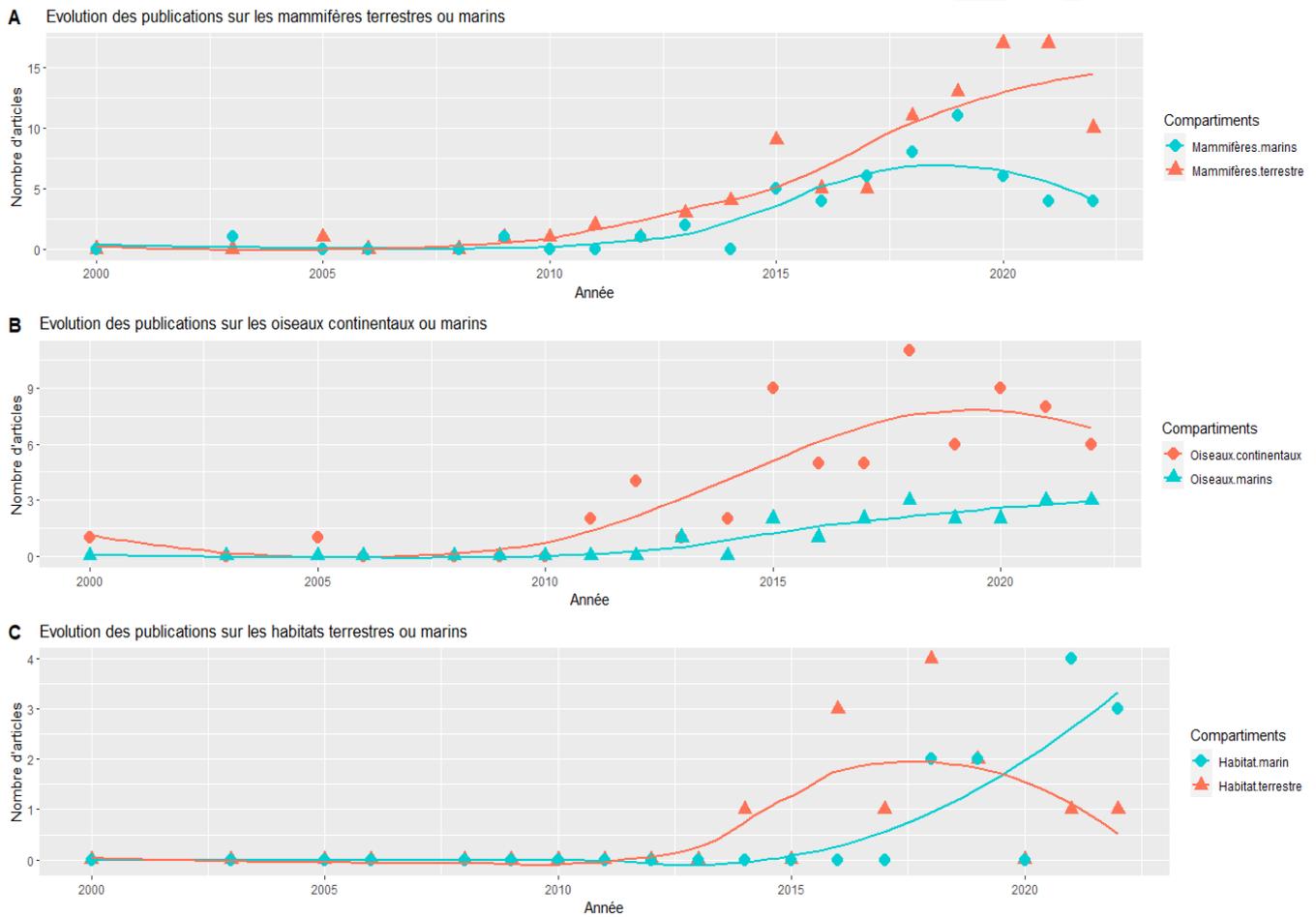


Figure 7 : Evolution du nombre de publications au cours du temps pour A) les mammifères, B) les oiseaux et C) les habitats marins (en bleu) ou terrestres (en rouge).

## ➤ E. Le drone, un outil sans faille ?

L'utilisation du drone en biologie de la conservation est devenue incontournable et complémentaire aux protocoles terrestres. En effet, bien que ces comparaisons avec les méthodes d'inventaires au sol plus traditionnels soient encore nécessaires, cet outil a fait ses preuves dans bon nombre d'études ([Santangeli et al., 2020](#) ; [Aota et al., 2021](#) ; [Howel et al., 2021](#) ; [Woolcok et al., 2022](#)). La détection et le comptage automatiques des espèces avec des drones ont le potentiel d'augmenter la précision des estimations de population à l'avenir ([Adams et al., 2020](#) ; [Chrétien et al., 2016](#) ; [Corcoran et al., 2020](#) ; [Corcoran et al., 2021](#) ; [Dujon et al., 2021](#) ; [Francis et al., 2020](#) ; [Gonzalez et al., 2016](#) ; [Gray et al., 2019](#) ; [Kellenberger et al., 2021](#) ; [Seymour et al., 2017](#)).

Cependant, plusieurs auteurs ont soulevé certains écueils auxquels ils ont été confrontés dans le cadre de leurs travaux, pouvant freiner la généralisation du drone en biologie de la conservation. La connaissance de ces écueils est primordiale ; elle permet de disposer des outils nécessaires pour faire les meilleurs choix de protocole et de matériels utilisés, et cela apporte un éclairage sur les défis futurs.



Les écueils discutés découlent des nombreux paramètres à prendre en compte dans les recherches appliquant l'outil drone à des fins de conservation ou dans les études écologiques. Ces derniers peuvent être divisés en deux catégories principales : (i) les objectifs des inventaires et du type de données collectées, (ii) et le contexte du site d'étude ([Butcher et al., 2021](#)). Les exigences de l'étude dicteront la configuration appropriée de l'équipement et les techniques d'analyse correspondantes. Le territoire (surface, habitat) et le temps de vol (durée de visualisation) influenceront considérablement le type de drone choisi.

## 1. Les exigences en matière d'inventaire et de collecte de données

### 1.a. Les limites matérielles

En comparaison avec les méthodes traditionnelles de collecte de données, les drones permettent, dans certaines conditions, de diminuer le temps de présence sur le terrain et de recueillir des informations spatialement explicites entre les animaux et leurs habitats ([Oleksyn et al., 2021](#)). Cependant, malgré sa constante évolution dans le temps, certains problèmes de taille restent à étudier et à résoudre pour que le drone puisse être un outil indispensable et le plus optimisé possible pour la conservation de la biodiversité.

#### *Une autonomie limitée :*

Une limite régulièrement identifiée est l'autonomie limitée de vol. En effet, la plupart des modèles disponibles dans le commerce ont une autonomie inférieure à 30 minutes, limitant ainsi la quantité de données pouvant être collectées lors de chaque vol ([Oleksyn et al., 2021](#) ; [Schad & Fischer, 2022](#)). En effet, il est rare qu'un seul vol soit suffisant pour collecter l'ensemble des données nécessaires à l'étude, ou pour couvrir la surface du territoire étudié.

Une des solutions proposées est de disposer de batteries supplémentaires ou de recharger les batteries directement sur le terrain. Cependant, cela nécessite d'avoir une source d'alimentation à proximité ou d'en disposer d'une portable. Si le temps de chargement de batterie est peu gênant pour des études de cartographie de l'habitat, elle peut en revanche entraîner des complications et des pertes de données pour des études comportementales avec des animaux mobiles ([Butcher et al., 2021](#)).

Le type de drone choisi pour récolter les données peut avoir une incidence directe sur son autonomie. En effet, les drones à voilure fixe sont généralement utilisés pour leur vitesse et leur efficacité énergétique. Ils peuvent avoir des durées de vol allant de 20 minutes à plusieurs heures, ils sont donc privilégiés pour les études à large échelle. Un de leurs inconvénients est qu'ils nécessitent généralement une assistance pour le décollage et une zone dégagée pour l'atterrissage. Les drones multirotors constituent une technologie plus récente qui présente certains avantages, mais ont des durées de vol plus courtes, généralement de 12 à 40 minutes ([Colefax, 2018](#)). Ce type de drones a notamment la capacité de décoller et d'atterrir verticalement, lui permettant d'être utilisé sur les plages et les navires ([Butcher et al., 2021](#)).

L'autonomie du drone peut être également variable selon la météo. En effet, les températures basses (autour ou inférieure à 0 °C), ou très élevées induisent une diminution significative de la durée de vol ([Calvo, 2017](#) ; [Charbonneau & Lemaitre, 2021](#)). Également, un drone équipé d'un capteur sophistiqué et lourd verra son autonomie énergétique diminuer ([Nowak et al., 2018](#)).

## Des vols à l'épreuve des conditions météorologiques :

Une limite fréquemment partagée par les auteurs est que la réalisation d'études nécessitant l'usage du drone est dépendante de la météo. Il a été démontré que la pluie augmente le risque de perte de contrôle du drone et que des vitesses de vent supérieures à 19 km/h réduisaient la stabilité des drones ou rendaient le vol impossible (Chrétien et al., 2015). Selon les drones, les températures froides peuvent être également réhivitoires (Charbonneau & Lemaitre, 2021).

Également, la qualité de la coquille peut être variable selon la position du soleil. Cela est particulièrement vrai pour les études en milieu aquatique ou marin, où le rayonnement du soleil reflété par l'eau peut réduire considérablement la qualité des données obtenues (Joyce et al., 2018).

Il est donc conseillé d'étudier l'angle d'approche ou l'orientation du drone et d'adopter la stratégie la plus adaptée pour produire des données de qualité en fonction de ce paramètre (Butcher et al., 2021).

À l'heure où nous écrivons cette première édition, les évolutions matérielles actuelles sont telles que les technologies développées pourraient permettre de pallier une majorité de ces limites.

## Drone, capteurs et qualité des données :

La conclusion et la réussite d'une étude sont conditionnées par les résultats obtenus et la qualité des données récoltées. Dans le cas d'étude prospective, il peut arriver que la qualité des données récoltées soit moins bonne qu'attendue. Cela peut être lié à un mauvais choix dans le matériel utilisé ou dans le manque de matériel adapté. Les évolutions technologiques permanentes pourront à l'avenir certainement répondre aux besoins des différentes espèces et contexte environnementaux. En attendant, le choix du drone et du capteur adapté est primordial.

Les drones multiroteurs tendent à être de plus en plus utilisés dans les études récentes. D'après les auteurs, ces derniers permettent une meilleure planification du vol, et peuvent être plus facilement manœuvrés dans des transects ou au sein de quadrillages rapprochés. Ils ont également la capacité de voler sur place, ce qui leur permet d'effectuer des études plus approfondies d'espèces difficilement visibles (Niethammer et al., 2012). Les drones multiroteurs peuvent également voler plus bas que les drones à voilure fixe, ce qui permet une résolution au sol plus élevée, dans un cas jusqu'à 0,01 cm par pixel (Hong et al., 2019), par rapport à une résolution au sol maximale de 2 cm par pixel en utilisant des drones à voilure fixe (Seymour et al., 2017). Ils sont également à privilégier dans le cas où l'étude demanderait des vols précis dans des espaces confinés et des tâches d'inspection rapprochée, dans des environnements escarpés ou recouverts de végétation (López & Mulero-Pázmány, 2019)

La précision des données relevées dépend principalement de la taille du capteur, la distance focale et la qualité de l'objectif. Certaines études nécessitent l'adoption de capteurs multispectraux et hyperspectraux pour une télédétection très fine.

« Le choix du drone et du capteur adapté est primordial. »

Les capteurs multispectraux comprennent à la fois des caméras RVB, des caméras infrarouges et multispectrales, et sont particulièrement adaptés pour l'agriculture de précision, la foresterie et un large éventail d'études sur la végétation (Toy et al., 2018). Les capteurs hyperspectraux collectent eux des informations dans plusieurs bandes du spectre électromagnétique qui permettent d'étudier différents paramètres biophysiques distincts (Adão et al., 2017) et les processus physiologiques des organismes (Parsons et al., 2018). Ces familles de capteurs nécessitent un étalonnage radiométrique pour tenir compte des conditions d'éclairage variables (Berra et al., 2017). Les instruments LiDAR sont des capteurs actifs relativement coûteux qui peuvent pénétrer dans la canopée et dériver des mesures forestières et des modèles de terrain tridimensionnels précis.

L'amélioration de la précision des données recueillies et de l'efficacité des inventaires pourraient être obtenues en équipant les drones non pas d'un seul capteur, mais de plusieurs (Lyu et al., 2022).

## 1.b. Les limites financières

Le principal avantage du drone réside dans son coût de fonctionnement beaucoup plus faible qu'un inventaire aérien traditionnel (Evans et al., 2015 ; Kudo et al., 2012 ; van Gemert et al., 2014 ; Wang et al., 2019), et même parfois qu'un inventaire au sol (Otero et al., 2018 ; Weissensteiner et al., 2015).

Cependant, le coût du matériel peut être une contrainte potentielle. En effet, en fonction de facteurs tels que les capteurs, la durée du vol et la durabilité, le prix du drone peut varier d'une centaine à plusieurs milliers d'euros (Piel et al., 2022). Par exemple, les capteurs hyperspectraux ou LiDAR sont encore relativement chers, ce qui limite dans une certaine mesure l'expansion des applications (Lyu et al., 2022). A cela s'ajoute le coût du logiciel d'analyse ainsi que la main-d'œuvre qualifiée dans le traitement des images (Buters et al., 2019). Néanmoins, la généralisation du drone à différents domaines, tel que le tourisme, permet aujourd'hui d'acheter des drones fiables à des prix abordables pour les chercheurs ou les gestionnaires (quelques centaines d'euros au lieu de quelques milliers) (Moudry et al., 2019 ; Piel et al., 2022). Cette généralisation s'est également traduite par l'apparition d'applications, de logiciels de traitement de données et d'une communauté en ligne qui participe à l'amélioration des logiciels et des drones (Gonzales et al., 2022).

## 1.c. Les limites éthiques et impacts sur la faune

Un des points positifs avancés de l'utilisation du drone est que cela permet au chercheur ou gestionnaire de rester éloigné de la faune et des habitats, limitant ainsi leur impact et leur empreinte. De plus, la petite taille des drones télépilotés leur permet d'accéder à des environnements difficiles, dangereux ou inaccessibles (Wallace et al., 2018) et d'inventorier des espèces sensibles (Hu et al., 2020) ou agressives de manière sécuritaire, notamment les ours blancs (*Ursus maritimus* ; Barnas et al., 2018a ; Chabot et al., 2019). Enfin, comparativement, aux inventaires par hélicoptère, les drones diminuent l'interférence auditive pour la faune (Erbe et al., 2017).

« Ainsi, pour une recherche éthique, il est nécessaire de trouver un compromis entre la qualité des données voulues, le matériel existant ou disponible et l'impact potentiel du drone sur les espèces étudiées. »

Cependant, à partir de 2015, des recherches sur le comportement de la faune à l'approche du drone ont démontré que celui-ci pouvait avoir un impact sur leur comportement ou induire des signes physiologiques de stress (Ditmer et al., 2015). Certains auteurs ont rapporté des effets perturbateurs des drones sur les oiseaux (Weissensteiner et al., 2015, Duriez et al., 2015 ; McEvoy et al., 2016 ; Lyons et al., 2018 ; Borelle & Fletcher, 2017), les reptiles (Bevan et al., 2018) et les mammifères

(Ditmer et al., 2015 ; Pomeroy et al., 2015 ; Ramos et al., 2018).

L'altitude de vol, la distance du drone à l'animal, la vitesse ou encore l'angle d'approche sont autant de facteurs pouvant occasionner des perturbations (Ramos et al., 2018 ; Weimerskirch et al., 2018 ; Fettermann et al., 2019 ; Rümmler et al., 2021 ; Schroeder & Panebianco, 2021).

Le bruit produit par le drone est également identifié comme pouvant perturber et altérer le comportement des animaux (Vas et al., 2015 ; Weimerskirch et al., 2018 ; Schroeder et al., 2020 ; Rümmler et al., 2021). Ce facteur tend à affecter davantage la faune terrestre que la faune marine car le bruit du drone tend à ne pas pénétrer profondément dans l'eau (Christiansen et al., 2016). Les colonies d'oiseaux avec des niveaux élevés de bruit de fond peuvent également montrer une plus grande tolérance au son des drones (Weimerskirch et al., 2018). Ainsi, pour une recherche éthique, il est nécessaire de trouver un compromis entre la qualité des données voulues, le matériel existant ou disponible et l'impact potentiel du drone sur les espèces étudiées.

En ce sens, les auteurs peuvent s'appuyer sur les travaux de [Duporge et al., \(2021\)](#) qui a développé une méthode pour calculer l'altitude minimale du drone basée sur l'audiogramme de l'espèce cible et le profil de bruit du drone à différentes hauteurs.

La silhouette et le comportement de vol des drones peuvent être une source potentielle de perturbation, notamment pour les espèces confrontées à la prédation aérienne ([Vas et al., 2015](#) ; [Barnas et al., 2018](#) ; [Bennitt et al., 2019](#) ; [Schroeder et al., 2020](#) ; [Rümmeler et al., 2020](#)).

Les différentes études menées sur ce sujet identifient une variation de l'intensité de la réponse entre les espèces, les populations et les individus. Par exemple, certains auteurs ont noté des réponses comportementales explicites aux drones chez certains singes, kangourous ou oiseaux, telles que des signaux vocaux uniques et des schémas de mouvement modifiés ([Ditmer et al., 2015](#) ; [Brisson-Curadeau et al., 2017](#) ; [Wegdell et al., 2019](#)). Tandis que les ours tendent à avoir des réponses comportementales limitées mais des réponses physiologiques significatives ([Ditmer et al., 2015](#)). Les différences entre les populations pourraient survenir en raison de la variation de la pression de prédation ou de l'étendue des perturbations anthropiques ([Ditmer et al., 2019](#) ; [Schroeder et al., 2020](#)). *Des différences interindividuelles ont été trouvées associées aux catégories d'âge et au statut reproducteur des individus* ([Brisson-Curadeau et al., 2017](#) ; [Pomeroy et al., 2015](#) ; [Weimerskirch et al., 2018](#)).

Afin de minimiser l'impact sur la faune sauvage, il est conseillé de consulter les lignes directrices produites au cours du temps (*par exemple* : [Junda et al., 2015](#) ; [Gonzalez et al., 2017](#)), avant l'écriture du protocole d'inventaire d'un projet incluant l'utilisation du drone. L'ensemble de ces études indique que pour mener une recherche éthique, l'observation par drone peut ne pas être toujours appropriée selon les espèces ; bien que dans la plupart des cas, le protocole de vol peut être adapté pour garantir une perturbation minimale.

Il s'agit notamment d'utiliser par exemple des drones de petites tailles qui vont générer moins de bruit lors de déplacements ou des capteurs suffisamment puissants pour capturer des données de qualité sans avoir à se rapprocher des individus des espèces présentes dans la zone.

Si certaines zones d'ombre persistent encore aujourd'hui, les limites observées pourraient ne plus exister demain en raison de l'évolution rapide de la technologie drone. A terme, les recherches menées pourront préciser selon les espèces et le contexte environnemental et paysager étudié, le type de drone et de capteur adéquat, ainsi que le protocole de mesure le plus éthique et efficace.

« Le protocole de vol peut être adapté pour garantir une perturbation minimale. »

## 1.d. Les limites associées au traitement des données

L'analyse des données constitue un défi important pour les recherches utilisant le drone en raison de la quantité de données collectées ([Oleksyn et al., 2021](#)). Malgré des preuves solides suggérant que les drones peuvent être utilisés pour inventorier et compter la faune sauvage avec plus d'exactitude et de précision que les humains ([Debell et al., 2013](#) ; [Hodgson et al., 2018](#)), le traitement des données peut se montrer très chronophage, complexe à mettre en place ou peut demander des compétences particulières en machine learning.

*Charbonneau & Lemaitre (2021)* identifient 2 grandes catégories de traitement de données :

- l'interprétation visuelle directe sur le terrain (visualisation des images et interprétation en direct),
- l'interprétation visuelle différée (visualisation d'images ou de vidéos au bureau) et le traitement numérique de l'information (p. ex. : traitement d'image et extraction d'information par l'intelligence artificielle).

La grande différence entre l'interprétation visuelle et le traitement numérique de l'information réside dans le potentiel de généralisation de ces méthodes de traitement par rapport aux approches d'interprétation.

Les premiers traitements numériques se faisaient manuellement. Ces derniers sont cependant très chronophages, et affectent durement le rapport coût-efficacité de la recherche sur les drones.

C'est pourquoi, ces dernières années, un nombre important de chercheurs se sont intéressés à automatiser la détection des espèces cibles, via le développement d'algorithmes d'apprentissage automatique. Ces algorithmes fonctionnent à partir d'images de spectre visible et de la vidéo thermique enregistrée lors de relevés aériens (*Kellenberger et al., 2017 ; Hollings et al., 2018 ; Eikelboom et al., 2019 ; Lyons et al., 2019 ; Corcoran et al., 2020*). Ces outils ajoutent à la fiabilité et à la reproductibilité des inventaires par drone et peuvent réduire le biais de l'observateur, raccourcir le temps d'analyse (*Schad & Fischer, 2022*).

« Le traitement des données peut se montrer très chronophage, complexe à mettre en place ou peut demander des compétences particulières en machine learning. »

Cependant, ces outils peuvent montrer certaines limites et ne peuvent pas être pour le moment déclinés pour l'ensemble des espèces et des contextes environnementaux (*Luy et al., 2022*). En effet, la classification d'images supervisée basée sur les pixels s'est révélée être adaptée pour détecter avec précision la faune sauvage d'une taille, d'une forme, d'une couleur et d'une température constantes dans des environnements homogènes dépourvus de végétation complexe (*Rush et al., 2018 ; Seymour et al., 2017*). Toutefois, la reconnaissance d'espèces présentant une plus grande variation phénotypique individuelle, qui sont présentes dans des habitats hétérogènes avec une structure de végétation ou qui a une résolution relativement basse est particulièrement complexe (*Chrétien et al., 2016 ; Afan et al., 2018 ; Corcoran et al., 2019 ; Schofield et al., 2019 ; Schad & Fischer, 2022*). Les impacts du couvert forestier et de la topographie sur la détection automatisée restent mal connus ; bien que quelques études suggèrent qu'il est possible de surmonter les défis présentés par des zones d'enquête plus complexes avec la combinaison appropriée de drone, de capteur et de méthode de détection (*Corcoran et al., 2019 ; Oishi et al., 2018*). (convolutional neuronal network) offrent néanmoins des perspectives intéressantes et pourraient parvenir à automatiser la reconnaissance et la classification des différentes espèces à l'avenir (*Corcoran, 2021*).

Les approches par CNN (Convolutional Neuronal Network) offrent néanmoins des perspectives intéressantes et pourraient parvenir à automatiser la reconnaissance et la classification des différentes espèces à l'avenir (*Corcoran, 2021*).

Cependant, ces programmes d'intelligence artificielle nécessitent des infrastructures informatiques adéquates, des procédures standardisées de vérification et une quantité non négligeable d'images de référence pour entraîner le modèle (*Charbonneau & Lemaitre, 2021*). Jusqu'à présent, un traitement automatisé a été réalisé pour les données basées sur des drones avec un relatif succès (*Hodgson et al., 2018 ; Vayssade et al., 2019 ; Redmon et al., 2017*) et fera probablement l'objet de développements ultérieurs, dans le but de diversifier les applications de ces algorithmes pour différents écosystèmes et espèces.

Outre la détection automatisée, la cartographie par drone, à l'aide de l'orthomosaïque, présente également encore des défis à surmonter. Le processus d'orthomosaïque permet de relier les images entre-elles par la reconnaissance des caractéristiques des chevauchements d'images (Colomina et al., 2014). Or, bien qu'efficace, cette méthode peut être complexe à utiliser dans certains habitats. Par exemple, ces caractéristiques permettant la reconnaissance d'un chevauchement, peuvent être difficiles à trouver dans les zones de forte turbidité, d'eau profonde ou sur des substrats uniformes tels que le sable.

## 2. Le contexte du site d'étude

### 2.a. Une efficacité en tout lieu et à tout moment ?

Les conditions spécifiques au site peuvent influencer la façon dont les chercheurs abordent l'utilisation des drones (Butcher et al., 2021).

Les conditions climatiques, les saisons ou encore d'ensoleillement peuvent avoir une incidence sur la détection. Par exemple, il peut être complexe de détecter les animaux avec une moindre différence par rapport à la température ambiante ou de détecter les animaux nocturnes (Kays et al., 2019). C'est pourquoi les relevés par imagerie infrarouge sont généralement réalisés pendant les saisons les plus froides de l'année et aux moments les plus froids de la journée. De cette manière, les chercheurs s'assurent d'avoir un contraste le plus élevé possible entre les signatures thermiques des animaux cibles et la température de leur environnement. (Corcoran et al., 2019 ; Lhoest et al., 2015 ; Longmore et al., 2017). Pour étudier des espèces nocturnes et insaisissables ou observer des animaux dans des habitats à faible contraste entre les individus et l'arrière-plan, les drones équipés de caméras infrarouges peuvent augmenter la probabilité de détection des individus (Burke et al., 2019).

Le paysage et la couverture végétale peuvent également avoir une incidence sur l'efficacité de cet outil. En effet, Witczuk et al., (2017) souligne qu'une canopée dense peut cacher les animaux à la vue du capteur. Également, Rey et al., (2017) met en avant que la topographie peut avoir une incidence sur la taille apparente des animaux sur les images, entraînant une difficulté supplémentaire pour les algorithmes de classer correctement les espèces.

En milieu marin, les inventaires par drone peuvent se révéler être un défi logistique lié aux conditions météorologiques défavorables, les embruns marins et à l'espace opérationnel restreint (Gray et al., 2022). Cela peut être également un défi méthodologique, en raison de la réflexion du soleil sur l'eau. Par conséquent, l'heure, l'ensoleillement, l'angle d'approche, le type de drone et de capteurs doivent être maîtrisés pour pouvoir produire des données de qualité (Colefax et al., 2019). Les ondulations à la surface de l'eau peuvent également provoquer une distorsion du substrat et diminuer le niveau de détail pouvant être extrait de l'imagerie. Les études par drones sont également souvent dépendantes de la clarté de l'eau, de la profondeur de l'eau, la marée et le courant (Butcher et al., 2021). En effet, généralement ces dernières s'intéressent principalement aux habitats situés à environ 5 m de profondeur, à moins que l'eau ne soit d'une clarté absolue (Oleksyn et al., 2021). La captation de détails peut être favorisée en faisant voler le drone près de la surface de l'eau, mais cela diminue la surface pouvant être couverte en un seul vol.

Des auteurs ont également signalé que l'inventaire par drone d'animaux mobiles pourrait surestimer leur nombre s'ils venaient à être compté deux fois (Chrétien et al., 2015, 2016 ; Kellenberger et al., 2019). Néanmoins, ce phénomène serait réduit en intégrant des mécanismes de suivi algorithmiques au sein des méthodes de reconnaissance ou de dénombrement automatisées (Corcoran, 2021).

Pour de nombreux taxons, une approche combinée d'imagerie thermique et du spectre visible à différents moments de la journée est possible et conseillée afin d'optimiser la probabilité de détection (Chrétien et al., 2016 ; Kays et al., 2019 ; McKellar et al., 2021).

## 2.b. La réglementation

L'utilisation du drone est très réglementée et cette réglementation peut varier d'un pays à un autre (Oleksyn et al., 2021 ; Butcher et al., 2021 ; yang et al., 2022). La variabilité de la réglementation et du type d'autorisation à demander selon les états peut constituer une barrière lorsque le territoire étudié est transfrontalier. Afin d'aider les chercheurs dans leur démarche, Oleksyn et al. (2021) propose de créer un système directeur qui aide les chercheurs à identifier les réglementations en vigueur et les permis nécessaires pour survoler tous les espaces aériens, afin de pallier cet obstacle.

Dans de nombreux pays, une formation ainsi qu'une licence de télépilote sont requises, ainsi que des connaissances sur la réglementation en vigueur pour faire voler un drone (Piel et al., 2022). Cela peut être perçu comme une contrainte, lorsque peu de personnes qualifiées sont disponibles aux périodes d'inventaire prévues (Gray et al., 2022).

De plus, il est généralement demandé au télépilote de pouvoir garder en visuel le drone à tout moment, ce qui pourrait empêcher les opérations de vol dans certains écosystèmes où des caractéristiques proéminentes obstruent le champ de vision (Robinson et al., 2022). Également, la distance entre le télépilote et son drone peut être réglementée. Cette distance réglementaire peut varier selon les pays et peut entraver les inventaires à réaliser sur de vastes territoires (Piel et al., 2022).

Les règles de vol peuvent différer également selon le territoire survolé. Par exemple, des autorisations spéciales peuvent être demandées dans le cadre de l'utilisation d'espaces aériens particuliers où plusieurs juridictions se chevauchent, comme les parcs nationaux, les bases militaires ou les aéroports (Duffy et al., 2018). En outre, certains espaces aériens peuvent être interdits, comme le survol de zones urbaines (Robinson et al., 2022).

« L'adoption croissante de législations limitant l'utilisation des drones sur les terres et l'espace aérien public et privé, pourrait devenir un obstacle important à l'utilisation des drones dans les études écologiques (Gonzales et al., 2022). »

Pour López et Mulero-Pázmány (2019), un cadre réglementaire restrictif arguant de problèmes de confidentialité et de sécurité limite actuellement les applications des drones dans le domaine de la conservation. Cela souligne la nécessité urgente de rechercher un consensus entre les pays et d'adapter la législation pour faire la distinction entre les finalités des loisirs, de la recherche et de la gestion.

## 2.c. Sécurité

Certains auteurs ont signifié quelques limites à l'utilisation du drone en conservation, en lien avec la sécurité du télépilote, d'autres aéronefs et des riverains.

Ces problèmes de sécurité peuvent être liés à des erreurs de pilotage pouvant survenir lors de longues sessions de pilotage manuel et provoquer la fatigue des télépilotes (Piel et al., 2022). Également, les pilotes inexpérimentés sont susceptibles d'être moins précis dans les commandes des drones et moins attentifs aux dangers, pouvant induire un risque pour les autres aéronefs entrant dans le même espace aérien et les personnes partageant cette zone (Gregory et al., 2012).

Enfin, une autre limite identifiée pouvant affecter la sécurité est le manque de couverture réseau. En effet, un flux vidéo limité peut affecter le contrôle et la sécurité du vol, ainsi que la qualité des images récoltées (pas de vérification possible en direct sur le terrain) (Maurya et al., 2022).

## 2.d. Social

L'utilisation d'un drone n'est pas accueillie favorablement par tous. Or, compte tenu de la dimension sociale des projets de conservation, il est important de considérer la perception et l'opinion publique afin de garantir l'accueil et le succès des projets (Robinson et al., 2022).

Certains auteurs émettent l'hypothèse que les pressions exercées sur les gouvernements pour la mise en œuvre de directives très restrictives sont alimentées par une perception publique largement négative des drones. Ces perceptions négatives seraient potentiellement liées à l'utilisation historique des drones dans un contexte militaire, et aux menaces qui pèsent sur la vie privée, la sécurité et le bien-être psychologique (Markowitz et al., 2017 ; Oleksyn et al., 2021). Le développement des drones et surtout leur démocratisation, a été accompagné d'une nouvelle forme de conflit : celui de l'utilisation de l'espace aérien.

Le droit d'utiliser l'espace aérien sur les terres privées et gouvernementales est devenu un débat prégnant, alors que les récents développements des drones, des capteurs et des logiciels de traitement ont révolutionné la capacité des chercheurs à approcher des sujets de conservation (Gonzales et al., 2022).

Cependant, les travaux menés par Markowitz et al., (2017) ont montré que l'utilisation du drone dans le cadre de mesures conservatoires, telle que la restauration des écosystèmes, pourrait être davantage soutenue par le grand public que lorsque celui-ci est utilisé à des fins commerciales, touristiques ou photographiques.

Afin de favoriser l'acceptation sociale de l'utilisation du drone à des fins scientifiques et de conservation, Oleksyn et al., (2021) préconisent d'améliorer la communication entre les instances locales, les chercheurs et le grand public. D'après eux, le contact direct avec les instances dirigeantes locales et une transparence totale concernant les méthodologies de recherche favoriseraient des relations positives entre les chercheurs utilisant des drones et les législateurs.

L'ensemble de ces obstacles identifiés ici n'est pas uniformément cité par les auteurs utilisant le drone à des fins de conservation ou sous couvert d'études écologiques. En effet, dans leurs travaux de synthèse, Walker et al., (2023) mettent en évidence que certains d'entre eux sont très régulièrement soulignés dans les articles. Les limites technologiques (incapacité des UAV à fonctionner par mauvais temps), les limites liées à l'analyse des données et aux aspects réglementaires sont très régulièrement identifiées. Tandis que d'autres sont en revanche, cités beaucoup plus rarement, telles que les limites sociologiques.

« Nous nous attendons à ce que ces obstacles évoluent au cours des prochaines années en raison du développement rapide de la technologie drone, des capteurs, et des améliorations en matière de batterie. Plus précisément, le développement de petits capteurs Lidar, hyperspectraux et thermiques bénéficiera à la conservation, tout comme les progrès des caméras RVB standard plus petites et de plus haute résolution. Les algorithmes d'apprentissage deviendront plus performants et sophistiqués, facilitant l'analyse des données et rendant l'outil encore plus accessible aux acteurs opérationnels. Également, nous pourrions nous attendre à de meilleurs systèmes de transmission, permettant aux acteurs ou aux rangers de s'adapter rapidement aux situations changeantes (Wich, 2021). »

## ➤ F. Le drone en France

Le premier article recensé faisant référence à l'utilisation du drone dans la recherche en France date de 2009 ([Dunford et al., 2009](#)). A partir de 2015, l'utilisation du drone pour le suivi de la biodiversité et des habitats est plus largement plébiscitée auprès des acteurs opérationnels impliqués dans la conservation et l'étude de l'environnement (associations, bureaux d'études, gestionnaires...).

L'utilisation du drone appliquée à l'écologie est promue à travers de nombreux articles dans des revues professionnelles (par exemple de l'*UPGE*) ou de vulgarisation (par exemple *Sciences et Avenir*), ou à travers des vidéos<sup>1</sup>. Son utilisation est également soutenue par le Ministère de l'Écologie, l'Énergie et des Territoires mer, qui publie sur ses canaux (par exemple sur *Dailymotion* : <https://www.dailymotion.com/video/x3dgovp>) des vidéos indiquant les domaines de recherche écologiques dans lesquels le drone peut être utile.

Dès lors, différentes structures ont développé leur expertise dans l'inventaire de la biodiversité par le ciel tel que la Tour du Valat, le Conservatoire des Espaces Naturels d'Occitanie, la LPO, Bretagne Vivante, Écosphère et Prodrone. Enfin, des plateformes techniques adossées à des laboratoires ont vu le jour à la fin des années 2010, telle que la plateforme D2T de l'université de Rennes.

De ce fait, de nombreuses études ont été menées sur le territoire sur une diversité d'habitats terrestres (par exemple : [Faye et al., 2016](#)), forestiers (par exemple : [Dunford et al., 2009](#)), ou aquatiques ([Wawrzyniak et al., 2013](#)), et une diversité de taxons, telles que les poacées (par exemple : [Proenca et al., 2019](#)), les moules ([Barbosa et al., 2022](#)) ou le flamant rose ([Vas et al., 2015](#)). Parmi les études menées sur l'avifaune, de nombreuses structures ont cherché à utiliser le drone pour surveiller et étudier les colonies d'oiseaux marins. Les travaux de ces structures seront détaillés dans le Chapitre 3 du présent document. Ils mettent notamment en évidence que l'utilisation du drone permet une réelle complémentarité aux suivis traditionnels réalisés au sol (le protocole traditionnel est développé dans le Chapitre 4), mais que certaines barrières doivent être encore franchies pour optimiser ces inventaires vus du ciel.

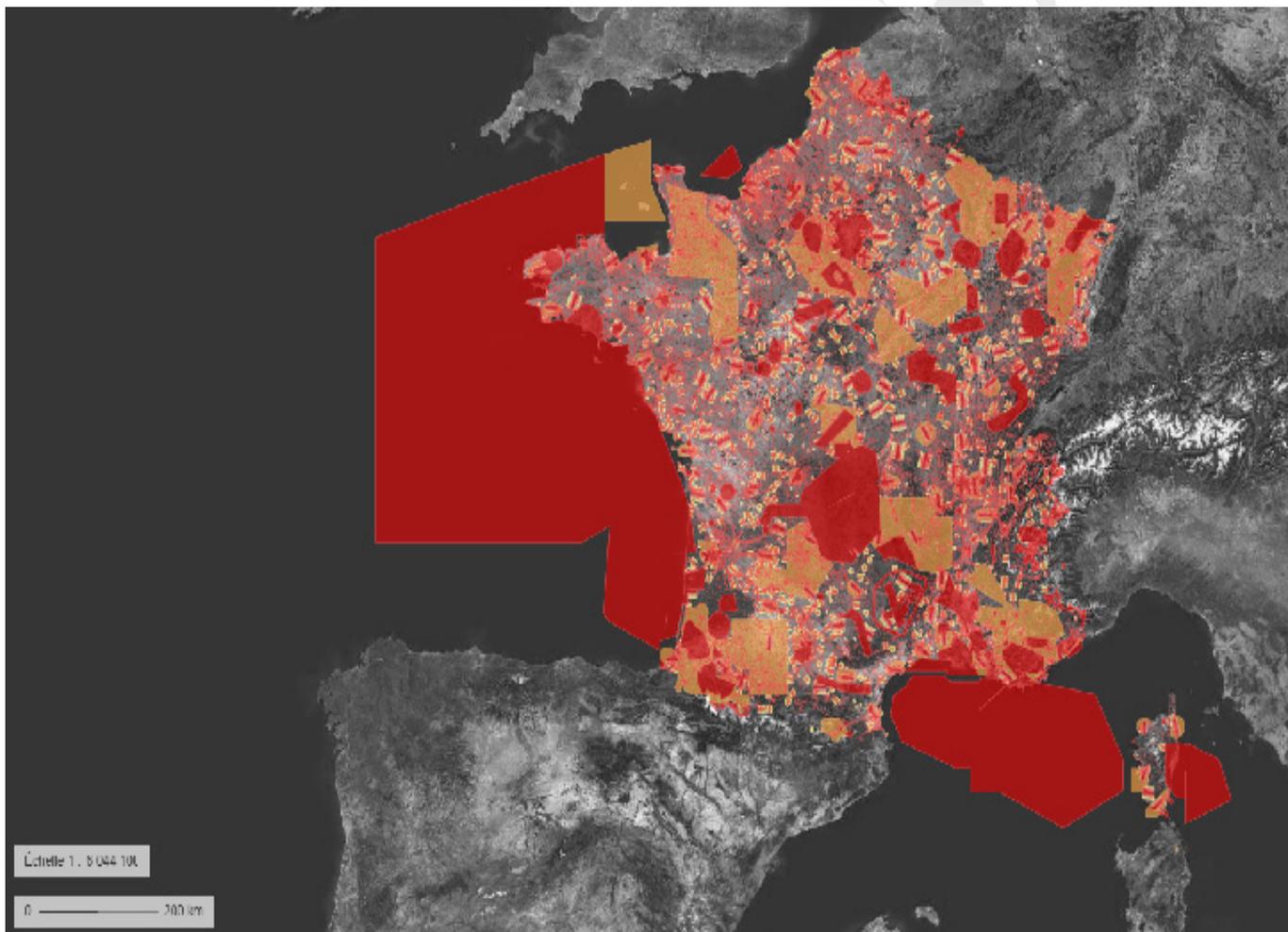
En France, l'utilisation du drone est strictement réglementée par la Direction générale de l'aviation civile (développée dans le Chapitre 2), comme le rappelle Mussier en 2019 dans la revue professionnels de la Nature 'Espace Naturels'. Néanmoins, l'utilisation croissante du drone pour des activités de loisirs en addition à la recherche et à l'inventaire peut occasionner un dérangement auprès des individus. Afin de limiter les impacts du drone, la DDTM 34<sup>2</sup> et la LPO<sup>3</sup> ont publié des règles de bonnes pratiques à destination des télépilotes.

En complément, certains sites abritant des zones de repos ou de reproduction sont soumis à un Arrêté Préfectoral de Protection de Biotope (APPB), réglementant les activités humaines, y compris l'utilisation du drone.

1 Exemples de vidéos : L'outil drone dans les études faunistiques, par Écosphère & Prodrone : <https://www.youtube.com/watch?v=A8ClbHQj0i0> ; Suivi de busard à l'aide de drone, par la LPO : <https://www.youtube.com/watch?v=BrgZyp6QVVM>

2 Lien vers les règles de bonnes conduites de la DDTM 34 : [https://www.herault.gouv.fr/content/download/40891/267147/file/engins%20volants%20et%20oiseaux\\_VF\\_22nov.pdf](https://www.herault.gouv.fr/content/download/40891/267147/file/engins%20volants%20et%20oiseaux_VF_22nov.pdf)

3 Lien vers les lignes directrices de la LPO : <https://www.lpo.fr/decouvrir-la-nature/conseils-biodiversite/conseil-biodiversite/accueillir-la-faune-sauvage/drone-et-derangement-de-la-faune-sauvage>



**Figure 8** : Carte des zones soumises à interdictions ou à restrictions pour l'usage, dans la catégorie Ouverte, ou par des associations d'aéromodélisme (en dehors des sites d'aéromodélisme publiés), d'aéronefs sans équipage à bord (drones ou aéromodèles), sur le territoire métropolitain. Le vol est interdit dans les zones rouge, le vol est permis uniquement à une hauteur maximale de 30 m au sein des zones rose et de 50 m dans les zones orange. Source : geoportail

Ainsi, l'utilisation du drone pour des études environnementales ou écologiques est bien implantée sur le territoire français, et employée par une diversité d'acteurs impliqués dans la recherche et/ou la conservation de la biodiversité et des écosystèmes. Afin de garantir la qualité des données et le non-dérangement des individus suivis, il serait intéressant de compléter les lignes directrices de la LPO par un cadre méthodologique et éthique selon les espèces étudiées.



## IV. Conclusion

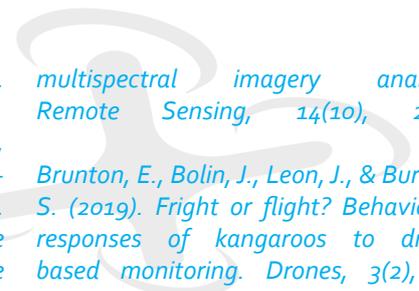
Depuis sa première utilisation en écologie et notamment en conservation, les recherches impliquant le drone comme outil ont permis d'étudier une multitude d'espèces, de compartiments ou d'habitats. En effet, à partir des années 2010, le drone est de plus en plus employé et testé afin d'acquérir ou d'approfondir des connaissances et une meilleure compréhension de l'écologie, la répartition, la dynamique de populations, le comportement ou encore la réponse des espèces face à une perturbation. Si la quantité de publications sur le sujet tend à ralentir depuis 2019, il reste en augmentation, avec un intérêt croissant pour les méthodes permettant d'automatiser le traitement des données. Également, ces dernières années, les chercheurs ont montré un intérêt grandissant de l'utilisation du drone pour l'étude du milieu marin et de ses composantes. La gamme croissante de modèles de drones permet aujourd'hui aux scientifiques d'adapter leur choix de drone et de capteurs embarqués aux besoins spécifiques de leur étude, aux espèces ciblées ou aux conditions paysagères ou météorologiques dans lesquelles le drone doit être utilisé ([Anderson & Gaston, 2013](#) ; [Linchant et al., 2015](#)). Les obstacles identifiés, tels que les limites matériels, d'outils de traitement automatisé des données ou éthiques pourront être franchis à l'aide des évolutions matérielles et algorithmiques rapides. Également, la parution de lignes de conduite et de protocoles identifiant les actions ou le matériel à éviter selon la sensibilité de l'espèce étudiée, permettra aux chercheurs et acteurs de limiter le plus possible les éventuels impacts sur la faune. Qu'ils soient équipés de capteurs spécifiques ou non, qu'ils pratiquent des vols stationnaires ou des transects, les drones ont su s'imposer et sont vite devenus incontournables dans la recherche en conservation.



## V. Références

- Abd-Elrahman, A., Pearlstine, L., & Percival, F. (2005). Development of pattern recognition algorithm for automatic bird detection from unmanned aerial vehicle imagery. *Surveying and Land Information Science*, 65(1), 37.
- Adão, T., Hruška, J., Pádua, L., Bessa, J., Peres, E., Morais, R., & Sousa, J. J. (2017). Hyperspectral imaging: A review on UAV-based sensors, data processing and applications for agriculture and forestry. *Remote sensing*, 9(11), 1110.
- Afán, I., Máñez, M., & Díaz-Delgado, R. (2018). Drone monitoring of breeding waterbird populations: the case of the glossy ibis. *Drones*, 2(4), 42.
- Al-Najjar, H. A., Kalantar, B., Pradhan, B., Saeidi, V., Halin, A. A., Ueda, N., & Mansor, S. (2019). Land cover classification from fused DSM and UAV images using convolutional neural networks. *Remote Sensing*, 11(12), 1461.
- Ammour, N., Alhichri, H., Bazi, Y., Benjdira, B., Alajlan, N., & Zuair, M. (2017). Deep learning approach for car detection in UAV imagery. *Remote Sensing*, 9(4), 312.
- Ancin-Murguzur, F. J., Munoz, L., Monz, C., & Hausner, V. H. (2020). Drones as a tool to monitor human impacts and vegetation changes in parks and protected areas. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 6(1), 105-113.
- Anderson, K., & Gaston, K. J. (2013). Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(3), 138-146.
- Andrew, M.E. & Shephard, J.M. (2017). Semi-automated detection of eagle nests: An application of very high-resolution image data and advanced image analyses to wildlife surveys. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 3 (2), 66-80.
- Aoki, K., Isojunno, S., Bellot, C., Iwata, T., Kershaw, J., Akiyama, Y., ... & Miller, P. J. (2021). Aerial photogrammetry and tag-derived tissue density reveal patterns of lipid-store body condition of humpback whales on their feeding grounds. *Proceedings of the Royal Society B*, 288(1943), 20202307.
- Aota, T., Ashizawa, K., Mori, H., Toda, M., & Chiba, S. (2021). Detection of *Anolis carolinensis* using drone images and a deep neural network: an effective tool for controlling invasive species. *Biological Invasions*, 23, 1321-1327.
- Aprill, A., Miller, C. A., Moore, M. J., Durban, J. W., Fearnbach, H., & Barrett-Lennard, L. G. (2017). Extensive core microbiome in drone-captured whale blow support sa framework for health monitoring. *MSystems*, 2(5), 10-1128.
- Arona, L., Dale, J., Heaslip, S.G., Hammill, M.O., & Johnston, D.W. (2018). Assessing the disturbance potential of small unoccupied aircraft systems (UAS) on gray seals (*Halichoerus grypus*) at breeding colonies in Nova Scotia, Canada. *PeerJ*, 6 : e4467.
- Aubert, C., Le Moguédec, G., Assio, C., Blatrix, R., Ahizi, M. N. D., Hedegbetan, G. C., ... & Shirley, M. H. (2021). Evaluation of the use of drones to monitor a diverse crocodylian assemblage in West Africa. *Wildlife Research*, 49(1), 11-23.
- Baena, S., Boyd, D. S., & Moat, J. (2018). UAVs in pursuit of plant conservation-Real world experiences. *Ecological informatics*, 47, 2-9.
- Baena, S., Moat, J., Whaley, O., & Boyd, D. S. (2017). Identifying species from the air: UAVs and the very high-resolution challenge for plant conservation. *PLoS one*, 12(11), e0188714.
- Balestrieri, E., Daponte, P., De Vito, L., & Lamonaca, F. (2021). Sensors and measurements for unmanned systems: An overview. *Sensors*, 21(4), 1518.
- Banerjee, B. P., Sharma, V., Spangenberg, G., & Kant, S. (2021). Machine learning regression analysis for estimation of crop emergence using multispectral UAV imagery. *Remote Sensing*, 13(15), 2918.
- Barasona, J. A., Mulero-Pázmány, M., Acevedo, P., Negro, J. J., Torres, M. J., Gortázar, C., & Vicente, J. (2014). Unmanned aircraft systems for studying spatial abundance of ungulates: relevance to spatial epidemiology. *PLoS one*, 9(12), e115608.
- Barbedo, J. G. A., Koenigkan, L. V., Santos, T. T., & Santos, P. M. (2019). A study on the detection of cattle in UAV images using deep learning. *Sensors*, 19(24), 5436..
- Barbosa, R. V., Jaud, M., Bacher, C., Kerjean, Y., Jean, F., Ammann, J., & Thomas, Y. (2022). High-resolution drone images show that the distribution of mussels depends on microhabitat features of intertidal rocky shores. *Remote Sensing*, 14(21), 5441.
- Barnas, A. F., Chabot, D., Hodgson, A. J., Johnston, D. W., Bird, D. M., & Ellis-Felege, S. N. (2020). A standardized protocol for reporting methods when using drones for wildlife research. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 8(2), 89-98.
- Barnas, A. F., Darby, B. J., Vandeberg, G. S., Rockwell, R. F., & Ellis-Felege, S. N. (2019). A comparison of drone imagery and ground-based methods for estimating the extent of habitat destruction by lesser snow geese (*Anser caerulescens caerulescens*) in La Pérouse Bay. *PLoS One*, 14(8), e0217049.
- Barnas, A. F., Felege, C. J., Rockwell, R. F., & Ellis-Felege, S. N. (2018a). A pilot (less) study on the use of an unmanned aircraft system for studying polar bears (*Ursus maritimus*). *Polar Biology*, 41(5), 1055-1062.
- Barnas, A. F., Felege, C. J., Rockwell, R. F., & Ellis-Felege, S. N. (2018a). A pilot (less) study on the use of an unmanned aircraft system for studying polar bears (*Ursus maritimus*). *Polar Biology*, 41(5), 1055-1062.

- Barnas, A., Newman, R., Felege, C. J., Corcoran, M. P., Hervey, S. D., Stechmann, T. J., ... & Ellis-Felege, S. N. (2018b). Evaluating behavioral responses of nesting lesser snow geese to unmanned aircraft surveys. *Ecology and evolution*, 8(2), 1328-1338.
- Barr, J. R., Green, M. C., DeMaso, S. J., & Hardy, T. B. (2018). Detectability and visibility biases associated with using a consumer-grade unmanned aircraft to survey nesting colonial waterbirds. *Journal of Field Ornithology*, 89(3), 242-257.
- Barr, J. R., Green, M. C., DeMaso, S. J., & Hardy, T. B. (2020). Drone surveys do not increase colony-wide flight behaviour at waterbird nesting sites, but sensitivity varies among species. *Scientific reports*, 10(1), 3781.
- Barreto, J., Cajaíba, L., Teixeira, J. B., Nascimento, L., Giacomo, A., Barcelos, N., ... & Martins, A. (2021). Drone-monitoring: improving the detectability of threatened marine megafauna. *Drones* 5, 1-15.
- Barros, C., Suassuna, L., & Leuzinger, M. D. (2019). The Use of Drones as a Tool for Biodiversity Conservation in Brazil. *Braz. J. Int'l L.*, 16, 141.
- Baxter, P. W., & Hamilton, G. (2018). Learning to fly: integrating spatial ecology with unmanned aerial vehicle surveys. *Ecosphere*, 9(4), e02194.
- Bayram, H., Doddapaneni, K., Stefas, N., & Isler, V. (2016, August). Active localization of VHF collared animals with aerial robots. In *2016 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)* (pp. 934-939). IEEE.
- Beaver, J. T., Baldwin, R. W., Messinger, M., Newbolt, C. H., Ditchkoff, S. S., & Silman, M. R. (2020). Evaluating the use of drones equipped with thermal sensors as an effective method for estimating wildlife. *Wildlife Society Bulletin*, 44(2), 434-443.
- Beck, J. L., Booth, D. T., & Kennedy, C. L. (2014). Assessing greater sage-grouse breeding habitat with aerial and ground imagery. *Rangeland Ecology & Management*, 67(3), 328-332.
- Belcore, E., & Latella, M. (2022). Riparian ecosystems mapping at fine scale: a density approach based on multi-temporal UAV photogrammetric point clouds. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 8(5), 644-655.
- Belmonte, A., Sankey, T., Biederman, J. A., Bradford, J., Goetz, S. J., Kolb, T., & Woolley, T. (2020). UAV-derived estimates of forest structure to inform ponderosa pine forest restoration. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 6(2), 181-197.
- Benavides, M. T., Fodrie, F. J., & Johnston, D. W. (2019). Shark detection probability from aerial drone surveys within a temperate estuary. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 8(1), 44-56.
- Beniaich, A., Silva, M. L., Guimarães, D. V., Avalos, F. A., Terra, F. S., Menezes, M. D., ... & Cândido, B. M. (2022). UAV-based vegetation monitoring for assessing the impact of soil loss in olive orchards in Brazil. *Geoderma Regional*, 30, e00543.
- Bennitt, E., Bartlam-Brooks, H. L., Hubel, T. Y., & Wilson, A. M. (2019). Terrestrial mammalian wildlife responses to Unmanned Aerial Systems approaches. *Scientific reports*, 9(1), 2142.
- Bergenas, J., Stohl, R., & Georgieff, A. (2013). The other side of drones: saving wildlife in Africa and managing global crime. *conflict trends*, 2013(3), 3-9.
- Berni, J. A., Zarco-Tejada, P. J., Suárez, L., & Fereres, E. (2009). Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle. *IEEE Transactions on geoscience and Remote Sensing*, 47(3), 722-738.
- Berra, E. F., Gaulton, R., & Barr, S. (2017). Commercial off-the-shelf digital cameras on unmanned aerial vehicles for multitemporal monitoring of vegetation reflectance and NDVI. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 55(9), 4878-4886.
- Bevan, E., Whiting, S., Tucker, T., Guinea, M., Raith, A., & Douglas, R. (2018). Measuring behavioral responses of sea turtles, saltwater crocodiles, and crested terns to drone disturbance to define ethical operating thresholds. *PLoS One*, 13(3), e0194460.
- Bevan, E., Wibbels, T., Najera, B. M., Martinez, M. A., Martinez, L. A., Martinez, F. I., ... & Burchfield, P. M. (2015). Unmanned aerial vehicles (UAVs) for monitoring sea turtles in near-shore waters. *Marine Turtle Newsletter*, 145(1), 19-22.
- Bevan, E., Wibbels, T., Navarro, E., Rosas, M., Najera, B. M., Sarti, L. A., ... & Burchfield, P. (2016). Using unmanned aerial vehicle (UAV) technology for locating, identifying, and monitoring courtship and mating behavior in the green turtle (*Chelonia mydas*). *Herpetol. Rev.*, 47(1), 27-32.
- Bhardwaj, A., Sam, L., Martín-Torres, F. J., & Kumar, R. (2016). UAVs as remote sensing platform in glaciology: Present applications and future prospects. *Remote sensing of environment*, 175, 196-204.
- Bibby, C. J., Burgess, N. D., Hill, D. A., & Mustoe, S. H. (2000). *Bird census techniques*. 2e édition. Academic Press, New York, 302 p.
- Bird, C. N., Dawn, A. H., Dale, J., & Johnston, D. W. (2020). A semi-automated method for estimating Adélie penguin colony abundance from a fusion of multispectral and thermal imagery collected with unoccupied aircraft systems. *Remote Sensing*, 12(22), 3692.
- Birdsong, T. W., Bean, M., Grabowski, T. B., Hardy, T. B., Heard, T., Holdstock, D., ... & Clark, L. (2015). Application and utility of a low-cost unmanned aerial system to manage and conserve aquatic resources in four Texas rivers. *Journal of the Southeastern Association of Fish and Wildlife Agencies*, 2, 80-85.
- Biserkov, V. Y., & Lukanov, S. P. (2017). Unmanned aerial vehicles (UAVs) for surveying freshwater turtle populations: Methodology adjustment. *Acta zoologica bulgarica*, 10, 161-163.
- Blandin, P. (2009). De la protection de la nature au pilotage de la biodiversité. *Editions Quae*, 124 p.



- Bloom, D., Butcher, P. A., Colefax, A. P., Provost, E. J., Cullis, B. R., & Kelaher, B. P. (2019). Drones detect illegal and derelict crab traps in a shallow water estuary. *Fisheries Management and Ecology*, 26(4), 311-318.
- Bogolin, A. P., Davis, D. R., Kline, R. J., & Rahman, A. F. (2021). A drone-based survey for large, basking freshwater turtle species. *PloS one*, 16(10), e0257720.
- Bollard, B., Doshi, A., Gilbert, N., Poirot, C., & Gillman, L. (2022). Drone technology for monitoring protected areas in remote and fragile environments. *Drones*, 6(2), 42.
- Bollard-Breen, B., Brooks, J. D., Jones, M. R., Robertson, J., Betschart, S., Kung, O., ... & Pointing, S. B. (2015). Application of an unmanned aerial vehicle in spatial mapping of terrestrial biology and human disturbance in the McMurdo Dry Valleys, East Antarctica. *Polar biology*, 38, 573-578.
- Bonnin, N., Van Andel, A. C., Kerby, J. T., Piel, A. K., Pinteá, L., & Wich, S. A. (2018). Assessment of chimpanzee nest detectability in drone-acquired images. *Drones*, 2(2), 17.
- Boon, M. A., Greenfield, R., & Tesfamichael, S. (2016). Wetland assessment using unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 41, 781-788.
- Borowicz, A., McDowall, P., Youngflesh, C., Sayre-McCord, T., Clucas, G., Herman, R., ... & Lynch, H. J. (2018). Multi-modal survey of Adélie penguin mega-colonies reveals the Danger Islands as a seabird hotspot. *Scientific reports*, 8(1), 1-9.
- Borrelle, S. B., & Fletcher, A. T. (2017). Will drones reduce investigator disturbance to surface-nesting seabirds? *Marine Ornithology*, 45, 89-94.
- Boyd, C., Hobbs, R. C., Punt, A. E., Shelden, K. E., Sims, C. L., & Wade, P. R. (2019). Bayesian estimation of group sizes for a coastal cetacean using aerial survey data. *Marine Mammal Science*, 35(4), 1322-1346.
- Brack, I. V., Kindel, A., Berto, D. O., Cordeiro, J. L., Coelho, I. P., Lahoz-Monfort, J. J., & de Oliveira, L. F. (2023). Spatial variation on the abundance of a threatened South American large herbivore using spatiotemporally replicated drone surveys. *Biodiversity and Conservation*, 32(4), 1291-1308.
- Brack, I. V., Kindel, A., Berto, D. O., Cordeiro, J. L., Coelho, I. P., Lahoz-Monfort, J. J., & de Oliveira, L. F. (2023). Spatial variation on the abundance of a threatened South American large herbivore using spatiotemporally replicated drone surveys. *Biodiversity and Conservation*, 32(4), 1291-1308.
- Brack, I. V., Kindel, A., & Oliveira, L. F. B. (2018). Detection errors in wildlife abundance estimates from Unmanned Aerial Systems (UAS) surveys: Synthesis, solutions, and challenges. *Methods in Ecology and Evolution*, 9(8), 1864-1873.
- Breckenridge, R. P., Dakins, M., Bunting, S., Harbour, J. L., & White, S. (2011). Comparison of unmanned aerial vehicle platforms for assessing vegetation cover in sagebrush steppe ecosystems. *Rangeland Ecology & Management*, 64(5), 521-532.
- Brinkhoff, J., Hornbuckle, J., & Barton, J. L. (2018). Assessment of aquatic weed in irrigation channels using UAV and satellite imagery. *Water*, 10(11), 1497.
- Brisson-Curadeau, É., Bird, D., Burke, C., Fijfield, D. A., Pace, P., Sherley, R. B., & Elliott, K. H. (2017). Seabird species vary in behavioural response to drone census. *Scientific reports*, 7(1), 17884.
- Bröker, K. C., Hansen, R. G., Leonard, K. E., Koski, W. R., & Heide-Jørgensen, M. P. (2019). A comparison of image and observer based aerial surveys of narwhal. *Marine Mammal Science*, 35(4), 1253-1279.
- Brooks, C., Grimm, A., Marcarelli, A. M., Marion, N. P., Shuchman, R., & Sayers, M. (2022). Classification of Eurasian watermilfoil (*Myriophyllum spicatum*) using drone-enabled multispectral imagery analysis. *Remote Sensing*, 14(10), 2336.
- Brunton, E., Bolin, J., Leon, J., & Burnett, S. (2019). Fright or flight? Behavioural responses of kangaroos to drone-based monitoring. *Drones*, 3(2), 41.
- Bucher, S., Kitts, C., Neumann, M. A., & Tritchler, J. M. (2019). UAV Image Processing Algorithms for Analyzing Reforestation Efforts in Tanzania. In 2019 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC) (pp. 1-4). IEEE.
- Longmore, S. (2019). Optimizing observing strategies for monitoring animals using drone-mounted thermal infrared cameras. *International Journal of Remote Sensing*, 40(2), 439-467.
- Brooke, S., Graham, D., Jacobs, T., Littnan, C., Manuel, M., & O'Conner, R. (2015). Testing marine conservation applications of unmanned aerial systems (UAS) in a remote marine protected area. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 3(4), 237-251.
- Burke, C., Rashman, M. F., Longmore, S. N., McAree, O., Glover-Kapfer, P., Ancrenaz, M., & Wich, S. A. (2019). Successful observation of orangutans in the wild with thermal-equipped drones. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 7(3), 235-257.
- Bushaw, J. (2020). Applications of unmanned aerial vehicles for conducting mesocarnivore and breeding waterfowl surveys in Southern Manitoba. *Mémoire de maîtrise LSU, Valley City State University*, 61 p.
- Bushaw, J. D., Ringelman, K. M., & Rohwer, F. C. (2019). Applications of unmanned aerial vehicles to survey mesocarnivores. *Drones*, 3(1), 28.
- Bushaw, J. D., Ringelman, K. M., Johnson, M. K., Rohrer, T., & Rohwer, F. C. (2020). Applications of an unmanned aerial vehicle and thermal-imaging camera to study ducks nesting over water. *Journal of Field Ornithology*, 91(4), 409-420.
- Butcher, P. A., Colefax, A. P., Gorkin III, R. A., Kajjura, S. M., López, N. A., Mourier, J., ... & Raoult, V. (2021). The drone revolution of shark science: A review. *Drones*, 5(1), 8.

- Buters, T., Belton, D., & Cross, A. (2019). Seed and seedling detection using unmanned aerial vehicles and automated image classification in the monitoring of ecological recovery. *Drones*, 3(3), 53. [advances, 1\(5\), e1400253.](#)
- Calvo, K., (2017). Drones for conservation—Field guide for photographers, researchers, conservationists, and archaeologists. *Drones for conservation. org.* 89 p.
- Canal, D., & Negro, J. J. (2018). Use of drones for research and conservation of birds of prey. *Birds of Prey: Biology and conservation in the XXI century*, 325-337.
- Casella, E., Collin, A., Harris, D., Ferse, S., Bejarano, S., Parravicini, V., ... & Rovere, A. (2017). Mapping coral reefs using consumer-grade drones and structure from motion photogrammetry techniques. *Coral Reefs*, 36, 269-275.
- Casella, E., Drechsel, J., Winter, C., Benninghoff, M., & Rovere, A. (2020). Accuracy of sand beach topography surveying by drones and photogrammetry. *Geo-Marine Letters*, 40, 255-268.
- Casetta, E., & Delord, J. (2018). *La biodiversité en question : enjeux philosophiques, éthiques et scientifiques.* Éditions Matériologiques.
- Castelblanco-Martínez, D. N., Blanco-Parra, M. P., Charruau, P., Prezas, B., Zamora-Vilchis, I., & Niño-Torres, C. A. (2019). Detecting, counting and following the giants of the sea: a review of monitoring methods for aquatic megavertebrates in the Caribbean. *Wildlife Research*, 46(7), 545-556.
- Castellanos-Galindo, G. A., Casella, E., Mejía-Rentería, J. C., & Rovere, A. (2019). Habitat mapping of remote coasts: Evaluating the usefulness of lightweight unmanned aerial vehicles for conservation and monitoring. *Biological Conservation*, 239, 108282.
- Ceballos, G., Ehrlich, P. R., Barnosky, A. D., García, A., Pringle, R. M., & Palmer, T. M. (2015). Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction. *Science*
- Chabot, D., & Francis, C. M. (2016). Computer-automated bird detection and counts in high-resolution aerial images: a review. *Journal of Field Ornithology*, 87(4), 343-359.
- Chabot, D., & Bird, D. M. (2012). Evaluation of an off-the-shelf unmanned aircraft system for surveying flocks of geese. *Waterbirds*, 35(1), 170-174.
- Chabot, D., & Bird, D. M. (2013). Small unmanned aircraft: precise and convenient new tools for surveying wetlands. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 1(01), 15-24.
- Chabot, D., & Bird, D. M. (2015). Wildlife research and management methods in the 21st century: Where do unmanned aircraft fit in? *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 3(4), 137-155.
- Chabot, D., (2009). Systematic evaluation of a stock unmanned aerial vehicle (UAV) system for small-scale wildlife survey applications. *Mémoire de maîtrise, Department of Natural Resource Sciences, McGill University, Montréal*, 79 p. + annexes
- Chabot, D., Dillon, C., Shemrock, A., Weissflog, N., & Sager, E. P. (2018). An object-based image analysis workflow for monitoring shallow-water aquatic vegetation in multispectral drone imagery. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(8), 294.
- Chabot, D., Stapleton, S., & Francis, C. M. (2019). Measuring the spectral signature of polar bears from a drone to improve their detection from space. *Biological Conservation*, 237, 125-132.
- Chabot, D., Craik, S. R., & Bird, D. M. (2015). Population census of a large common tern colony with a small unmanned aircraft. *PloS one*, 10(4), e0122588.
- Chabot, D., Carignan, V., & Bird, D. M. (2014). Measuring habitat quality for least bitterns in a created wetland with use of a small unmanned aircraft. *Wetlands*, 34, 527-533.
- Chalmers, C., Fergus, P., Wich, S., & Montanez, A. C. (2019). Conservation AI: Live stream analysis for the detection of endangered species using convolutional neural networks and drone technology. *arXiv preprint arXiv:1910.07360.*
- Charbonneau, P., & Lemaître, J. (2021). *Revue des applications et de l'utilité des drones en conservation de la faune. Le Naturaliste canadien*, 145(2), 3-34.
- Charron, G., Robichaud-Courteau, T., La Vigne, H., Weintraub, S., Hill, A., Justice, D., ... & Lussier Desbiens, A. (2020). The DeLeaves: a UAV device for efficient tree canopy sampling. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 8(3), 245-264.
- Cheek, B. D., Grabowski, T. B., Bean, P. T., Groeschel, J. R., & Magnelia, S. J. (2016). Evaluating habitat associations of a fish assemblage at multiple spatial scales in a minimally disturbed stream using low-cost remote sensing. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 26(1), 20-34.
- Chen, J., Yi, S., Qin, Y., & Wang, X. (2016). Improving estimates of fractional vegetation cover based on UAV in alpine grassland on the Qinghai-Tibetan Plateau. *International Journal of Remote Sensing*, 37(8), 1922-1936.
- Chib, R. S. (2021). *Drones for conservation: integrating UAVs with field methods to classify satellite imagery to map plant communities—A case study of Drentsche AA, The Netherlands.* Master's thesis, University of Twente.
- Chirayath, V., & Earle, S. A. (2016). Drones that see through waves—preliminary results from airborne fluid lensing for centimetre-scale aquatic conservation. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 26, 237-250.
- Chisholm, R. A., Cui, J., Lum, S. K., & Chen, B. M. (2013). UAV LiDAR for below-canopy forest surveys. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 1(01), 61-68.

- Choi, S. Y., Kim, H. J., Seo, M. H., & Soh, H. Y. (2021). Density estimation of *Nemopilema nomurai* (Scyphozoa, Rhizostomeae) using a drone. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 49, 1727-1732.
- Chouhan, A., Shivaraj, S., Chutia, D., & Raju, P. L. N. (2019). Comparison of tree canopy extraction using Object Based Image Analysis and Deep Learning Technique in UAV images. In 2019 International Conference on Intelligent Computing and Remote Sensing (ICICRS) (pp. 1-5). IEEE.
- Chrétien, L.P., (2016). Détection et dénombrement de la moyenne et grande faune par imagerie visible et infrarouge thermique acquise à l'aide d'un aéronef sans pilote (ASP). Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Faculté des lettres et sciences humaines, Département de géomatique appliquée, Sherbrooke, 143 p. + annexes. Disponible en ligne à: <http://hdl.handle.net/11143/8598>.
- Chrétien, L. P., Théau, J., & Menard, P. (2015). Wildlife multispecies remote sensing using visible and thermal infrared imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40, 241-248.
- Chrétien, L. P., Théau, J., & Ménard, P. (2016). Visible and thermal infrared remote sensing for the detection of white-tailed deer using an unmanned aerial system. *Wildlife Society Bulletin*, 40(1), 181-191.
- Christiansen, F., Dujon, A. M., Sprogis, K. R., Arnould, J. P., & Bejder, L. (2016). Noninvasive unmanned aerial vehicle provides estimates of the energetic cost of reproduction in humpback whales. *Ecosphere*, 7(10), e01468.
- Christiansen, F., Vivier, F., Charlton, C., Ward, R., Amerson, A., Burnell, S., & Bejder, L. (2018). Maternal body size and condition determine calf growth rates in southern right whales. *Marine Ecology Progress Series*, 592, 267-281.
- Christiansen, F., Rojano-Doñate, L., Madsen, P. T., & Bejder, L. (2016). Noise levels of multi-rotor unmanned aerial vehicles with implications for potential underwater impacts on marine mammals. *Frontiers in Marine Science*, 3, 277.
- Christiansen, P., Steen, K. A., Jørgensen, R. N., & Karstoft, H. (2014). Automated detection and recognition of wildlife using thermal cameras. *Sensors*, 14(8), 13778-13793.
- Christie, J. E., MacKenzie, D. I., Greene, T. C., & Sim, J. L. (2015). Using passive detection devices to monitor occupancy of ship rats (*Rattus rattus*) in New Zealand temperate rainforest. *New Zealand Journal of Ecology*, 39(1), 79-86.
- Christie, K. S., Gilbert, S. L., Brown, C. L., Hatfield, M., & Hanson, L. (2016). Unmanned aircraft systems in wildlife research: current and future applications of a transformative technology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 14(5), 241-251.
- Chung, M., Detweiler, C., Hamilton, M., Higgins, J., Ore, J. P., & Thompson, S. (2015). Obtaining the thermal structure of lakes from the air. *Water*, 7(11), 6467-6482.
- Cleguer, C., Kelly, N., Tyne, J., Wieser, M., Peel, D., & Hodgson, A. (2021). A novel method for using small unoccupied aerial vehicles to survey wildlife species and model their density distribution. *Frontiers in Marine Science*, 8, 640338.
- Cliff, O. M., Saunders, D. L., & Fitch, R. (2018). Robotic ecology: Tracking small dynamic animals with an autonomous aerial vehicle. *Science Robotics*, 3(23), eaat8409.
- Cliff, O. M., Fitch, R., Sukkarieh, S., Saunders, D. L., & Heinsohn, R. (2015). Online localization of radio-tagged wildlife with an autonomous aerial robot system. In *Robotics: Science and Systems*.
- Colefax, A. P., Kelaher, B. P., Pagendam, D. E., & Butcher, P. A. (2020). Assessing white shark (*Carcharodon carcharias*) behavior along coastal beaches for conservation-focused shark mitigation. *Frontiers in Marine Science*, 268.
- Colefax, A. P., Butcher, P. A., & Kelaher, B. P. (2018). The potential for unmanned aerial vehicles (UAVs) to conduct marine fauna surveys in place of manned aircraft. *ICES Journal of Marine Science*, 75(1), 1-8.
- Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 92, 79-97.
- Corcoran, E., Denman, S., & Hamilton, G. (2021). Evaluating new technology for biodiversity monitoring: Are drone surveys biased? *Ecology and evolution*, 11(11), 6649-6656.
- Corcoran, E., Winsen, M., Sudholz, A., & Hamilton, G. (2021). Automated detection of wildlife using drones: Synthesis, opportunities and constraints. *Methods in Ecology and Evolution*, 12(6), 1103-1114.
- Corcoran, E., Denman, S., & Hamilton, G. (2020). New technologies in the mix: Assessing N-mixture models for abundance estimation using automated detection data from drone surveys. *Ecology and evolution*, 10(15), 8176-8185.
- Correa Martins, J. A., Marcato Junior, J., Pätzig, M., Sant'Ana, D. A., Pistori, H., Liesenberg, V., & Eltner, A. (2023). Identifying plant species in kettle holes using UAV images and deep learning techniques. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 9(1), 1-16.
- Corregidor-Castro, A., & Valle, R. G. (2022). Semi-automated counts on drone imagery of breeding seabirds using free accessible software. *Ardea*, 110(1), 89-97.
- Corregidor-Castro, A., Holm, T. E., & Bregnballe, T. (2021). Counting breeding gulls with unmanned aerial vehicles: camera quality and flying height affects precision of a semi-automatic counting method. *Ornis Fennica*, 98(1), 33-45.
- Craven, D., Winter, M., Hotzel, K., Gaikwad, J., Eisenhauer, N., Hohmuth, M., ... & Wirth, C. (2019). Evolution of interdisciplinarity in biodiversity science. *Ecology and Evolution*, 9(12), 6744-6755.

- Crutsinger, G.M., J. Short et R. Sollenberger, (2016). The future of UAVs in ecology: An insider perspective from the Silicon Valley drone industry. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 4: 1161-1168.
- Cruzan, M. B., Weinstein, B. G., Grasty, M. R., Kohn, B. F., Hendrickson, E. C., Arredondo, T. M., & Thompson, P. G. (2016). Small unmanned aerial vehicles (micro-UAVs, drones) in plant ecology. *Applications in plant sciences*, 4(9), 1600041.
- Csillik, O., Cherbini, J., Johnson, R., Lyons, A., & Kelly, M. (2018). Identification of citrus trees from unmanned aerial vehicle imagery using convolutional neural networks. *Drones*, 2(4), 39.
- Cuevas, E., Putman, N. F., Uribe-Martínez, A., López-Castro, M. C., Guzmán-Hernández, V., Gallegos-Fernández, S. A., ... & Silver, J. (2020). First spatial distribution analysis of male sea turtles in the southern Gulf of Mexico. *Frontiers in Marine Science*, 7, 561846.
- D'hont, B., Calders, K., Bartholomeus, H., Whiteside, T., Bartolo, R., Levick, S., ... & Verbeeck, H. (2021). Characterising termite mounds in a tropical savanna with UAV laser scanning. *Remote Sensing*, 13(3), 476.
- D'Oleire-Oltmanns, S., Marzolf, I., Peter, K. D., & Ries, J. B. (2012). Unmanned aerial vehicle (UAV) for monitoring soil erosion in Morocco. *Remote Sensing*, 4(11), 3390-3416.
- Dandois, J. P., Olano, M., & Ellis, E. C. (2015). Optimal altitude, overlap, and weather conditions for computer vision UAV estimates of forest structure. *Remote sensing*, 7(10), 13895-13920.
- Daniels, K., (2018). Inferences about the conservation utility of using unmanned aerial vehicles to conduct rapid assessments for basking freshwater turtles. *Mémoire de maîtrise soumis à la Faculty of Environmental Science, University of Tennessee, Chattanooga, Tennessee, É.-U.*, 40 p. + annexes
- Das, N., Padhy, N., Dey, N., Mukherjee, A., & Maiti, A. (2022). Building of an edge enabled drone network ecosystem for bird species identification. *Ecological Informatics*, 68, 101540.
- DeBell, L., Anderson, K., Brazier, R. E., King, N., & Jones, L. (2015). Water resource management at catchment scales using lightweight UAVs: Current capabilities and future perspectives. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 4(1), 7-30.
- De Kock, M. E., Pohůnek, V., & Hejčmanová, P. (2022). Semi-automated detection of ungulates using UAV imagery and reflective spectrometry. *Journal of Environmental Management*, 320, 115807.
- DeLima, R. L., Boogaard, F. C., & Sazonov, V. (2022). Assessing the influence of floating constructions on water quality and ecology. In *WCFS2020: Proceedings of the Second World Conference on Floating Solutions*, Rotterdam (pp. 397-406). Springer Singapore.
- de Melo, F. R. (2021). Drones for conservation: new techniques to monitor muriquis. *Oryx*, 55(2), 171-171.
- Delord, K., Roudaut, G., Guinet, C., Barbraud, C., Bertrand, S., & Weimerskirch, H. (2015). Kite aerial photography: a low-cost method for monitoring seabird colonies. *Journal of Field Ornithology*, 86(2), 173-179.
- Delplanque, A., Foucher, S., Lejeune, P., Linchant, J., & Théau, J. (2022). Multispecies detection and identification of African mammals in aerial imagery using convolutional neural networks. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 8(2), 166-179.
- Descamps, S., Béchet, A., Descombes, X., Arnaud, A., & Zerubia, J. (2011). An automatic counter for aerial images of aggregations of large birds. *Bird study*, 58(3), 302-308.
- Desrochers, A., Tremblay, J. A., Aubry, Y., Chabot, D., Pace, P., & Bird, D. M. (2018). Estimating wildlife tag location errors from a VHF receiver mounted on a drone. *Drones*, 2(4), 44.
- Devictor, V. (2015). *Nature en crise. Penser la biodiversité: Penser la biodiversité*. Média Diffusion.
- Díaz-Delgado, R., & Múcher, S. (Eds.). (2019). *Drones for Biodiversity Conservation and Ecological Monitoring*. MDPI.
- Dickson, L. C., Negus, S. R., Eizaguirre, C., Katselidis, K. A., & Schofield, G. (2022). Aerial Drone Surveys Reveal the Efficacy of a Protected Area Network for Marine Megafauna and the Value of Sea Turtles as Umbrella Species. *Drones*, 6(10), 291.
- Ditmer, M. A., Vincent, J. B., Werden, L. K., Tanner, J. C., Laske, T. G., Iaizzo, P. A., ... & Fieberg, J. R. (2015). Bears show a physiological but limited behavioral response to unmanned aerial vehicles. *Current Biology*, 25(17), 2278-2283.
- Ditmer, M. A., Werden, L. K., Tanner, J. C., Vincent, J. B., Callahan, P., Iaizzo, P. A., ... & Garshelis, D. L. (2018). Bears habituate to the repeated exposure of a novel stimulus, unmanned aircraft systems. *Conservation Physiology*, 7(1), coy067.
- Doi, H., Akamatsu, Y., Watanabe, Y., Goto, M., Inui, R., Katano, I., ... & Minamoto, T. (2017). Water sampling for environmental DNA surveys by using an unmanned aerial vehicle. *Limnology and Oceanography: Methods*, 15(11), 939-944.
- Domínguez-Sánchez, C. A., Acevedo-Whitehouse, K. A., & Gendron, D. (2018). Effect of drone-based blow sampling on blue whale (*Balaenoptera musculus*) behavior. *Marine Mammal Science*, 34(3), 841-850.
- Døssing, A., Lima Simoes da Silva, E., Martelet, G., Maack Rasmussen, T., Gloaguen, E., Thejll Petersen, J., & Linde, J. (2021). A high-speed, lightweight scalar magnetometer bird for km scale UAV magnetic surveying: On sensor choice, bird design, and quality of output data. *Remote Sensing*, 13(4), 649.



- Doukari, M., Batsaris, M., Papakonstantinou, A., & Topouzelis, K. (2019). A protocol for aerial survey in coastal areas using UAS. *Remote Sensing*, 11(16), 1913.
- Drever, M. C., Chabot, D., O'Hara, P. D., Thomas, J. D., Breault, A., & Millikin, R. L. (2015). Evaluation of an unmanned rotorcraft to monitor wintering waterbirds and coastal habitats in British Columbia, Canada. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 3(4), 256-267.
- Du, B., Mao, D., Wang, Z., Qiu, Z., Yan, H., Feng, K., & Zhang, Z. (2021). Mapping wetland plant communities using unmanned aerial vehicle hyperspectral imagery by comparing object/pixel-based classifications combining multiple machine-learning algorithms. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 8249-8258.
- Du, Y., Bai, Y., & Wan, L. (2020). Wetland information extraction based on UAV multispectral and oblique images. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 1-11.
- Duffy, J. P., Cunliffe, A. M., DeBell, L., Sandbrook, C., Wich, S. A., Shutler, J. D., ... & Anderson, K. (2018). Location, location, location: considerations when using lightweight drones in challenging environments. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 4(1), 7-19.
- Edney, A. J., & Wood, M. J. (2021). Applications of digital imaging and analysis in seabird monitoring and research. *Ibis*, 163(2), 317-337.
- Duffy, J. P., Pratt, L., Anderson, K., Land, P. E., & Shutler, J. D. (2018b). Spatial assessment of intertidal seagrass meadows using optical imaging systems and a lightweight drone. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 200, 169-180.
- Dufresnes, C., Golay, J., Schuerch, J., Dejean, T., & Dubey, S. (2020). Monitoring of the last stronghold of native pool frogs (*Pelophylax lessonae*) in Western Europe, with implications for their conservation. *European journal of wildlife research*, 66(3), 45.
- Dugdale, S. J., Kelleher, C. A., Malcolm, I. A., Caldwell, S., & Hannah, D. M. (2019). Assessing the potential of drone-based thermal infrared imagery for quantifying river temperature heterogeneity. *Hydrological Processes*, 33(7), 1152-1163.
- Dujon, A. M., Ierodiaconou, D., Geeson, J. J., Arnould, J. P., Allan, B. M., Katselidis, K. A., & Schofield, G. (2021). Machine learning to detect marine animals in UAV imagery: Effect of morphology, spacing, behaviour and habitat. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 7(3), 341-354.
- Dujon, A. M., & Schofield, G. (2019). Importance of machine learning for enhancing ecological studies using information-rich imagery. *Endangered Species Research*, 39, 91-104.
- Dulava, S., Bean, W. T., & Richmond, O. M. (2015). Environmental reviews and case studies: applications of unmanned aircraft systems (UAS) for waterbird surveys. *Environmental Practice*, 17(3), 201-210.
- Dunford, R., Michel, K., Gagnage, M., Piégay, H., & Trémelo, M. L. (2009). Potential and constraints of Unmanned Aerial Vehicle technology for the characterization of Mediterranean riparian forest. *International Journal of Remote Sensing*, 30(19), 4915-4935.
- Duporge, I., Spiegel, M. P., Thomson, E. R., Chapman, T., Lamberth, C., Pond, C., ... & Klinck, H. (2021). Determination of optimal flight altitude to minimise acoustic drone disturbance to wildlife using species audiograms. *Methods in Ecology and Evolution*, 12(11), 2196-2207.
- Durban, J. W., Fearnbach, H., Barrett-Lennard, L. G., Perryman, W. L., & Leroi, D. J. (2015). Photogrammetry of killer whales using a small hexacopter launched at sea. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 3(3), 131-135.
- Durban, J. W., Moore, M. J., Chiang, G., Hickmott, L. S., Bocconcelli, A., Howes, G., ... & LeRoi, D. J. (2016). Photogrammetry of blue whales with an unmanned hexacopter. *Marine Mammal Science*, 32(4), 1510-1515.
- Vas, E., Lescroël, A., Duriez, O., Boguszewski, G., & Grémillet, D. (2015). Approaching birds with drones: first experiments and ethical guidelines. *Biology letters*, 11(2), 20140754.
- Duffy, J. P., Shutler, J. D., Witt, M. J., DeBell, L., & Anderson, K. (2018a). Tracking fine-scale structural changes in coastal dune morphology using kite aerial photography and uncertainty-assessed structure-from-motion photogrammetry. *Remote Sensing*, 10(9), 1494.
- Edney, A., Hart, T., Jessopp, M., Banks, A., Clarke, L., Cugnière, L., Elliot, K. H., Juarez Martinez, I., Kilcoyne, A., Murphy, M., Nager, R. G., Ratcliffe, N., Thompson, D. L., Ward, R. M. & Wood, M. (2023). Best practices for using drones in seabird monitoring and research. *Marine Ornithology*, 51(2), 265-280.
- Eikelboom, J. A., Wind, J., van de Ven, E., Kenana, L. M., Schroder, B., de Kneegt, H. J., ... & Prins, H. H. (2019). Improving the precision and accuracy of animal population estimates with aerial image object detection. *Methods in Ecology and Evolution*, 10(11), 1875-1887.
- Ellis, S. L., Taylor, M. L., Schiele, M., & Letessier, T. B. (2021). Influence of altitude on tropical marine habitat classification using imagery from fixed-wing, water-landing UAVs. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 7(1), 50-63.
- Elsley, R. M., & Trosclair, P. L. (2016). The use of an unmanned aerial vehicle to locate alligator nests. *Southeastern Naturalist*, 15(1), 76-82.
- Erbe, C., Parsons, M., Duncan, A., Osterrieder, S. K., & Allen, K. (2017). Aerial and underwater sound of unmanned aerial vehicles (UAV). *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 5(3), 92-101.
- Erfanjifard, Y., Kraszewski, B., & Stereńczak, K. (2021). Integration of remote sensing in spatial ecology: assessing the interspecific interactions of two plant species in a semi-arid woodland using unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetric data. *Oecologia*, 196(1), 115-130.

- Escobar, J. E. C., Rollins, M., & Unger, S. (2020). Preliminary data on an affordable UAV system to survey for freshwater turtles: advantages and disadvantages of low-cost drones. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 9(1), 67-74.
- Eshetae, M. A. (2020). Tree species classification using uav-rgb images and machine learning algorithms in a mixed temperate forest: a case study of Haagse Bos, Netherlands. Master's thesis, University of Twente.
- Eskandari, R., Mahdianpari, M., Mohamadimanesh, F., Salehi, B., Brisco, B., & Homayouni, S. (2020). Meta-analysis of unmanned aerial vehicle (UAV) imagery for agro-environmental monitoring using machine learning and statistical models. *Remote Sensing*, 12(21), 3511.
- Estrany, J., Ruiz, M., Calsamiglia, A., Carriquí, M., García-Comendador, J., Nadal, M., ... & Gago, J. (2019). Sediment connectivity linked to vegetation using UAVs: High-resolution imagery for ecosystem management. *Science of the Total Environment*, 671, 1192-1205.
- Evans, A. D., Gardner, K. H., Greenwood, S., & Pruitt, B. (2020). Exploring the utility of small unmanned aerial system products in remote visual stream ecological assessment. *Restoration Ecology*, 28(6), 1431-1444.
- Evans, I. J., Jones, T. H., Pang, K., Evans, M. N., Saimin, S., & Goossens, B. (2015). Use of drone technology as a tool for behavioral research: a case study of crocodilian nesting. *Herpetological Conservation and Biology*, 10(1), 90-98.
- Ezat, M. A., Fritsch, C. J., & Downs, C. T. (2018). Use of an unmanned aerial vehicle (drone) to survey Nile crocodile populations: A case study at Lake Nyamithi, Ndumo game reserve, South Africa. *Biological Conservation*, 223, 76-81.
- Faye, E., Rebaudo, F., Yáñez-Cajo, D., Cauvy-Fraunié, S., & Dangles, O. (2016). A toolbox for studying thermal heterogeneity across spatial scales: from unmanned aerial vehicle imagery to landscape metrics. *Methods in Ecology and Evolution*, 7(4), 437-446.
- Fernández-Guisuraga, J. M., Calvo, L., & Suarez-Seoane, S. (2022). Monitoring post-fire neighborhood competition effects on pine saplings under different environmental conditions by means of UAV multispectral data and structure-from-motion photogrammetry. *Journal of Environmental Management*, 305, 114373.
- Fettermann, T., Fiori, L., Gillman, L., Stockin, K. A., & Bollard, B. (2022). Drone surveys are more accurate than boat-based surveys of bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*). *Drones*, 6(4), 82.
- Fettermann, T., Fiori, L., Bader, M., Doshi, A., Breen, D., Stockin, K. A., & Bollard, B. (2019). Behaviour reactions of bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) to multirotor Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). *Scientific Reports*, 9(1), 8558.
- Fiori, L., Doshi, A., Martinez, E., Orams, M. B., & Bollard-Breen, B. (2017). The use of unmanned aerial systems in marine mammal research. *Remote Sensing*, 9(6), 543.
- Flener, C., Vaaja, M., Jaakkola, A., Krooks, A., Kaartinen, H., Kukko, A., ... & Alho, P. (2013). Seamless mapping of river channels at high resolution using mobile LiDAR and UAV-photography. *Remote Sensing*, 5(12), 6382-6407.
- Flores, D., González-Hernández, I., Lozano, R., Vazquez-Nicolas, J. M., & HernandezToral, J. L. (2021). Automated agave detection and counting using a convolutional neural network and unmanned aerial systems. *Drones*, 5(1), 4.
- Flores-de-Santiago, F., Valderrama-Landeros, L., Rodríguez-Sobreyra, R., & Flores-Verdugo, F. (2020). Assessing the effect of flight altitude and overlap on orthoimage generation for UAV estimates of coastal wetlands. *Journal of Coastal Conservation*, 24, 1-11.
- Flynn, K. F., & Chapra, S. C. (2014). Remote sensing of submerged aquatic vegetation in a shallow non-turbid river using an unmanned aerial vehicle. *Remote Sensing*, 6(12), 12815-12836.
- Fong, V., Hoffmann, S. L., & Pate, J. H. (2022). Using drones to assess volitional swimming kinematics of manta ray behaviors in the wild. *Drones*, 6(5), 111.
- Francis, R. J., Kingsford, R. T., & Brandis, K. J. (2022). Using drones and citizen science counts to track colonial waterbird breeding, an indicator for ecosystem health on the Chobe River, Botswana. *Global Ecology and Conservation*, 38, e02231.
- Francis, R. J., Lyons, M. B., Kingsford, R. T., & Brandis, K. J. (2020). Counting mixed breeding aggregations of animal species using drones: Lessons from waterbirds on semi-automation. *Remote Sensing*, 12(7), 1185.
- Franke, U., Goll, B., Hohmann, U., & Heurich, M. (2012). Aerial ungulate surveys with a combination of infrared and high-resolution natural colour images. *Animal Biodiversity and Conservation*, 35(2), 285-293.
- Fraser, R. H., Olthof, I., Lantz, T. C., & Schmitt, C. (2016). UAV photogrammetry for mapping vegetation in the low-Arctic. *Arctic Science*, 2(3), 79-102.
- Fritsch, C. J., & Downs, C. T. (2020). Evaluation of low-cost consumer-grade UAVs for conducting comprehensive high-frequency population censuses of hippopotamus populations. *Conservation Science and Practice*, 2(12), e281.
- Fritz, A., Li, L., Storch, I., & Koch, B. (2018). UAV-derived habitat predictors contribute strongly to understanding avian species-habitat relationships on the Eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 4(1), 53-65.
- Fromm, M., Schubert, M., Castilla, G., Linke, J., & McDermid, G. (2019). Automated detection of conifer seedlings in drone imagery using convolutional neural networks. *Remote Sensing*, 11(21), 2585.

- Fu, B., He, X., Yao, H., Liang, Y., Deng, T., He, H., ... & He, W. (2022). Comparison of RFE-DL and stacking ensemble learning algorithms for classifying mangrove species on UAV multispectral images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 112, 102890.
- Fu, Y., Kinniry, M., & Kloepper, L. N. (2018). The Chirocopter: A UAV for recording sound and video of bats at altitude. *Methods in Ecology and Evolution*, 9(6), 1531-1535.
- Fudala, K., & Bialik, R. J. (2020). Breeding colony dynamics of southern elephant seals at Patelnia Point, King George Island, Antarctica. *Remote Sensing*, 12(18), 2964.
- Fudala, K., & Bialik, R. J. (2022). The use of drone-based aerial photogrammetry in population monitoring of Southern Giant Petrels in ASMA 1, King George Island, maritime Antarctica. *Global Ecology and Conservation*, 33, e01990.
- Fust, P., & Loos, J. (2020). Development perspectives for the application of autonomous, unmanned aerial systems (UASs) in wildlife conservation. *Biological Conservation*, 241, 108380.
- Gallacher, D. (2019). Drone-based vegetation assessment in arid ecosystems. *Sabkha Ecosystems: Volume VI: Asia/Pacific*, 91-98.
- Gallego, D., & Sarasola, J. H. (2021). Using drones to reduce human disturbance while monitoring breeding status of an endangered raptor. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 7(3), 550-561.
- Gan, Y., Wang, Q., & Iio, A. (2023). Tree Crown Detection and Delineation in a Temperate Deciduous Forest from UAV RGB Imagery Using Deep Learning Approaches: Effects of Spatial Resolution and Species Characteristics. *Remote Sensing*, 15(3), 778.
- Ganeva, D., Roumenina, E., Dimitrov, P., Gikov, A., Jelev, G., Dragov, R., ... & Taneva, K. (2022). Phenotypic traits estimation and preliminary yield assessment in different phenophases of wheat breeding experiment based on UAV multispectral images. *Remote Sensing*, 14(4), 1019.
- García, V. J., Márquez, C. O., Isenhardt, T. M., Rodríguez, M., Crespo, S. D., & Cifuentes, A. G. (2019). Evaluating the conservation state of the páramo ecosystem: An object-based image analysis and CART algorithm approach for central Ecuador. *Heliyon*, 5(10).
- García-Garin, O., Aguilar, A., Borrell, A., Gozalbes, P., Lobo, A., Penadés-Suay, J., ... & Vighi, M. (2020). Who's better at spotting? A comparison between aerial photography and observer-based methods to monitor floating marine litter and marine mega-fauna. *Environmental Pollution*, 258, 113680.
- Ge, X., Wang, J., Ding, J., Cao, X., Zhang, Z., Liu, J., & Li, X. (2019). Combining UAV-based hyperspectral imagery and machine learning algorithms for soil moisture content monitoring. *PeerJ*, 7, e6926.
- Gedeon, C. I., Árvai, M., Szatmári, G., Brevik, E. C., Takáts, T., Kovács, Z. A., & Mészáros, J. (2022). Identification and Counting of European Soudlik Burrows from UAV Images by Pixel-Based Image Analysis and Random Forest Classification: A Simple, Semi-Automated, yet Accurate Method for Estimating Population Size. *Remote Sensing*, 14(9), 2025.
- Gedeon, C. I., Árvai, M., Szatmári, G., Brevik, E. C., Takáts, T., Kovács, Z., & Mészáros, J. (2021). Estimating actual abundance of European soudliks: using UAV imagery, pixel based image analysis and random forest classification to count soudlik burrows.
- Geetha, P., Singh, S., Sreeram, K. V., Parmar, K., & Abhinav, K. (2021). Plant Detection Using Unmanned Drone via Convolution Neural Network. *International Journal of Research in Engineering, Science and Management*, 4(5), 153-155.
- Mesquita, G. P., Mulero-Pázmány, M., Wich, S. A., & Rodríguez-Teijeiro, J. D. (2023). A practical approach with drones, smartphones, and tracking tags for potential real-time animal tracking. *Current Zoology*, 69(2), 208-214.
- Geldart, E. A., Barnas, A. F., Semeniuk, C. A., Gilchrist, H. G., Harris, C. M., & Love, O. P. (2022). A colonial-nesting seabird shows no heart-rate response to drone-based population surveys. *Scientific Reports*, 12(1), 18804.
- Gentle, M., Finch, N., Speed, J., & Pople, A. (2018). A comparison of unmanned aerial vehicles (drones) and manned helicopters for monitoring macropod populations. *Wildlife Research*, 45(7), 586-594.
- Getzin, S., Löns, C., Yizhaq, H., Erickson, T. E., Muñoz-Rojas, M., Huth, A., & Wiegand, K. (2022). High-resolution images and drone-based LiDAR reveal striking patterns of vegetation gaps in a wooded spinifex grassland of Western Australia. *Landscape Ecology*, 1-17.
- Getzin, S., Nuske, R. S., & Wiegand, K. (2014). Using unmanned aerial vehicles (UAV) to quantify spatial gap patterns in forests. *Remote Sensing*, 6(8), 6988-7004.
- Ghasemi, M., Latifi, H., & Pourhashemi, M. (2022). A novel method for detecting and delineating coppice trees in UAV images to monitor tree decline. *Remote Sensing*, 14(23), 5910.
- Giles, A. B., Scanes, P., Dickson, A., Adam, B., & Kelaher, B. (2023). Drones are an effective tool to assess the impact of feral horses in an alpine riparian environment. *Austral ecology*, 48(2), 359-373.
- Giles, A. B., Butcher, P. A., Colefax, A. P., Pagendam, D. E., Mayjor, M., & Kelaher, B. P. (2021). Responses of bottlenose dolphins (*Tursiops spp.*) to small drones. *Aquatic conservation: marine and freshwater ecosystems*, 31(3), 677-684.
- Gini, R., Passoni, D., Pinto, L., & Sona, G. (2014). Use of unmanned aerial systems for multispectral survey and tree classification: A test in a park area of northern Italy. *European Journal of Remote Sensing*, 47(1), 251-269.

- Goebel, M. E., Perryman, W. L., Hinke, J. T., Krause, D. J., Hann, N. A., Gardner, S., & LeRoit, D. J. (2015). A small unmanned aerial system for estimating abundance and size of Antarctic predators. *Polar Biology*, 38, 619-630.
- Gomes, I., Peteiro, L., Bueno-Pardo, J., Albuquerque, R., Perez-Jorge, S., Oliveira, E. R., ... & Queiroga, H. (2018). What's a picture really worth? On the use of drone aerial imagery to estimate intertidal rocky shore mussel demographic parameters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 213, 185-198.
- Gonçalves, J., Henriques, R., Alves, P., Sousa-Silva, R., Monteiro, A. T., Lomba, Â., ... & Honrado, J. (2016). Evaluating an unmanned aerial vehicle-based approach for assessing habitat extent and condition in fine-scale early successional mountain mosaics. *Applied Vegetation Science*, 19(1), 132-146.
- Gonzales, D., Hempel de Ibarra, N., & Anderson, K. (2022). Remote sensing of floral resources for pollinators—new horizons from satellites to drones. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10.
- Gonzalez, L. F., Montes, G. A., Puig, E., Johnson, S., Mengersen, K., & Gaston, K. J. (2016). Unmanned aerial vehicles (UAVs) and artificial intelligence revolutionizing wildlife monitoring and conservation. *Sensors*, 16(1), 97.
- Gonzalez-Moodie, B., Daiek, S., Lorenzo-Trueba, J., & Varde, A. S. (2021). Multispectral drone data analysis on coastal dunes. In *2021 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)* (pp. 5903-5905). IEEE.
- Gonzalez, F., & Johnson, S. (2017). Standard operating procedures for UAV or drone based monitoring of wildlife. In *Proceedings of the UAS<sub>4</sub>RS 2017 (Unmanned Aircraft Systems for Remote Sensing) Conference* (pp. 1-7). TerraLuma Research Group UAS Remote Sensing, University of Tasmania.
- Gonzalez-Aguilera, D., & Rodriguez-Gonzalvez, P. (2017). Drones—an open access journal. *Drones*, 1(1), 1.
- Gracchi, T., Rossi, G., Tacconi Stefanelli, C., Tanteri, L., Pozzani, R., & Moretti, S. (2021). Tracking the evolution of riverbed morphology on the basis of UAV photogrammetry. *Remote Sensing*, 13(4), 829.
- Gray, P. C., Larsen, G. D., & Johnston, D. W. (2022). Drones address an observational blind spot for biological oceanography. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 20(7), 413-421.
- Gray, P. C., Ridge, J. T., Poulin, S. K., Seymour, A. C., Schwantes, A. M., Swenson, J. J., & Johnston, D. W. (2018). Integrating drone imagery into high resolution satellite remote sensing assessments of estuarine environments. *Remote Sensing*, 10(8), 1257.
- Gray, P. C., Bierlich, K. C., Mantell, S. A., Friedlaender, A. S., Goldbogen, J. A., & Johnston, D. W. (2019). Drones and convolutional neural networks facilitate automated and accurate cetacean species identification and photogrammetry. *Methods in Ecology and Evolution*, 10(9), 1490-1500.
- Gregory, K. B., Winn, W., Johnson, K., & Rosekind, M. R. (2010). Pilot fatigue survey: exploring fatigue factors in air medical operations. *Air medical journal*, 29(6), 309-319.
- Grémillet, D., Puech, W., Garçon, V., Boulonier, T., & Le Maho, Y. (2012). Robots in ecology: welcome to the machine. *Open Journal of Ecology*, 2(2), 49-57.
- Grendörffer, G. J., (2013). UAS-based automatic bird count of a common gull colony. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-1/W2, 169-174.
- Groom, G., Krag Petersen, I., Anderson, M. D., & Fox, A. D. (2011). Using object-based analysis of image data to count birds: mapping of Lesser Flamingos at Kamfers Dam, Northern Cape, South Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 32(16), 4611-4639.
- Gröschler, K. C., & Oppelt, N. (2022). Using Drones to Monitor Broad-Leaved Orchids (*Dactylorhiza majalis*) in High-Nature-Value Grassland. *Drones*, 6(7), 174.
- Groves, P. A., Alcorn, B., Wiest, M. M., Maselko, J. M., & Connor, W. P. (2016). Testing unmanned aircraft systems for salmon spawning surveys. *Facets*, 1(1), 187-204.
- Guedes, G. H. S., & Araújo, F. G. (2022). Underwater drones reveal different fish community structures on the steep slopes of a tropical reservoir. *Hydrobiologia*, 849(5), 1301-1312.
- Guerra-Hernández, J., Díaz-Varela, R. A., Álvarez-González, J. G., & Rodríguez-González, P. M. (2021). Assessing a novel modelling approach with high resolution UAV imagery for monitoring health status in priority riparian forests. *Forest Ecosystems*, 8, 61.
- Guo, Q., Su, Y., Hu, T., Zhao, X., Wu, F., Li, Y., ... & Wang, X. (2017). An integrated UAV-borne lidar system for 3D habitat mapping in three forest ecosystems across China. *International journal of remote sensing*, 38(8-10), 2954-2972.
- Guo, X., Shao, Q., Li, Y., Wang, Y., Wang, D., Liu, J., ... & Yang, F. (2018). Application of UAV remote sensing for a population census of large wild herbivores—Taking the headwater region of the Yellow River as an example. *Remote Sensing*, 10(7), 1041.
- Guo, Y., Zhao, Y., Rothfus, T. A., & Avalos, A. S. (2022). A novel invasive plant detection approach using time series images from unmanned aerial systems based on convolutional and recurrent neural networks. *Neural Computing and Applications*, 34(22), 20135-20147.
- Habel, J. C., Teucher, M., Ulrich, W., Bauer, M., & Rödger, D. (2016). Drones for butterfly conservation: larval habitat assessment with an unmanned aerial vehicle. *Landscape Ecology*, 31, 2385-2395.
- Hadjikyriakou, T. G., Kassinis, N., Skarlatos, D., Charilaou, P., & Kirschel, A. N. (2020). Breeding success of Eleonora's Falcon in Cyprus revisited using survey techniques for cliff-nesting species. *The Condor*, 122(4), duaa045.

- Hahn, N., Mwakatobe, A., Konuche, J., de Souza, N., Keyyu, J., Goss, M., ... & Olson, D. (2017). Unmanned aerial vehicles mitigate human–elephant conflict on the borders of Tanzanian Parks: a case study. *Oryx*, 51(3), 513-516.
- Hamad, I. Y., Staehr, P. A. U., Rasmussen, M. B., & Sheikh, M. (2022). Drone-based characterization of seagrass habitats in the tropical waters of Zanzibar. *Remote Sensing*, 14(3), 680.
- Hambrecht, L., Brown, R. P., Piel, A. K., & Wich, S. A. (2019). Detecting 'poachers' with drones: Factors influencing the probability of detection with TIR and RGB imaging in miombo woodlands, Tanzania. *Biological conservation*, 233, 109-117.
- Hamilton, G., Corcoran, E., Denman, S., Hennekam, M. E., & Koh, L. P. (2020). When you can't see the koalas for the trees: Using drones and machine learning in complex environments. *Biological Conservation*, 247, 108598.
- Hammill, M. O., & Canadian Science Advisory Secretariat. (2017). Comparison of methods to estimate grey seal pup production at different colonies. Fisheries and Oceans Canada, Ottawa, Ontario. 19 p. Disponible en ligne à: <https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/Library/4061718x.pdf>.
- Hamyton, S. M., Morris, R. H., Carvalho, R. C., Roder, N., Barlow, P., Mills, K., & Wang, L. (2020). Evaluating techniques for mapping island vegetation from unmanned aerial vehicle (UAV) images: Pixel classification, visual interpretation and machine learning approaches. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 89, 102085.
- Hamzah, R., & Noor, M. F. M. (2022). Visualization of Tree Species Identification Using Mask RCNNs for Tropical Forests in Malaysia. In 2022 International Conference on Computer and Drone Applications (IConDA) (pp. 55-60). IEEE.
- Han, Y. G., Cho, Y., & Kwon, O. (2015). The use of conservation drones in ecology and wildlife research. *Journal of Ecology and Environment*, 38(1), 113-118.
- Han, Y. G., Yoo, S. H., & Kwon, O. (2017). Possibility of applying unmanned aerial vehicle (UAV) and mapping software for the monitoring of waterbirds and their habitats. *Journal of Ecology and Environment*, 41, 1-7.
- Hanlon, J., Messerly, C., Martin, B., & Pearson, A. (2017). Drone technology for monitoring and mapping in the grasslands of Eastern Montana. *Intermountain Journal of Sciences*, 23(1-4 December), 72-73.
- Hansen, M. (2022). Observation et dénombrement de la faune par drone: Approche méthodologique dans les clairières forestières du parc national de Lobéké (Sud-Est Cameroun).
- Hanson, L., Holmquist-Johnson, C. L., & Cowardin, M. L. (2014). Evaluation of the Raven sUAS to detect and monitor greater sage-grouse leks within the Middle Park population. US Department of the Interior, US Geological Survey, Reston, Virginia, 20 p.
- Haq, M. A., Rahaman, G., Baral, P., & Ghosh, A. (2021). Deep learning based supervised image classification using UAV images for forest areas classification. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 49, 601-606.
- Hardenbol, A. A., Kuzmin, A., Korhonen, L., Korpelainen, P., Kumpula, T., Maltamo, M., & Kouki, J. (2021). Detection of aspen in conifer-dominated boreal forests with seasonal multispectral drone image point clouds. *Silva Fennica*, 55(4).
- Hardin, P. J., & Jackson, M. W. (2005). An unmanned aerial vehicle for rangeland photography. *Rangeland Ecology & Management*, 58(4), 439-442.
- Harkness, P., & Sprogis, K. R. (2020). Silver gull harassment of humpback whales in Exmouth Gulf, Western Australia. *Marine and Freshwater Research*, 72(4), 584-592.
- Harris, C. M., Herata, H., & Hertel, F. (2019a). Environmental guidelines for operation of Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS): experience from Antarctica. *Biological conservation*, 236, 521-531.
- Harris, J. M., Nelson, J. A., Rieucan, G., & Broussard III, W. P. (2019b). Use of drones in fishery science. *Transactions of the American Fisheries Society*, 148(4), 687-697.
- Harris, R. C., Kennedy, L. M., Pingel, T. J., & Thomas, V. A. (2022). Assessment of canopy health with drone-based orthoimagery in a Southern Appalachian red spruce forest. *Remote Sensing*, 14(6), 1341.
- Hartmann, W. L., Fishlock, V., & Leslie, A. (2021). First guidelines and suggested best protocol for surveying African elephants (*Loxodonta africana*) using a drone. *koedoe*, 63(1), 1-9.
- Harvey, R. J., Roskilly, K., Buse, C., Evans, H. K., Hubel, T. Y., & Wilson, A. M. (2016). Determining position, velocity and acceleration of free-ranging animals with a low-cost unmanned aerial system. *Journal of Experimental Biology*, 219(17), 2687-2692.
- Hayes, M. C., Gray, P. C., Harris, G., Sedgwick, W. C., Crawford, V. D., Chazal, N., ... & Johnston, D. W. (2021). Drones and deep learning produce accurate and efficient monitoring of large-scale seabird colonies. *The Condor*, 123(3), duabo22.
- He, G., Yang, H., Pan, R., Sun, Y., Zheng, P., Wang, J., ... & Guo, S. (2020). Using unmanned aerial vehicles with thermal-image acquisition cameras for animal surveys: a case study on the Sichuan snub-nosed monkey in the Qinling Mountains. *Integrative Zoology*, 15(1), 79-86.
- Helm, C., Hassan, M. A., & Reid, D. (2020). Characterization of morphological units in a small, forested stream using close-range remotely piloted aircraft imagery. *Earth Surf. Dynam.*, 8, 913-929.
- Hensel, E., Wenclawski, S., & Layman, C. A. (2018). Using a small, consumer-grade drone to identify and count marine megafauna in shallow habitats. *Latin american journal of aquatic research*, 46(5), 1025-1033.

- Herlin, A., Brunberg, E., Hultgren, J., Högberg, N., Rydberg, A., & Skarin, A. (2021). Animal welfare implications of digital tools for monitoring and management of cattle and sheep on pasture. *Animals*, 11(3), 829.
- Hill, D. J., Tarasoff, C., Whitworth, G. E., Baron, J., Bradshaw, J. L., & Church, J. S. (2017). Utility of unmanned aerial vehicles for mapping invasive plant species: a case study on yellow flag iris (*Iris pseudacorus* L.). *International Journal of Remote Sensing*, 38(8-10), 2083-2105.
- Hodgson, J. C., Mott, R., Baylis, S. M., Pham, T. T., Wotherspoon, S., Kilpatrick, A. D., ... & Koh, L. P. (2018). Drones count wildlife more accurately and precisely than humans. *Methods in Ecology and Evolution*, 9(5), 1160-1167.
- Hodgson, A., Peel, D., & Kelly, N. (2017). Unmanned aerial vehicles for surveying marine fauna: assessing detection probability. *Ecological Applications*, 27(4), 1253-1267.
- Hodgson, J. C., & Koh, L. P. (2016). Best practice for minimising unmanned aerial vehicle disturbance to wildlife in biological field research. *Current Biology*, 26(10), R404-R405.
- Hodgson, J. C., Baylis, S. M., Mott, R., Herrod, A., & Clarke, R. H. (2016). Precision wildlife monitoring using unmanned aerial vehicles. *Scientific reports*, 6(1), 22574.
- Hodgson, A., Kelly, N., & Peel, D. (2013). Unmanned aerial vehicles (UAVs) for surveying marine fauna: a dugong case study. *PloS one*, 8(11), e79556.
- Holldorf, E., (2018). Avifauna ethological response to unmanned aircraft systems. Master's Project and Capstones 771, University of San Francisco, San Francisco, Californie, 71 p. Disponible en ligne à: <https://usfca.edu/capstone/771>.
- Hollings, T., Burgman, M., van Andel, M., Gilbert, M., Robinson, T., & Robinson, A. (2018). How do you find the green sheep? A critical review of the use of remotely sensed imagery to detect and count animals. *Methods in Ecology and Evolution*, 9(4), 881-892.
- Hong, S. J., Han, Y., Kim, S. Y., Lee, A. Y., & Kim, G. (2019). Application of deep-learning methods to bird detection using unmanned aerial vehicle imagery. *Sensors*, 19(7), 1651.
- Horta-Lacueva, Q. J. B., Ólafsdóttir, J. H., Finn, F., Fiskoviča, E., Ponsioen, L., De la Cámara, M., & Kapralova, K. H. (2022). From drones to bones: Assessing the importance of abiotic factors for salmonid spawning behaviour and embryonic development through a multidisciplinary approach. *Ecology of Freshwater Fish*, 31(3), 596-606.
- Hosseiny, B., Rastiveis, H., & Homayouni, S. (2020). An Automated Framework for Plant Detection Based on Deep Simulated Learning from Drone Imagery. *Remote Sensing*, 12(21), 3521.
- Howell, L. G., Clulow, J., Jordan, N. R., Beranek, C. T., Ryan, S. A., Roff, A., & Witt, R. R. (2021). Drone thermal imaging technology provides a cost-effective tool for landscape-scale monitoring of a cryptic forest-dwelling species across all population densities. *Wildlife Research*, 49(1), 66-78.
- Hu, J., Wu, X., & Dai, M. (2020). Estimating the population size of migrating Tibetan antelopes *Pantholops hodgsonii* with unmanned aerial vehicles. *Oryx*, 54(1), 101-109.
- Huang, R., Zhou, H., Liu, T., & Sheng, H. (2022). Multi-UAV collaboration to survey Tibetan antelopes in Hoh Xil. *Drones*, 6(8), 196.
- Hughey, L. F., Hein, A. M., Strandburg-Peshkin, A., & Jensen, F. H. (2018). Challenges and solutions for studying collective animal behaviour in the wild. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 373(1746), 20170005.
- Husson, E., Hagner, O., & Ecke, F. (2014). Unmanned aircraft systems help to map aquatic vegetation. *Applied vegetation science*, 17(3), 567-577.
- Husson, E., Lindgren, F., & Ecke, F. (2014). Assessing biomass and metal contents in riparian vegetation along a pollution gradient using an unmanned aircraft system. *Water, Air, & Soil Pollution*, 225, 1-14.
- Hyun, C. U., Park, M., & Lee, W. Y. (2020). Remotely piloted aircraft system (RPAS)-based wildlife detection: A review and case studies in maritime Antarctica. *Animals*, 10(12), 2387.
- Infantes, E., Carroll, D., Silva, W. T., Härkönen, T., Edwards, S. V., & Harding, K. C. (2022). An automated work-flow for pinniped surveys: A new tool for monitoring population dynamics. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10, 905309.
- Infantes, E., Cossa, D., Stankovic, M., Panyawai, J., Tuntiprapas, P., Daochai, C., & Prathep, A. (2020). Dugong (*Dugong dugon*) reproductive behaviour in Koh Libong, Thailand: observations using drones. *Aquatic Mammals*, 46(6), 603-608.
- Inoue, S., Yamamoto, S., Ringhofer, M., Mendonça, R. S., & Hirata, S. (2020). Lateral position preference in grazing feral horses. *Ethology*, 126(1), 111-119.
- Inoue, S., Yamamoto, S., Ringhofer, M., Mendonça, R. S., Pereira, C., & Hirata, S. (2019). Spatial positioning of individuals in a group of feral horses: A case study using drone technology. *Mammal Research*, 64, 249-259.
- Israel, M., (2011). A UAV-based roe deer fawn detection system. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38, 1-5.
- IUCN, 2021. European Red List of Birds. Compiled by BirdLife International.
- Ivošević, B., Han, Y. G., & Kwon, O. (2017). Monitoring butterflies with an unmanned aerial vehicle: current possibilities and future potentials. *Journal of Ecology and Environment*, 41, 1-6.

- Ivošević, B., Han, Y. G., Cho, Y., & Kwon, O. (2015). The use of conservation drones in ecology and wildlife research. *Journal of Ecology and Environment*, 38(1), 113-118.
- Jagielski, P. M., Barnas, A. F., Grant Gilchrist, H., Richardson, E. S., Love, O. P., & Semeniuk, C. A. (2022). The utility of drones for studying polar bear behaviour in the Canadian Arctic: opportunities and recommendations. *Drone Systems and Applications*, 10(1), 97-110.
- James, K., & Bradshaw, K. (2020). Detecting plant species in the field with deep learning and drone technology. *Methods in Ecology and Evolution*, 11(11), 1509-1519.
- Jensen, A. M., Geller, D. K., & Chen, Y. (2014). Monte Carlo simulation analysis of tagged fish radio tracking performance by swarming unmanned aerial vehicles in fractional order potential fields. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 74, 287-307.
- Jewell, Z. (2013). Effect of monitoring technique on quality of conservation science. *Conservation Biology*, 27, 501-508.
- Jiménez López, J., & Mulero-Pázmány, M. (2019). Drones for conservation in protected areas: Present and future. *Drones*, 3(1), 10.
- Jiménez-Torres, M., Silva, C. P., Riquelme, C., Estay, S. A., & Soto-Gamboa, M. (2023). Automatic Recognition of Black-Necked Swan (*Cygnus melancoryphus*) from Drone Imagery. *Drones*, 7(2), 71.
- Johnston, D.W., (2019). Unoccupied aircraft systems in marine science and conservation. *Annual Review of Marine Science*, 11: 439-463.
- Johnston, D. W., Dale, J., Murray, K. T., Josephson, E., Newton, E., & Wood, S. (2017). Comparing occupied and unoccupied aircraft surveys of wildlife populations: assessing the gray seal (*Halichoerus grypus*) breeding colony on Muskeget Island, USA. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 5(4), 178-191.
- G.P.J. IV, Pearlstine, L. G., & Percival, H. F. (2006). An assessment of small unmanned aerial vehicles for wildlife research. *Wildlife society bulletin*, 34(3), 750-758.
- Joyce, K. E., Duce, S., Leahy, S. M., Leon, J., & Maier, S. W. (2018). Principles and practice of acquiring drone-based image data in marine environments. *Marine and Freshwater Research*, 70(7), 952-963.
- Junda, J., Greene, E., & Bird, D. M. (2015). Proper flight technique for using a small rotary-winged drone aircraft to safely, quickly, and accurately survey raptor nests. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 3(4), 222-236.
- Junda, J. H., Greene, E., Zazelenchuk, D., & Bird, D. M. (2016). Nest defense behaviour of four raptor species (osprey, bald eagle, ferruginous hawk, and red-tailed hawk) to a novel aerial intruder—a small rotary-winged drone. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 4(4), 217-227..
- Kabiri, K., Rezai, H., & Moradi, M. (2020). A drone-based method for mapping the coral reefs in the shallow coastal waters—case study: Kish Island, Persian Gulf. *Earth Science Informatics*, 13(4), 1265-1274.
- Kaçamak, B., Barbier, N., Aubry-Kientz, M., Forni, E., Gourlet-Fleury, S., Guibal, D., ... & Réjou-Méchain, M. (2022). Linking drone and ground-based liana measurements in a congolese forest. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5, 803194.
- Kalacska, M., Lucanus, O., Sousa, L., Vieira, T., & Arroyo-Mora, J. P. (2018). Freshwater fish habitat complexity mapping using above and underwater structure-from-motion photogrammetry. *Remote Sensing*, 10(12), 1912.
- Kannan, A., & Ranganathan, P. (2020). The Ethics of Utilising Drones in Wildlife Conservation and Monitoring.
- Kattenborn, T., Eichel, J., & Fassnacht, F. E. (2019). Convolutional Neural Networks enable efficient, accurate and fine-grained segmentation of plant species and communities from high-resolution UAV imagery. *Scientific reports*, 9(1), 17656.
- Kattenborn, T., Eichel, J., Wisler, S., Burrows, L., Fassnacht, F. E., & Schmidlein, S. (2020). Convolutional Neural Networks accurately predict cover fractions of plant species and communities in Unmanned Aerial Vehicle imagery. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 6(4), 472-486.
- Kays, R., Sheppard, J., Mclean, K., Welch, C., Paunescu, C., Wang, V., ... & Crofoot, M. (2019). Hot monkey, cold reality: surveying rainforest canopy mammals using drone-mounted thermal infrared sensors. *International journal of remote sensing*, 40(2), 407-419.
- Kelaker, B. P., Peddemors, V. M., Hoade, B., Colefax, A. P., & Butcher, P. A. (2019a). Comparison of sampling precision for nearshore marine wildlife using unmanned and manned aerial surveys. *Journal of unmanned vehicle systems*, 8(1), 30-43.
- Kelaker, B. P., Colefax, A. P., Tagliafico, A., Bishop, M. J., Giles, A., & Butcher, P. A. (2019b). Assessing variation in assemblages of large marine fauna off ocean beaches using drones. *Marine and Freshwater Research*, 71(1), 68-77.
- Kellenberger, B., Marcos, D., & Tuia, D. (2018). Detecting mammals in UAV images: Best practices to address a substantially imbalanced dataset with deep learning. *Remote sensing of environment*, 216, 139-153.
- Kellenberger, B., Volpi, M., & Tuia, D. (2017). Fast animal detection in UAV images using convolutional neural networks. In 2017 IEEE international geoscience and remote sensing symposium (IGARSS) (pp. 866-869). IEEE.
- Kestur, R., Angural, A., Bashir, B., Omkar, S. N., Anand, G., & Meenavathi, M. B. (2018). Tree crown detection, delineation and counting in uav remote sensed images: A neural network based spectral-spatial method. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 46, 991-1004.

- Kilfoil, J. P., Rodriguez-Pinto, I., Kiszka, J. J., Heithaus, M. R., Zhang, Y., Roa, C. C., ... & Wirsing, A. J. (2020). Using unmanned aerial vehicles and machine learning to improve sea cucumber density estimation in shallow habitats. *ICES Journal of Marine Science*, 77(7-8), 2882-2889.
- Kim, H. G., Park, J. S., & Lee, D. H. (2018). Potential of unmanned aerial sampling for monitoring insect populations in rice fields. *Florida Entomologist*, 101(2), 330-334.
- Kissell Jr, R. E., & Nimmo, S. K. (2011). A technique to estimate white-tailed deer *Odocoileus virginianus* density using vertical-looking infrared imagery. *Wildlife Biology*, 17(1), 85-92.
- Kiszka, J. J., Mourier, J., Gastrich, K., & Heithaus, M. R. (2016). Using unmanned aerial vehicles (UAVs) to investigate shark and ray densities in a shallow coral lagoon. *Marine Ecology Progress Series*, 560, 237-242.
- Klosterman, S., & Richardson, A. D. (2017). Observing spring and fall phenology in a deciduous forest with aerial drone imagery. *Sensors*, 17(12), 2852.
- Knoth, C., Klein, B., Prinz, T., & Kleinebecker, T. (2013). Unmanned aerial vehicles as innovative remote sensing platforms for high-resolution infrared imagery to support restoration monitoring in cut-over bogs. *Applied vegetation science*, 16(3), 509-517.
- Kocer, B. B., Ho, B., Zhu, X., Zheng, P., Farinha, A., Xiao, F., ... & Kovac, M. (2021, October). Forest drones for environmental sensing and nature conservation. In *2021 Aerial Robotic Systems Physically Interacting with the Environment (AIRPHARO)* (pp. 1-8). IEEE.
- Koh, L. P., & Wich, S. A. (2012). Dawn of drone ecology: low-cost autonomous aerial vehicles for conservation. *Tropical conservation science*, 5(2), 121-132.
- Kolanuvada, S. R., & Ilango, K. K. (2021). Automatic extraction of tree crown for the estimation of biomass from UAV imagery using neural networks. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 49(3), 651-658.
- Koparan, C., Koc, A. B., Privette, C. V., & Sawyer, C. B. (2018). In situ water quality measurements using an unmanned aerial vehicle (UAV) system. *Water*, 10(3), 264.
- Korczak-Abshire, M., Kidawa, A., Zmarz, A., Storvold, R., Karlsen, S. R., Rodzewicz, M., ... & Znoj, A. (2016). Preliminary study on nesting Adélie penguins disturbance by unmanned aerial vehicles. *CCAMLR Sci*, 23, 1-16. Disponible en ligne à : [https://www.ccamlr.org/fr/system/files/science\\_journal\\_papers/Kidawa%20et%20al.pdf](https://www.ccamlr.org/fr/system/files/science_journal_papers/Kidawa%20et%20al.pdf).
- Korczak-Abshire, M., Zmarz, A., Rodzewicz, M., Kycko, M., Karsznia, I., & Chwedorzewska, K. J. (2019). Study of fauna population changes on Penguin Island and Turret Point Oasis (King George Island, Antarctica) using an unmanned aerial vehicle. *Polar Biology*, 42, 217-224.
- Korne, N., Flemming, S. A., Smith, P. A., & Nol, E. (2020). Applying structure-from-motion habitat reconstruction and GIS terrain analysis to test hypotheses about nest-site selection by shorebirds. *Journal of Field Ornithology*, 91(4), 421-432.
- Koski, W. R., Abgrall, P. A., & Yazvenko, S. B. (2010). An inventory and evaluation of unmanned aerial systems for offshore surveys of marine mammals. *J. Cetacean Res. Manage.*, 11(3), 239-247.
- Koski, W. R., Gamage, G., Davis, A. R., Mathews, T., LeBlanc, B., & Ferguson, S. H. (2015). Evaluation of UAS for photographic re-identification of bowhead whales, *Balaena mysticetus*. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 3(1), 22-29.
- Koski, W. R., Allen, T., Ireland, D., Buck, G., Smith, P. R., Macrander, A. M., ... & McDonald, T. L. (2009). Evaluation of an unmanned airborne system for monitoring marine mammals. *Aquatic Mammals*, 35(3), 347.
- Krause, D. J., Hinke, J. T., Goebel, M. E., & Perryman, W. L. (2021). Drones minimize Antarctic predator responses relative to ground survey methods: an appeal for context in policy advice. *Frontiers in Marine Science*, 8, 152.
- Kudo, H., Koshino, Y., Eto, A., Ichimura, M., & Kaeriyama, M. (2012). Cost-effective accurate estimates of adult chum salmon, *Oncorhynchus keta*, abundance in a Japanese river using a radio-controlled helicopter. *Fisheries Research*, 119, 94-98.
- Kuhlmann, K., Fontaine, A., Brisson-Curadeau, É., Bird, D. M., & Elliott, K. H. (2022). Miniaturization eliminates detectable impacts of drones on bat activity. *Methods in Ecology and Evolution*, 13(4), 842-851.
- La Vigne, H., Charron, G., Rachiele-Tremblay, J., Rancourt, D., Nyberg, B., & Lussier Desbiens, A. (2022). Collecting critically endangered cliff plants using a drone-based sampling manipulator. *Scientific reports*, 12(1), 14827.
- Laliberte, A. S., Goforth, M. A., Steele, C. M., & Rango, A. (2011). Multispectral remote sensing from unmanned aircraft: Image processing workflows and applications for rangeland environments. *Remote Sensing*, 3(11), 2529-2551.
- Landeo-Yauri, S. S., Ramos, E. A., Castelblanco-Martínez, D. N., Niño-Torres, C. A., & Searle, L. (2020). Using small drones to photo-identify Antillean manatees: A novel method for monitoring an endangered marine mammal in the Caribbean Sea. *Endangered Species Research*, 41, 79-90.
- Larsen, G. D., Seymour, A. C., Richmond, E. L., Divine, L. M., Moreland, E. E., Newton, E., ... & Johnston, D. W. (2022). Drones reveal spatial patterning of sympatric Alaskan pinniped species and drivers of their local distributions. *Drone Systems and Applications*, 10(1), 235-255.
- Lee, W. Y., Park, M., & Hyun, C. U. (2019). Detection of two Arctic birds in Greenland and an endangered bird in Korea using RGB and thermal cameras with an unmanned aerial vehicle (UAV). *PLoS One*, 14(9), e0222088.

- Lefcourt, A. M., Siemens, M. C., & Rivadeneira, P. (2019). Optical parameters for using visible-wavelength reflectance or fluorescence imaging to detect bird excrements in produce fields. *Applied Sciences*, 9(4), 715.
- Lehmann, J. R., Prior, M. D., de Paula, L. F., Azevedo, L., Porembski, S., Buttschardt, T. K., & Solar, R. (2022). Using drone imagery to upscale estimates of water capacity in tank bromeliads on steep neotropical inselbergs. *Austral Ecology*, 47(2), 196-202.
- Lenzi, J., Barnas, A. F., ElSaid, A. A., Desell, T., Rockwell, R. F., & Ellis-Felege, S. N. (2023). Artificial intelligence for automated detection of large mammals creates path to upscale drone surveys. *Scientific Reports*, 13(1), 947.
- Leonardo, M., Jensen, A. M., Coopmans, C., McKee, M., & Chen, Y. (2013, August). A miniature wildlife tracking UAV payload system using acoustic biotelemetry. In *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (Vol. 55911, p. V004To8A056)*. American Society of Mechanical Engineers.
- Letessier, T. B., Bouchet, P. J., & Meeuwig, J. J. (2017). Sampling mobile oceanic fishes and sharks: implications for fisheries and conservation planning. *Biological Reviews*, 92(2), 627-646.
- Levy, J., Hunter, C., Lukaczyk, T., & Franklin, E. C. (2018). Assessing the spatial distribution of coral bleaching using small unmanned aerial systems. *Coral Reefs*, 37, 373-387.
- Lhoest, S., Linchant, J., Quevauvillers, S., Vermeulen, C., & Lejeune, P. (2015). How many hippos (HOMHIP): algorithm for automatic counts of animals with infra-red thermal imagery from UAV. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40.
- Li, L., Tietze, D. T., Fritz, A., Lü, Z., Bürgi, M., & Storch, I. (2018). Rewilding cultural landscape potentially puts both avian diversity and endemism at risk: A Tibetan Plateau case study. *Biological Conservation*, 224, 75-86.
- Li, M., Yan, E., Zhou, H., Zhu, J., Jiang, J., & Mo, D. (2022). A novel method for cliff vegetation estimation based on the unmanned aerial vehicle 3D modeling. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1006795.
- Li, X., Huang, H., & Savkin, A. V. (2022). Autonomous navigation of an aerial drone to observe a group of wild animals with reduced visual disturbance. *IEEE Systems Journal*, 16(2), 3339-3348.
- Li, Y., Fu, B., Sun, X., Fan, D., Wang, Y., He, H., ... & Yao, Y. (2022). Comparison of Different Transfer Learning Methods for Classification of Mangrove Communities Using MCCUNet and UAV Multispectral Images. *Remote Sensing*, 14(21), 5533.
- Liang, Y. J., Kuo, H., Giordano, A. J., & Pei, K. J. C. (2020). Seasonal variation in herd composition of the Formosan sika deer (*Cervus nippon taiouanus*) in a forest-grassland mosaic habitat of southern Taiwan. *Global Ecology and Conservation*, 24, e01283.
- Lin, Y. L. (2021). Semi-automatic classification of tree species using a combination of RGB drone imagery and mask RCNN: case study of the Highveld region in Eswatini (Doctoral dissertation).
- Linchant, J., Lisein, J., Semeki, J., Lejeune, P., & Vermeulen, C. (2015). Are unmanned aircraft systems (UAS s) the future of wildlife monitoring? A review of accomplishments and challenges. *Mammal Review*, 45(4), 239-252.
- Linchant, J., Lejeune, P., & Vermeulen, C. (2014). Les drones au secours de la grande faune menacée de RDC. *Parcs et Réserves*, 69(3).
- Linchant, J., Vermeulen, C., Lisein, J., Lejeune, P., & Bouche, P. (2013, August). Using drones to count the elephants: a new approach of wildlife inventories. In *31st Congress of the International Union of Game Biologists*.
- Lisein, J., Linchant, J., Lejeune, P., Bouché, P., & Vermeulen, C. (2013). Aerial surveys using an unmanned aerial system (UAS): comparison of different methods for estimating the surface area of sampling strips. *Tropical Conservation Science*, 6(4), 506-520.
- Liu, J., Hossain, M. D., & Chen, D. (2021). a Procedure for Identifying Invasive Wild Parsnip Plants Based on Visible Bands from Uav Images. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43, 173-181.
- Liu, M., Deng, H., & Dong, W. (2022). Identification of Mangrove Invasive Plant *Derris trifoliata* Using UAV Images and Deep Learning Algorithms. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 15, 10017-10026.
- Liu, T., Sun, Y., Wang, C., Zhang, Y., Qiu, Z., Gong, W., ... & Duan, X. (2021). Unmanned aerial vehicle and artificial intelligence revolutionizing efficient and precision sustainable forest management. *Journal of Cleaner Production*, 311, 127546.
- Lobermeier, S., Moldenhauer, M., Peter, C. M., Slominski, L., Tedesco, R. A., Ver Meer, M., ... & Stewart, A. H. (2015). Mitigating avian collision with power lines: a proof of concept for installation of line markers via unmanned aerial vehicle. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 3(4), 252-258.
- Lobo Torres, D., Queiroz Feitosa, R., Nigri Happ, P., Elena Cué La Rosa, L., Marcato Junior, J., Martins, J., ... & Liesenberg, V. (2020). Applying fully convolutional architectures for semantic segmentation of a single tree species in urban environment on high resolution UAV optical imagery. *Sensors*, 20(2), 563.
- Löcken, H., Fischer, O. W., Selz, J., & Boppré, M. (2020). 'Drone-Netting' for sampling live insects. *Journal of Insect Science*, 20(5), 3.
- Lohit, G. V. S., & Bisht, D. (2021, April). Seed Dispenser using Drones and Deep Learning Techniques for Reforestation. In *2021 5th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)* (pp. 1275-1283). IEEE

- Longmore, S. N., Collins, R. P., Pfeifer, S., Fox, S. E., Mulero-Pázmány, M., Bezombes, F., ... & Wich, S. A. (2017). Adapting astronomical source detection software to help detect animals in thermal images obtained by unmanned aerial systems. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8-10), 2623-2638.
- López, J.J. & M. Mulero-Pázmány, (2019). Drones for conservation in protected areas: Present and future. *Drones*, 3(1), 10.
- Lorah, P., Ready, A., & Rinn, E. (2018). Using drones to generate new data for conservation insights. *International Journal of Geospatial and Environmental Research*, 5(2), 2.
- Lu, B., & He, Y. (2017). Species classification using Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-acquired high spatial resolution imagery in a heterogeneous grassland. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 128, 73-85.
- Lu, V., Xu, F., & Turghan, M. A. (2021). Przewalski's Horses (*Equus ferus przewalskii*) Responses to Unmanned Aerial Vehicles Flights under Semireserve Conditions: Conservation Implication. *International Journal of Zoology*, 1-6.
- Lucieer, A., Turner, D., King, D. H., & Robinson, S. A. (2014). Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) to capture micro-topography of Antarctic moss beds. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 27, 53-62.
- Lyons, M., Brandis, K., Wilshire, J., Murray, N., McCann, J., Kingsford, R., & Callaghan, C. T. (2019). A protocol for using drones to assist monitoring of large breeding bird colonies. *Methods in Ecology and Evolution*, 10(7), 1024-1035.
- Lyons, M. B., Brandis, K. J., Murray, N. J., Wilshire, J. H., McCann, J. A., Kingsford, R. T., & Callaghan, C. T. (2019). Monitoring large and complex wildlife aggregations with drones. *Methods in Ecology and Evolution*, 10(7), 1024-1035.
- Lyons, M., Brandis, K., Callaghan, C., McCann, J., Mills, C., Ryall, S., & Kingsford, R. (2018). Bird interactions with drones, from individuals to large colonies. *Australian Field Ornithology*, 35, 51-56.
- Lyu, X., Li, X., Dang, D., Dou, H., Wang, K., & Lou, A. (2022). Unmanned aerial vehicle (uav) remote sensing in grassland ecosystem monitoring: A systematic review. *Remote Sensing*, 14(5), 1096.
- Science, 6, 727.
- Madin, E. M., Darling, E. S., & Hardt, M. J. (2019). Emerging technologies and coral reef conservation: Opportunities, challenges, and moving forward. *Frontiers in Marine Science*, 6, 727.
- Magness, D. R., Eskelin, T., Laker, M., & Renner, H. M. (2019). Evaluation of small unmanned aerial systems as a census tool for Aleutian Tern *Onychoprion aleuticus* colonies. *Marine Ornithology*, 47, 11-16.
- Malenovsky, Z., Lucieer, A., King, D. H., Turnbull, J. D., & Robinson, S. A. (2017). Unmanned aircraft system advances health mapping of fragile polar vegetation. *Methods in Ecology and Evolution*, 8(12), 1842-1857.
- Mallory, M. L., Dey, C. J., McIntyre, J., Pratte, I., Mallory, C. L., Francis, C. M., ... & Provencher, J. F. (2020). Long-term declines in the size of Northern Fulmar (*Fulmarus glacialis*) colonies on Eastern Baffin Island, Canada. *Arctic*, 73(2), 187-194.
- Mancini, F., Dubbini, M., Gattelli, M., Stecchi, F., Fabbri, S., & Gabbianelli, G. (2013). Using unmanned aerial vehicles (UAV) for high-resolution reconstruction of topography: The structure from motion approach on coastal environments. *Remote sensing*, 5(12), 6880-6898.
- Manfreda, S., McCabe, M. F., Miller, P. E., Lucas, R., Pajuelo Madrigal, V., Mallinis, G., ... & Toth, B. (2018). On the use of unmanned aerial systems for environmental monitoring. *Remote sensing*, 10(4), 641.
- Mangewa, L. J., Ndakidemi, P. A., & Munishi, L. K. (2019). Integrating UAV technology in an ecological monitoring system for community wildlife management areas in Tanzania. *Sustainability*, 11(21), 6116.
- Mangewa, L. J., Ndakidemi, P. A., Alward, R. D., Kija, H. K., Bukombe, J. K., Nasolwa, E. R., & Munishi, L. K. (2022). Comparative assessment of UAV and sentinel-2 NDVI and GNDVI for preliminary diagnosis of habitat conditions in Burunge wildlife management area, Tanzania. *Earth*, 3(3), 769-787.
- Marcaccio, J. V., Markle, C. E., & Chow-Fraser, P. (2015). Unmanned aerial vehicles produce high-resolution, seasonally relevant imagery for classifying wetland vegetation. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40, 249-256.
- Marchowski, D. (2021). Drones, automatic counting tools, and artificial neural networks in wildlife population censusing. *Ecology and evolution*, 11(22), 16214.
- Markowitz, E. M., Nisbet, M. C., Danylchuk, A. J., & Engelbourg, S. I. (2017). What's that buzzing noise? Public opinion on the use of drones for conservation science. *BioScience*, 67(4), 382-385.
- Marris, E. (2013). Drones in science: Fly and bring me data. *Nature*, 498: 156-158.
- Martin, J., Edwards, H. H., Burgess, M. A., Percival, H. F., Fagan, D. E., Gardner, B. E., ... & Rambo, T. J. (2012). Estimating distribution of hidden objects with drones: From tennis balls to manatees. *PLoS One*, 7(6), e38882.
- Marzialetti, F., Frate, L., De Simone, W., Frattaroli, A. R., Acosta, A. T. R., & Carranza, M. L. (2021). Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-based mapping of *Acacia saligna* invasion in the Mediterranean coast. *Remote Sensing*, 13(17), 3361.
- Mattern, T., Rexer-Huber, K., Parker, G., Amey, J., Green, C. P., Tennyson, A. J., ... & Thompson, D. R. (2021). Erect-crested penguins on the Bounty Islands: population size and trends determined from ground counts and drone surveys. *Notornis*, 68, 37-50.
- Maurya, N. K., Tripathi, A. K., Chauhan, A., Pandey, P. C., & Lamine, S. (2022). Recent advancement and role of drones in forest monitoring: Research and practices. *Advances in Remote Sensing for Forest Monitoring*, 221-254.

- Mayr, M. J., Maß, S., Ofner, E., & Samimi, C. (2018). Disturbance feedbacks on the height of woody vegetation in a savannah: a multi-plot assessment using an unmanned aerial vehicle (UAV). *International Journal of Remote Sensing*, 39(14), 4761-4785.
- Mazumdar, S. (2022). Drone Applications in Wildlife Research—A Synoptic Review. In *Environmental Informatics: Challenges and Solutions* (pp. 237-257). Singapore: Springer Nature Singapore.
- McCann, J. A., Keith, D. A., & Kingsford, R. T. (2022). Measuring plant biomass remotely using drones in arid landscapes. *Ecology and Evolution*, 12(5), e8891.
- McCarthy, E. D. (2020). Investigating the use of drone-acquired thermal imagery as an effective new tool to inform the management and conservation of flying-fox colonies.
- McCarthy, E. D., Martin, J. M., Boer, M. M., & Welbergen, J. A. (2021). Drone-based thermal remote sensing provides an effective new tool for monitoring the abundance of roosting fruit bats. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 7(3), 461-474.
- McClelland, G. T., Bond, A. L., Sardana, A., & Glass, T. (2016). Rapid population estimate of a surface-nesting seabird on a remote island using a low-cost unmanned aerial vehicle. *Marine Ornithology*, 44, 215-220.
- McEvoy, J. F., Hall, G. P., & McDonald, P. G. (2016). Evaluation of unmanned aerial vehicle shape, flight path and camera type for waterfowl surveys: disturbance effects and species recognition. *PeerJ*, 4, e1831.
- McConville, E. C., Oancea, A. I., Enright, E. M., Brown, T. C., & Henriques, J. J. (2023). Methods for the Spatial Analysis of Invasive Species and Ecosystem Fragmentation at Conservation Sites in Malta Using Drones. In *2023 Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS)* (pp. 325-329). IEEE.
- McIntosh, R. R., Holmberg, R., & Dann, P. (2018). Looking without landing—using remote piloted aircraft to monitor fur seal populations without disturbance. *Frontiers in Marine Science*, 5, 202.
- McKellar, A. E. (2022). Patterns of inter-and intraspecific nest dispersion in colonies of gulls and grebes based on drone imagery. *Journal of Field Ornithology*, 93(2), 4.
- McKellar, A. E., Shephard, N. G., & Chabot, D. (2021). Dual visible-thermal camera approach facilitates drone surveys of colonial marshbirds. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 7(2), 214-226.
- McMahon, M. C., Ditmer, M. A., Isaac, E. J., Moore, S. A., & Forester, J. D. (2021). Evaluating unmanned aerial systems for the detection and monitoring of moose in northeastern Minnesota. *Wildlife Society Bulletin*, 45(2), 312-324.
- Mead, L., & Arthur, M. (2020). Environmental condition in British moorlands: quantifying the life cycle of *Calluna vulgaris* using UAV aerial imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 41(2), 573-583.
- Mesquita, G. P., Mulero-Pázmány, M., Wich, S. A., & Rodríguez-Teijeiro, J. D. (2022). Terrestrial megafauna response to drone noise levels in ex situ areas. *Drones*, 6(11), 333.
- Messinger, M., Asner, G. P., & Silman, M. (2016). Rapid assessments of Amazon Forest structure and biomass using small unmanned aerial systems. *Remote Sensing*, 8(8), 615.
- Michez, A., Broset, S., & Lejeune, P. (2021). Ears in the sky: Potential of drones for the bioacoustic monitoring of birds and bats. *Drones*, 5(1), 9.
- Michez, A., Piégay, H., Lisein, J., Claessens, H., & Lejeune, P. (2016). Classification of riparian forest species and health condition using multi-temporal and hyperspatial imagery from unmanned aerial system. *Environmental monitoring and assessment*, 188, 1-19.
- Milne, S., Martin, J. G., Reynolds, G., Vairappan, C. S., Slade, E. M., Brodie, J. F., ... & Burslem, D. F. (2021). Drivers of bornean orangutan distribution across a multiple-use tropical landscape. *Remote Sensing*, 13(3), 458.
- Mitchell, J. D., Scott-Holland, T. B., & Butcher, P. A. (2022). Factors Affecting Shark Detection from Drone Patrols in Southeast Queensland, Eastern Australia. *Biology*, 11(11), 1552.
- Mogstad, A. A., Johnsen, G., & Ludvigsen, M. (2019). Shallow-water habitat mapping using underwater hyperspectral imaging from an unmanned surface vehicle: A pilot study. *Remote Sensing*, 11(6), 685.
- Mokroš, M., Výboštok, J., Merganič, J., Hollaus, M., Barton, I., Koreň, M., ... & Čerňava, J. (2017). Early-stage Forest windthrow estimation based on unmanned aircraft system imagery. *Forests*, 8(9), 306.
- Monks, J. M., Wills, H. P., & Knox, C. D. (2022). Testing drones as a tool for surveying lizards. *Drones*, 6(8), 199.
- Monteiro, J. G., Jiménez, J. L., Gizzi, F., Příklad, P., Lefcheck, J. S., Santos, R. S., & Canning-Clode, J. (2021). Novel approach to enhance coastal habitat and biotope mapping with drone aerial imagery analysis. *Scientific Reports*, 11(1), 574.
- Morales, G., Kemper, G., Sevillano, G., Arteaga, D., Ortega, I., & Telles, J. (2018). Automatic segmentation of *Mauritia flexuosa* in unmanned aerial vehicle (UAV) imagery using deep learning. *Forests*, 9(12), 736.
- Moreland, E. E., Cameron, M. F., Angliss, R. P., & Boveng, P. L. (2015). Evaluation of a ship-based unoccupied aircraft system (UAS) for surveys of spotted and ribbon seals in the Bering Sea pack ice. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 3(3), 114-122.
- Moreno, A., Bhattacharyya, A., Jansen, L., Arkeman, Y., Hartanto, R., & Kleinke, M. (2019). Environmental engineering and sustainability for smart agriculture: The application of UAV-based remote sensing to detect biodiversity in oil palm plantations. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 335, No. 1, p. 012008). IOP Publishing.

- Moudrý, V., Urban, R., Štroner, M., Komárek, J., Brouček, J., & Prošek, J. (2019). Comparison of a commercial and home-assembled fixed-wing UAV for terrain mapping of a post-mining site under leaf-off conditions. *International Journal of Remote Sensing*, 40(2), 555-572.
- Mulero-Pázmány, M., Negro, J. J., & Ferrer, M. (2013). A low cost way for assessing bird risk hazards in power lines: Fixed-wing small unmanned aircraft systems. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 2(1), 5-15.
- Mulero-Pázmány, M., Martínez-de Dios, J. R., Popa-Lisseanu, A. G., Gray, R. J., Alarcón, F., Sánchez-Bedoya, C. A., ... & Marrón, P. J. (2022). Development of a fixed-wing drone system for aerial insect sampling. *Drones*, 6(8), 189.
- Mulero-Pázmány, M., Jenni-Eiermann, S., Strebel, N., Sattler, T., Negro, J. J., & Tablado, Z. (2017). Unmanned aircraft systems as a new source of disturbance for wildlife: A systematic review. *PLoS one*, 12(6), e0178448.
- Müllerová, J., Brůna, J., Dvořák, P., Bartaloš, T., & Vítková, M. (2016). Does the data resolution/origin matter? Satellite, airborne and UAV imagery to tackle plant invasions. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 41, 903-908.
- Müllerová, J., Bartaloš, T., Brůna, J., Dvořák, P., & Vítková, M. (2017). Unmanned aircraft in nature conservation: an example from plant invasions. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8-10), 2177-2198.
- Murfitt, S. L., Allan, B. M., Bellgrove, A., Rattray, A., Young, M. A., & Ierodiaconou, D. (2017). Applications of unmanned aerial vehicles in intertidal reef monitoring. *Scientific reports*, 7(1), 10259.
- Musci, M. A., Persello, C., & Lingua, A. M. (2020). UAV images and deep-learning algorithms for detecting flavescence doree disease in grapevine orchards. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43, 1483-1489.
- Mussier, F. (2019). Une législation qui s'adapte. *Espaces naturels*, 65. Disponible sur : <http://www.espaces-naturels.info/legislation-qui-s-adapte>
- Mustafa, O., Barbosa, A., Krause, D. J., Peter, H. U., Vieira, G., & Rümmler, M. C. (2018). State of knowledge: Antarctic wildlife response to unmanned aerial systems. *Polar Biology*, 41, 2387-2398.
- Nababan, B., Mastu, L. O. K., Idris, N. H., & Panjaitan, J. P. (2021). Shallow-water benthic habitat mapping using drone with object-based image analyses. *Remote Sensing*, 13(21), 4452.
- Naggs, F. (2017). Saving living diversity in the face of the unstoppable 6th mass extinction: A call for urgent international action. *the journal of population and sustainability*, 1(2), 67-81.
- Näsi, R., Honkavaara, E., Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Blomqvist, M., Litkey, P., Hakala, T., ... & Holopainen, M. (2015). Using UAV-based photogrammetry and hyperspectral imaging for mapping bark beetle damage at tree-level. *Remote Sensing*, 7(11), 15467-15493.
- National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA], (2015). Studying killer whales with an unmanned aerial vehicle. Disponible en ligne à : <https://www.fisheries.noaa.gov/feature-story/studying-killer-whales-unmanned-aerial-vehicle>.
- Navarro, A., Young, M., Allan, B., Carnell, P., Macreadie, P., & Ierodiaconou, D. (2020). The application of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) to estimate above-ground biomass of mangrove ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 242, 111747.
- Nazir, S., & Kaleem, M. (2021). Advances in image acquisition and processing technologies transforming animal ecological studies. *Ecological Informatics*, 61, 101212.
- Neumann, C., Behling, R., Schindhelm, A., Itzerott, S., Weiss, G., Wichmann, M., & Müller, J. (2020). The colors of heath flowering—quantifying spatial patterns of phenology in *Calluna* life-cycle phases using high-resolution drone imagery. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 6(1), 35-51.
- Ngabinzeke Semeki, J., Linchant, J., Djami, Y. K., Poulain, F., Fonteyn, D., Lejeune, P., & Vermeulen, C. (2022, October). Utilisation des drones et caméras-traps pour le suivi des activités humaines et de la faune en RDC : Cas des aires protégées. In *SIDE-EVENT UNIKIN PRE-COP 27*.
- Ngabinzeke, J. S., Linchant, J., Quevauvillers, S., Kahindo Muhongya, J. M., Lejeune, P., & Vermeulen, C. (2016). Potentiel des véhicules aériens sans pilote dans la détection des activités humaines illégales dans les aires protégées en République Démocratique du Congo. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 4(2), 151-159.
- Niethammer, U., James, M. R., Rothmund, S., Travelletti, J., & Joswig, M. (2012). UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results. *Engineering Geology*, 128, 2-11.
- Niwa, H., (2021). Assessing the activity of deer and their influence on vegetation in a wetland using automatic cameras and low altitude remote sensing (LARS). *European Journal of Wildlife Research*, 67, 3.
- Nowak, M. M., Dziób, K., & Bogawski, P. (2018). Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in environmental biology: A review. *European Journal of Ecology*, 4(2), 56-74.
- Nuhlíčková, S., Svetlík, J., Šibíková, M., Jarolímek, I., & Zuna-Kratky, T. (2021). Current distribution, microhabitat requirements and vulnerability of the Keeled Plump Bush-cricket (*Isophya costata*) at the north-western periphery of its range. *Journal of Insect Conservation*, 25, 65-76.
- Nuwantha, M. B., Jayalath, C. N., Rathnayaka, M. P., Fernando, D. C., Rupasinghe, L., & Chethana, M. (2022). A Drone-Based Approach for Deforestation Monitoring. In *2022 13th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)* (pp. 1-6). IEEE

- O'Donoghue, P. & Rutz, C. (2016). Real-time anti-poaching tags could help prevent imminent species extinctions. *Journal of Applied Ecology*, 53, 5-10.
- Oddi, L., Cremonese, E., Ascari, L., Filippa, G., Galvagno, M., Serafino, D., & Cella, U. M. D. (2021). Using UAV imagery to detect and map woody species encroachment in a subalpine grassland: advantages and limits. *Remote Sensing*, 13(7), 1239.
- Oishi, Y., Habaragamuwa, H., Zhang, Y., Sugiura, R., Asano, K., Akai, K., ... & Fujimoto, T. (2021). Automated abnormal potato plant detection system using deep learning models and portable video cameras. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 104, 102509.
- Olariu, H. G., Malambo, L., Popescu, S. C., Virgil, C., & Wilcox, B. P. (2022). Woody plant encroachment: Evaluating methodologies for semiarid woody species classification from drone images. *Remote Sensing*, 14(7), 1665.
- Old, J. M., Lin, S. H., & Franklin, M. J. (2019). Mapping out bare-nosed wombat (*Vombatus ursinus*) burrows with the use of a drone. *BMC ecology*, 19(1), 1-10.
- Oldeland, J., Große-Stoltenberg, A., Naftal, L., & Strohbach, B. J. (2017). The potential of UAV derived image features for discriminating savannah tree species. *The Roles of Remote Sensing in Nature Conservation: A Practical Guide and Case Studies*, 183-201.
- Oldeland, J., Revermann, R., Luther-Mosebach, J., Buttschardt, T., & Lehmann, J. R. (2021). New tools for old problems—comparing drone-and field-based assessments of a problematic plant species. *Environmental monitoring and assessment*, 193(2), 90.
- Oleksyn, S., Tosetto, L., Raoult, V., Joyce, K. E., & Williamson, J. E. (2021). Going batty: The challenges and opportunities of using drones to monitor the behaviour and habitat use of rays. *Drones*, 5(1), 12.
- Oliveira, J.S.F., Georgiadis, G., Campello, S., Brandao R.A., & Ciuti, S. (2017). Improving river dolphin monitoring using aerial surveys. *Ecosphere*, 8 (8), 1912.
- Oliveira-da-Costa, M., Marmontel, M., Da-Rosa, D. S., Coelho, A., Wich, S., Mosquera-Guerra, F., & Trujillo, F. (2020). Effectiveness of unmanned aerial vehicles to detect Amazon dolphins. *Oryx*, 54(5), 696-698.
- Olsoy, P. J., Shipley, L. A., Rachlow, J. L., Forbey, J. S., Glenn, N. F., Burgess, M. A., & Thornton, D. H. (2018). Unmanned aerial systems measure structural habitat features for wildlife across multiple scales. *Methods in Ecology and Evolution*, 9(3), 594-604.
- Oosthuizen, W.C., L. Krüger, W. Jouanneau et A.D. Lowther, (2020). Unmanned aerial vehicle (UAV) survey of the Antarctic shag (*Leucocarbo Bransfieldensis*) breeding colony at Harmony Point, Nelson Island, South Shetland Islands. *Polar Biology*, 43 (2): 187-191.
- Ore, J. P., Elbaum, S., Burgin, A., & Detweiler, C. (2015). Autonomous aerial water sampling. *Journal of Field Robotics*, 32(8), 1095-1113.
- Otero, V., Van De Kerchove, R., Satyanarayana, B., Martínez-Espinosa, C., Fisol, M. A. B., Ibrahim, M. R. B., ... & Dahdouh-Guebas, F. (2018). Managing mangrove forests from the sky: Forest inventory using field data and Unmanned Aerial Vehicle (UAV) imagery in the Matang Mangrove Forest Reserve, peninsular Malaysia. *Forest ecology and management*, 411, 35-45.
- Ott, M.C., (2020). Using unmanned aerial systems (drones) with a thermal sensor to map and count deer population. *Williams Honors College, Honors Research Projects*, 1068, 27 p.
- Öztürk, A. E., & Erçelebi, E. (2021). Real UAV-bird image classification using CNN with a synthetic dataset. *Applied Sciences*, 11(9), 3863.
- Pagacz, S., & Witczuk, J. (2016). Wykorzystanie samolotów bezzałogowych i termowizji do nocnej inwentaryzacji kopytnych. [Using drones and thermal imaging for night ungulate surveys in forests]. *Studia i Materiały Centrum Edukacji Przyrodniczo-Leśnej*, 18(4 [49A]). Disponible en ligne à: <http://agro.icm.edu.pl/agro/element/bwmeta1.element.agro-553ca404-259b-4288-837d-767a1a69262b?q=bwmeta1.element.agro-cefcb80f-c2a8-4f2ba091-6e264af3d65e;11&qt=CHILDREN-STATELESS>.
- Pande-Chhetri, R., Abd-Elrahman, A., Liu, T., Morton, J., & Wilhelm, V. L. (2017). Object-based classification of wetland vegetation using very high-resolution unmanned air system imagery. *European Journal of Remote Sensing*, 50(1), 564-576.
- Paneque-Gálvez, J., McCall, M. K., Napoletano, B. M., Wich, S. A., & Koh, L. P. (2014). Small drones for community-based forest monitoring: An assessment of their feasibility and potential in tropical areas. *Forests*, 5(6), 1481-1507.
- Park, J. Y., Muller-Landau, H. C., Lichstein, J. W., Rifai, S. W., Dandois, J. P., & Bohlman, S. A. (2019). Quantifying leaf phenology of individual trees and species in a tropical forest using unmanned aerial vehicle (UAV) images. *Remote Sensing*, 11(13), 1534.
- Parsons, M., Bratanov, D., Gaston, K. J., & Gonzalez, F. (2018). UAVs, hyperspectral remote sensing, and machine learning revolutionizing reef monitoring. *Sensors*, 18(7), 2026.
- Peciña, M. V., Bergamo, T. F., Ward, R. D., Joyce, C. B., & Sepp, K. (2021). A novel UAV-based approach for biomass prediction and grassland structure assessment in coastal meadows. *Ecological Indicators*, 122, 107227.
- Penny, S. G., White, R. L., Scott, D. M., MacTavish, L., & Pernetta, A. P. (2019). Using drones and sirens to elicit avoidance behaviour in white rhinoceros as an anti-poaching tactic. *Proceedings of the Royal Society B*, 286(1907), 20191135.

- Pérez-Luque, A. J., Ramos-Font, M. E., Tognetti Barbieri, M. J., Tarragona Pérez, C., Calvo Renta, G., & Robles Cruz, A. B. (2022). Vegetation Cover Estimation in Semi-Arid Shrublands after Prescribed Burning: Field-Ground and Drone Image Comparison. *Drones*, 6(11), 370.
- Perroy, R. L., Sullivan, T., & Stephenson, N. (2017). Assessing the impacts of canopy openness and flight parameters on detecting a sub-canopy tropical invasive plant using a small unmanned aerial system. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 125, 174-183.
- Petrich, L., Lohrmann, G., Neumann, M., Martin, F., Frey, A., Stoll, A., & Schmidt, V. (2020). Detection of *Colchicum autumnale* in drone images, using a machine-learning approach. *Precision Agriculture*, 21, 1291-1303.
- Piel, A. K., Cruncheon, A., Knot, I. E., Chalmers, C., Fergus, P., Mulero-Pázmány, M., & Wich, S. A. (2022). Noninvasive technologies for primate conservation in the 21st century. *International Journal of Primatology*, 1-35.
- Pietsch, M., Henning, M., Mader, D., Westfeld, P., & Etterer, F. (2018). Using unmanned aerial vehicles (UAV) for monitoring biodiversity measures in periurban and agrarian landscapes. *Journal of Digital Landscape Architecture*, 3, 273-282.
- Pimm, S. L., Alibhai, S., Bergl, R., Dehgan, A., Giri, C., Jewell, Z., ... & Loarie, S. (2015). Emerging technologies to conserve biodiversity. *Trends in ecology & evolution*, 30(11), 685-696.
- Pinton, D., Canestrelli, A., Wilkinson, B., Ifju, P., & Ortega, A. (2020). A new algorithm for estimating ground elevation and vegetation characteristics in coastal salt marshes from high-resolution UAV-based LiDAR point clouds. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(14), 3687-3701.
- Pirotta, V., Smith, A., Ostrowski, M., Russell, D., Jonsen, I. D., Grech, A., & Harcourt, R. (2017). An economical custom-built drone for assessing whale health. *Frontiers in Marine Science*, 4, 425.
- Polensky, J., Regenda, J., Adamek, Z., & Cisar, P. (2022). Prospects for the monitoring of the great cormorant (*Phalacrocorax carbo sinensis*) using a drone and stationary cameras. *Ecological Informatics*, 70, 101726.
- Pollock, T. I., Hunter, D. O., Hocking, D. P., & Evans, A. R. (2022). Eye in the sky: observing wild dingo hunting behaviour using drones. *Wildlife Research*, 50(3), 212-223.
- Pomeroy, P., O'Connor, L., & Davies, P. (2015). Assessing use of and reaction to unmanned aerial systems in gray and harbor seals during breeding and molt in the UK. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 3(3), 102-113.
- Potapov, E. R., Utekhina, I. G., McGrady, M. J., & Rimlinger, D. (2013). Usage of UAV for Surveying Steller's Sea Eagle Nests. *Raptors Conservation*, 27: 253-260.
- Potvin, F. & Breton, L. (2005). Testing two aerial survey techniques on deer in fenced enclosures—Visual double counts and thermal infrared sensing. *Wildlife Society Bulletin*, 33 : 317-325. Disponible en ligne à : <https://www.jstor.org/stable/3784871>.
- Pöysä, H., Kotilainen, J., Väänänen, V. M., & Kunasranta, M. (2018). Estimating production in ducks: a comparison between ground surveys and unmanned aircraft surveys. *European journal of wildlife research*, 64, 1-4.
- Preston, T. M., Wildhaber, M. L., Green, N. S., Albers, J. L., & DeBenedetto, G. P. (2021). Enumerating white-tailed deer using unmanned aerial vehicles. *Wildlife Society Bulletin*, 45(1), 97-108.
- Proença, B., Frappart, F., Lubac, B., Marieu, V., Ygorra, B., Bombrun, L., ... & Sottolichio, A. (2019). Potential of high-resolution Pléiades imagery to monitor salt marsh evolution after *Spartina* invasion. *Remote Sensing*, 11(8), 968.
- Prošek, J., & Šimová, P. (2019). UAV for mapping shrubland vegetation: Does fusion of spectral and vertical information derived from a single sensor increase the classification accuracy? *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 75, 151-162.
- Prosekov, A., Kuznetsov, A., Rada, A., & Ivanova, S. (2020). Methods for monitoring large terrestrial animals in the wild. *Forests*, 11(8), 808.
- Provost, E. J., Butcher, P. A., Coleman, M. A., & Kelaher, B. P. (2020). Assessing the viability of small aerial drones to quantify recreational fishers. *Fisheries management and ecology*, 27(6), 615-621.
- Puliti, S., Ørka, H. O., Gobakken, T., & Næsset, E. (2015). Inventory of small forest areas using an unmanned aerial system. *Remote Sensing*, 7(8), 9632-9654.
- Puttock, A. K., Cunliffe, A. M., Anderson, K., & Brazier, R. E. (2015). Aerial photography collected with a multirotor drone reveals impact of Eurasian beaver reintroduction on ecosystem structure. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 3(3), 123-130.
- Qin, B., Sun, F., Shen, W., Dong, B., Ma, S., Huo, X., & Lan, P. (2023). Deep Learning-Based Pine Nematode Trees' Identification Using Multispectral and Visible UAV Imagery. *Drones*, 7(3), 183.
- Radiansyah, S., Kusri, M. D., & Prasetyo, L. B. (2017). Quadcopter applications for wildlife monitoring. In *IOP Conference Series: Earth and environmental science* (Vol. 54, No. 1, p. 012066). IOP Publishing.
- Ramos, E. A., Maloney, B., Magnasco, M. O., & Reiss, D. (2018). Bottlenose dolphins and Antillean manatees respond to small multi-rotor unmanned aerial systems. *Frontiers in Marine Science*, 5, 316.
- Rančić, K., Blagojević, B., Bezdan, A., Ivošević, B., Tubić, B., Vranešević, M., ... & Marko, O. (2023). Animal Detection and Counting from UAV Images Using Convolutional Neural Networks. *Drones*, 7(3), 179.

- Raoult, V., Colefax, A. P., Allan, B. M., Cagnazzi, D., Castelblanco-Martínez, N., Ierodiaconou, D., ... & Butcher, P. A. (2020). Operational protocols for the use of drones in marine animal research. *Drones*, Raoult, V., Toso, L., & Williamson, J. E. (2018). Drone-based high-resolution tracking of aquatic vertebrates. *Drones*, 2(4), 37.
- Ratcliffe, N., Guihen, D., Robst, J., Crofts, S., Stanworth, A., & Enderlein, P. (2015). A protocol for the aerial survey of penguin colonies using UAVs. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 3(3), 95-101.
- Reckling, W., Mitsova, H., Wegmann, K., Kauffman, G., & Reid, R. (2021). Efficient drone-based rare plant monitoring using a species distribution model and ai-based object detection. *Drones*, 5(4), 110.
- Redmon, J., & Farhadi, A. (2017). YOLO9000: better, faster, stronger. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 7263-7271).
- Rees, A. F., Avens, L., Ballorain, K., Bevan, E., Broderick, A. C., Carthy, R. R., ... & Godley, B. J. (2018). The potential of unmanned aerial systems for sea turtle research and conservation: a review and future directions. *Endangered Species Research*, 35, 81-100.
- Reintsma, K. M., McGowan, P. C., Callahan, C., Collier, T., Gray, D., Sullivan, J. D., & Prosser, D. J. (2018). Preliminary evaluation of behavioral response of nesting waterbirds to small unmanned aircraft flight. *Waterbirds*, 41(3), 326-331.
- Reis, B. P., Martins, S. V., Fernandes Filho, E. I., Sarcinelli, T. S., Gleriani, J. M., Marcatti, G. E., ... & Halassy, M. (2019). Management recommendation generation for areas under forest restoration process through images obtained by UAV and LiDAR. *Remote Sensing*, 11(13), 1508.
- Retallack, A., Finlayson, G., Ostendorf, B., & Lewis, M. (2022). Using deep learning to detect an indicator arid shrub in ultra-high-resolution UAV imagery. *Ecological Indicators*, 145, 109698.
- Rey, N., Volpi, M., Joost, S., & Tuia, D. (2017). Detecting animals in African Savanna with UAVs and the crowds. *Remote Sensing of Environment*, 200, 341-351.
- Rivas, A., Chamoso, P., González-Briones, A., & Corchado, J. M. (2018). Detection of cattle using drones and convolutional neural networks. *Sensors*, 18(7), 2048.
- Rieucou, G., Kiszka, J. J., Castillo, J. C., Mourier, J., Boswell, K. M., & Heithaus, M. R. (2018). Using unmanned aerial vehicle (UAV) surveys and image analysis in the study of large surface-associated marine species: a case study on reef sharks *Carcharhinus melanopterus* shoaling behaviour. *Journal of fish biology*, 93(1), 119-127.
- Rischette, A. C., Hovick, T. J., Elmore, R. D., & Geaumont, B. A. (2020). Use of small unmanned aerial systems for sharp-tailed grouse lek surveys. *Wildlife Biology*, 2020(2), 1-7.
- Rivas, A., Chamoso, P., González-Briones, A., & Corchado, J. M. (2018). Detection of cattle using drones and convolutional neural networks. *Sensors*, 18(7), 2048.
- Robinson, J. M., Harrison, P. A., Mavoa, S., & Breed, M. F. (2022). Existing and emerging uses of drones in restoration ecology. *Methods in Ecology and Evolution*, 13(9), 1899-1911.
- Robinson, N. J., Bigelow, W. F., Cuffley, J., Gary, M., Hoefler, S., Mills, S., ... & Miguel Blanco, A. (2020). Validating the use of drones for monitoring the abundance and behaviour of juvenile green sea turtles in mangrove creeks in The Bahamas. *Testudo*, 9(2), 24-35.
- Rodríguez, A., Negro, J. J., Mulero, M., Rodríguez, C., Hernández-Pliego, J., & Bustamante, J. (2012). The eye in the sky: combined use of unmanned aerial systems and GPS data loggers for ecological research and conservation of small birds. *PLoS One*, 7(12), e50336.
- Rodríguez, J., Zhang, C., Lizarazo, I., & Prieto, F. (2021). Automatic Detection and Mapping of Espeletia Plants from UAV Imagery. In *2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS* (pp. 2831-2834). IEEE.
- Rominger, K. R., DeNittis, A., & Meyer, S. E. (2021). Using drone imagery analysis in rare plant demographic studies. *Journal for Nature Conservation*, 62, 126020.
- Rominger, K., & Meyer, S. E. (2019). Application of UAV-based methodology for census of an endangered plant species in a fragile habitat. *Remote Sensing*, 11(6), 719.
- Rossiter, T., Furey, T., McCarthy, T., & Stengel, D. B. (2020). Application of multiplatform, multispectral remote sensors for mapping intertidal macroalgae: A comparative approach. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 30(8), 1595-1612.
- Rowe, C. E., Figueira, W. F., Kelaher, B. P., Giles, A., Mamo, L. T., Ah Yong, S. T., & Keable, S. J. (2022). Evaluating the effectiveness of drones for quantifying invasive upside-down jellyfish (*Cassiopea* sp.) in Lake Macquarie, Australia. *Plos one*, 17(1), e0262721.
- Rudge, M. L., Levick, S. R., Bartolo, R. E., & Erskine, P. D. (2021). Modelling the diameter distribution of savanna trees with drone-based LiDAR. *Remote Sensing*, 13(7), 1266.
- Rümmeler, M. C., Mustafa, O., Maercker, J., Peter, H. U., & Esefeld, J. (2016). Measuring the influence of unmanned aerial vehicles on Adélie penguins. *Polar Biology*, 39, 1329-1334.
- Rümmeler, M. C., Esefeld, J., Pfeifer, C., & Mustafa, O. (2021). Effects of UAV overflight height, UAV type, and season on the behaviour of emperor penguin adults and chicks. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 23, 100558.
- Rush, G. P., Clarke, L. E., Stone, M., & Wood, M. J. (2018). Can drones count gulls? Minimal disturbance and semiautomated image processing with an unmanned aerial vehicle for colony-nesting seabirds. *Ecology and evolution*, 8(24), 12322-12334.

- Ruwaimana, M., Satyanarayana, B., Otero, V., M. Muslim, A., Syafiq A, M., Ibrahim, S., ... & Dahdouh-Guebas, F. (2018). The advantages of using drones over space-borne imagery in the mapping of mangrove forests. *PloS one*, 13(7), e0200288.
- Sabella, G., Viglianisi, F. M., Rotondi, S., & Brogna, F. (2017). Preliminary observations on the use of drones in the environmental monitoring and in the management of protected areas. The case study of "RNO Venticari", Syracuse (Italy). *Biodiversity Journal*, 8(1), 79-86.
- Saitoh, T., & Kobayashi, M. (2021). Appropriate drone flight altitude for horse behavioral observation. *Drones*, 5(3), 71.
- Samiappan, S., Prince Czarnecki, J. M., Foster, H., Strickland, B. K., Tegt, J. L., & Moorhead, R. J. (2018). Quantifying damage from wild pigs with small unmanned aerial systems. *Wildlife Society Bulletin*, 42(2), 304-309.
- Sánchez Bou, C., & López-Pujol, J. (2014). The coming revolution: the use of drones in plant conservation. *Collectanea Botanica* 33: e007.
- Sanders, A. (2017). Mapping the distribution of understory *Rhododendron ponticum* using low-tech multispectral UAV derived Imagery. *The Roles of Remote Sensing in Nature Conservation: A Practical Guide and Case Studies*, 167-181.
- Sankey, T., Donager, J., McVay, J., & Sankey, J. B. (2017). UAV lidar and hyperspectral fusion for forest monitoring in the southwestern USA. *Remote Sensing of Environment*, 195, 30-43.
- Sankey, T., Hultine, K., Blasini, D., Koepke, D., Bransky, N., Grady, K., ... & Allan, G. (2021). UAV thermal image detects genetic trait differences among populations and genotypes of Fremont cottonwood (*Populus fremontii*, Salicaceae). *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 7(2), 245-258.
- Santangeli, A., Chen, Y., Kluehn, E., Chirumamilla, R., Tiainen, J., & Loehr, J. (2020). Integrating drone-borne thermal imaging with artificial intelligence to locate bird nests on agricultural land. *Scientific reports*, 10(1), 10993.
- Santos, A. A. D., Marcato Junior, J., Araújo, M. S., Di Martini, D. R., Tetila, E. C., Siqueira, H. L., ... & Gonçalves, W. N. (2019). Assessment of CNN-based methods for individual tree detection on images captured by RGB cameras attached to UAVs. *Sensors*, 19(16), 3595.
- Santos, M. J., Disney, M., & Chave, J. (2018). Detecting human presence and influence on neotropical forests with remote sensing. *Remote Sensing*, 10(10), 1593.
- Sardà-Palomera, F., Bota, G., Viñolo, C., Pallarés, O., Sazatornil, V., Brotons, L., ... & Sardà, F. (2012). Fine-scale bird monitoring from light unmanned aircraft systems. *Ibis*, 154(1), 177-183.
- Saunders, D., Nguyen, H., Cowen, S., Magrath, M., Marsh, K., Bell, S., & Bobruk, J. (2022). Radio-tracking wildlife with drones: a viewshed analysis quantifying survey coverage across diverse landscapes. *Wildlife Research*, 49(1), 1-10.
- Saura, J. R., Reyes-Menendez, A., & Palos-Sanchez, P. (2019). Mapping multispectral Digital Images using a Cloud Computing software: applications from UAV images. *Heliyon*, 5(2).
- Scarpa, L.J. & Pina, C.I. (2019). The use of drones for conservation: A methodological tool to survey caimans nests density. *Biological Conservation*, 238, 8235.
- Schad, L., & Fischer, J. (2022). Opportunities and risks in the use of drones for studying animal behaviour. *Methods in Ecology and Evolution*.
- Scarrica, V. M., Aucelli, P. P., Cagnazzo, C., Casolaro, A., Fiore, P., La Salandra, M., ... & Staiano, A. (2022). A novel beach litter analysis system based on UAV images and Convolutional Neural Networks. *Ecological Informatics*, 72, 101875.
- Schad, L., & Fischer, J. (2022). Opportunities and risks in the use of drones for studying animal behaviour. *Methods in Ecology and Evolution*.
- Schaub, J., Hunt, B. P., Pakhomov, E. A., Holmes, K., Lu, Y., & Quayle, L. (2018). Using unmanned aerial vehicles (UAVs) to measure jellyfish aggregations. *Marine Ecology Progress Series*, 591, 29-36.
- Schiffman, R. (2014). Wildlife conservation drones flying high as new tool for field biologists. *Science*, 344: 459.
- Schofield, G., Esteban, N., Katselidis, K. A., & Hays, G. C. (2019). Drones for research on sea turtles and other marine vertebrates—A review. *Biological Conservation*, 238, 108214.
- Schofield, G., Papafitsoros, K., Haughey, R., & Katselidis, K. (2017a). Aerial and underwater surveys reveal temporal variation in cleaning-station use by sea turtles at a temperate breeding area. *Marine Ecology Progress Series*, 575, 153-164.
- Schofield, G., Katselidis, K. A., Lilley, M. K., Reina, R. D., & Hays, G. C. (2017b). Detecting elusive aspects of wildlife ecology using drones: New insights on the mating dynamics and operational sex ratios of sea turtles. *Functional Ecology*, 31(12), 2310-2319.
- Scholten, B. D., Beard, A. R., Choi, H., Baker, D. M., Caulfield, M. E., & Proppe, D. S. (2020). Short-term exposure to unmanned aerial vehicles does not alter stress responses in breeding tree swallows. *Conservation Physiology*, 8(1), coaa080.
- Scholten, C. N., Kamphuis, A. J., Vredevoogd, K. J., Lee-Strydom, K. G., Atma, J. L., Shea, C. B., ... & Proppe, D. S. (2019). Real-time thermal imagery from an unmanned aerial vehicle can locate ground nests of a grassland songbird at rates similar to traditional methods. *Biological Conservation*, 233, 241-246.
- Schroeder, N. M., Panebianco, A., Gonzalez Musso, R., & Carmanchahi, P. (2020). An experimental approach to evaluate the potential of drones in terrestrial mammal research: A gregarious ungulate as a study model. *Royal Society Open Science*, 7(1), 191482.

- Schroeder, N. M., & Panebianco, A. (2021). Sociability strongly affects the behavioural responses of wild guanacos to drones. *Scientific Reports*, 11(1), 20901.
- Scobie, C. A., & Hugenholtz, C. H. (2016). Wildlife monitoring with unmanned aerial vehicles: Quantifying distance to auditory detection. *Wildlife Society Bulletin*, 40(4), 781-785.
- Sellés-Ríos, B., Flatt, E., Ortiz-García, J., García-Colomé, J., Latour, O., & Whitworth, A. (2022). Warm beach, warmer turtles: Using drone-mounted thermal infrared sensors to monitor sea turtle nesting activity. *Frontiers in Conservation Science*, 3, 954791.
- Semel, B. P., Karpanty, S. M., Vololonirina, F. F., & Rakotonanahary, A. N. (2019). Eyes in the sky: Assessing the feasibility of low-cost, ready-to-use unmanned aerial vehicles to monitor primate populations directly. *Folia Primatologica*, 91(1), 69-82.
- Seymour, A. C., Dale, J., Hammill, M., Halpin, P. N., & Johnston, D. W. (2017). Automated detection and enumeration of marine wildlife using unmanned aircraft systems (UAS) and thermal imagery. *Scientific reports*, 7(1), 45127.
- Shaffer, M. J., & Bishop, J. A. (2016). Predicting and preventing elephant poaching incidents through statistical analysis, GIS-based risk analysis, and aerial surveillance flight path modeling. *Tropical Conservation Science*, 9(1), 525-548.
- Shahbazi, M., Théau, J., & Ménard, P. (2014). Recent applications of unmanned aerial imagery in natural resource management. *GIScience & Remote Sensing*, 51(4), 339-365.
- Sharma, M. (2022). Comparison of low-cost methods for vegetation mapping using object based analysis of UAV imagery: a case study for the greater Cõa Valley, Portugal. Master's thesis, University of Twente.
- Silvy, N.J. (édit.), (2012). *The wildlife techniques manual—Research* (Vol. 1) 7e édition. The Johns Hopkins University Press, Baltimore, MD, 686 p
- Sladonja, B., Damijanić, D., Krapac, M., Uzelac, M., Linić, I., & Poljuha, D. (2022). Development of drone-based methodology for inventory and monitoring invasive plants along river banks in Croatia. *Management of Biological Invasions*, 13(4), 679-689.
- Smigaj, M., & Gaulton, R. (2021). Capturing hedgerow structure and flowering abundance with UAV remote sensing. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 7(3), 521-533.
- Stevenson, B. C., Borchers, D. L., & Fewster, R. M. (2019). Cluster capture-recapture to account for identification uncertainty on aerial surveys of animal populations. *Biometrics*, 75(1), 326-336.
- Smith, C. E., Sykora-Bodie, S. T., Bloodworth, B., Pack, S. M., Spradlin, T. R., & LeBoeuf, N. R. (2016). Assessment of known impacts of unmanned aerial systems (UAS) on marine mammals: data gaps and recommendations for researchers in the United States. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 4(1), 31-44.
- Sorrell, K. J., Clarke, R. H., Holmberg, R., & McIntosh, R. R. (2019). Remotely piloted aircraft improve precision of capture-mark-resight population estimates of Australian fur seals. *Ecosphere*, 10(8), e02812.
- Spaan, D., Burke, C., McAree, O., Aureli, F., Rangel-Rivera, C. E., Hutschenreiter, A., ... & Wich, S. A. (2019). Thermal infrared imaging from drones offers a major advance for spider monkey surveys. *Drones*, 3(2), 34.
- Spaan, D., Di Fiore, A., Rangel-Rivera, C. E., Hutschenreiter, A., Wich, S., & Aureli, F. (2022). Detecting spider monkeys from the sky using a high-definition RGB camera: a rapid-assessment survey method? *Biodiversity and Conservation*, 31(2), 479-496.
- Sparaventi, E., Rodríguez-Romero, A., Navarro, G., & Tovar-Sánchez, A. (2022). A novel automatic water autosampler operated from UAVs for determining dissolved trace elements. *Frontiers in Marine Science*, 9, 879953.
- Stark, D. J., Vaughan, I. P., Evans, L. J., Kler, H., & Goossens, B. (2018). Combining drones and satellite tracking as an effective tool for informing policy change in riparian habitats: a proboscis monkey case study. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 4(1), 44-52.
- Stark, H., Parthasarathy, P., & Johnson, R. N. (2003). Considerations in designing a marine-mammal-ship collision avoidance system based on aerial imagery by an unmanned airborne vehicle. *Optical Engineering*, 42(1), 11-17.
- Strandburg-Peshkin, A., Farine, D. R., Crofoot, M. C., & Couzin, I. D. (2017). Habitat and social factors shape individual decisions and emergent group structure during baboon collective movement. *elife*, 6, e19505.
- Strycker, N., Borowicz, A., Wethington, M., Forrest, S., Shah, V., Liu, Y., ... & Lynch, H. J. (2021). Fifty-year change in penguin abundance on Elephant Island, South Shetland Islands, Antarctica: results of the 2019–20 census. *Polar Biology*, 44, 45-56.
- Strycker, N., Wethington, M., Borowicz, A., Forrest, S., Witharana, C., Hart, T., & Lynch, H. J. (2020). A global population assessment of the Chinstrap penguin (*Pygoscelis antarctica*). *Scientific Reports*, 10(1), 19474.
- Su, X., Dong, S., Liu, S., Cracknell, A. P., Zhang, Y., Wang, X., & Liu, G. (2018). Using an unmanned aerial vehicle (UAV) to study wild yak in the highest desert in the world. *International Journal of Remote Sensing*, 39(15-16), 5490-5503.
- Sudholz, A., Denman, S., Pople, A., Brennan, M., Amos, M., & Hamilton, G. (2021). A comparison of manual and automated detection of rusa deer (*Rusa timorensis*) from RPAS-derived thermal imagery. *Wildlife Research*, 49(1), 46-53.

- Sun, Y., Yi, S., Hou, F., Luo, D., Hu, J., & Zhou, Z. (2020). Quantifying the dynamics of livestock distribution by unmanned aerial vehicles (UAVs): A case study of yak grazing at the household scale. *Rangeland Ecology & Management*, 73(5), 642-648.
- Sun, Y., Yi, S., & Hou, F. (2018). Unmanned aerial vehicle methods makes species composition monitoring easier in grasslands. *Ecological Indicators*, 95, 825-830.
- Sykora-Bodie, S. T., Bezy, V., Johnston, D. W., Newton, E., & Lohmann, K. J. (2017). Quantifying nearshore sea turtle densities: applications of unmanned aerial systems for population assessments. *Scientific reports*, 7(1), 17690.
- Tait, L. W., Orchard, S., & Schiel, D. R. (2021). Missing the forest and the trees: Utility, limits and caveats for drone imaging of coastal marine ecosystems. *Remote Sensing*, 13(16), 3136.
- Tang, L., & Shao, G. (2015). Drone remote sensing for forestry research and practices. *Journal of Forestry Research*, 26, 791-797.
- Tamminga, A., Hugenholtz, C., Eaton, B., & Lapointe, M. (2015). Hyperspatial remote sensing of channel reach morphology and hydraulic fish habitat using an unmanned aerial vehicle (UAV): A first assessment in the context of river research and management. *River Research and Applications*, 31(3), 379-391.
- Tay, J. Y., Erfmeier, A., & Kalwij, J. M. (2018). Reaching new heights: can drones replace current methods to study plant population dynamics? *Plant Ecology*, 219, 1139-1150.
- Templin, T., Popielarczyk, D., & Kosecki, R. (2018). Application of low-cost fixed-wing UAV for inland lakes shoreline investigation. *Pure and Applied Geophysics*, 175, 3263-3283.
- Tetila, E. C., Machado, B. B., Menezes, G. K., Oliveira, A. D. S., Alvarez, M., Amorim, W. P., ... & Pistori, H. (2019). Automatic recognition of soybean leaf diseases using UAV images and deep convolutional neural networks. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 17(5), 903-907.
- Thapa, G.J., K. Thapa, R. Thapa, S.R. Jnawali, S.A. Wich, L.P. Poudyal et S. Karki, (2018). Counting crocodiles from the sky: Monitoring the critically endangered gharial (*Gavialis gangeticus*) population with an unmanned aerial vehicle (UAV). *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 6: 71-82.
- Thompson, P. D., Vasquez, E. A., Gowing, I., Edgar, T., Neville, A., & Jones, A. (2021). Unmanned aerial vehicle technology proves an effective and efficient technique for identifying critical native fish habitat. *North American Journal of Fisheries Management*, 41(3), 616-625.
- Timm, R. K., Caldwell, L., Nelson, A., Long, C., Chilibeck, M. B., Johnson, M., ... & Brown, J. M. (2019). Drones, hydraulics, and climate change: Inferring barriers to steelhead spawning migrations. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 6(6), e1379.
- Toonen, H. M., & Bush, S. R. (2020). The digital frontiers of fisheries governance: fish attraction devices, drones and satellites. *Journal of environmental policy & planning*, 22(1), 125-137.
- Torres, L. G., Nieukirk, S. L., Lemos, L., & Chandler, T. E. (2018). Drone up! Quantifying whale behavior from a new perspective improves observational capacity. *Frontiers in Marine Science*, 319.
- Traba, J., Gómez-Catasús, J., Barrero, A., Bustillo-de la Rosa, D., Zurdo, J., Hervás, I., ... & Reverter, M. (2022). Comparative assessment of satellite and drone-based vegetation indices to predict arthropod biomass in shrub-steppes. *Ecological Applications*, 32(8), e2707.
- Tremblay, J. A., Desrochers, A., Aubry, Y., Pace, P., & Bird, D. M. (2017). A low-cost technique for radio-tracking wildlife using a small standard unmanned aerial vehicle. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 5(3), 102-108.
- Tuia, D., Kellenberger, B., Beery, S., Costelloe, B. R., Zuffi, S., Risse, B., ... & Berger-Wolf, T. (2022). Perspectives in machine learning for wildlife conservation. *Nature communications*, 13(1), 792.
- Turner, D., Lucieer, A., Malenovsky, Z., King, D. H., & Robinson, S. A. (2014). Spatial co-registration of ultra-high resolution visible, multispectral and thermal images acquired with a micro-UAV over Antarctic moss beds. *Remote Sensing*, 6(5), 4003-4024.
- Tyler, S., Jensen, O. P., Hogan, Z., Chandra, S., Galland, L. M., Simmons, J., & 2017 Taimen Research Team. (2018). Perspectives on the application of unmanned aircraft for freshwater fisheries census. *Fisheries*, 43(11), 510-516.
- Vahalík, P., Van Damme, K., Néték, R., Habrová, H., Tulková, J., Lengálová, K., ... & Maděra, P. (2023). UAV Inventory of the Last Remaining Dragon Tree Forest on Earth. *Forests*, 14(4), 766.
- Valente, J., Hiremath, S., Ariza-Sentís, M., Doldersum, M., & Kooistra, L. (2022). Mapping of *Rumex obtusifolius* in nature conservation areas using very high-resolution UAV imagery and deep learning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 112, 102864.
- Valladares, N. A., Pardo, A. A., Chiaverini, L., Groenendijk, J., Harrington, L. A., Macdonald, D. W., ... & Barocas, A. (2022). High-resolution drone imagery reveals drivers of fine-scale giant otter habitat selection in the land-water interface. *Conservation Science and Practice*, 4(12), e12786.
- Valle, R. G. (2022). Rapid drone semi-automated counts of wintering Greater Flamingos (*Phoenicopterus roseus*) as a tool for amateur researchers. *Ibis*, 164(1), 320-328.

- Van Andel, A. C., Wich, S. A., Boesch, C., Koh, L. P., Robbins, M. M., Kelly, J., & Kuehl, H. S. (2015). Locating chimpanzee nests and identifying fruiting trees with an unmanned aerial vehicle. *American journal of primatology*, 77(10), 1122-1134.
- van Gemert, J. C., Verschoor, C. R., Mettes, P., Epema, K., Koh, L. P., & Wich, S. (2015). Nature conservation drones for automatic localization and counting of animals. In *Computer Vision-ECCV 2014 Workshops: Zurich, Switzerland, September 6-7 and 12, 2014, Proceedings, Part I 13* (pp. 255-270). Springer International Publishing.
- Vanlersel, W., Straatsma, M., Middelkoop, H., & Addink, E. (2018). Multitemporal classification of river floodplain vegetation using time series of UAV images. *Remote Sensing*, 10(7), 1144.
- Varela, M. R., Patrício, A. R., Anderson, K., Broderick, A. C., DeBell, L., Hawkes, L. A., ... & Godley, B. J. (2019). Assessing climate change associated sea-level rise impacts on sea turtle nesting beaches using drones, photogrammetry and a novel GPS system. *Global change biology*, 25(2), 753-762.
- Varela-Jaramillo, A., Rivas-Torres, G., Guayasamin, J. M., Steinfartz, S., & MacLeod, A. (2023). A pilot study to estimate the population size of endangered Galápagos marine iguanas using drones. *Frontiers in Zoology*, 20(1), 1-13.
- Vas, E., Lescroël, A., Duriez, O., Boguszewski, G., & Grémillet, D. (2015). Approaching birds with drones: first experiments and ethical guidelines. *Biology letters*, 11(2), 20140754.
- Ventura, D., Bonifazi, A., Gravina, M. F., Belluscio, A., & Ardizzone, G. (2018). Mapping and classification of ecologically sensitive marine habitats using unmanned aerial vehicle (UAV) imagery and object-based image analysis (OBIA). *Remote Sensing*, 10(9), 1331.
- Ventura, D., Bonifazi, A., Gravina, M. F., & Ardizzone, G. D. (2017). Unmanned aerial systems (UASs) for environmental monitoring: A review with applications in coastal habitats. *Aerial Robots-Aerodynamics, Control and Applications*, 165-184.
- Verfuss, U. K., Aniceto, A. S., Harris, D. V., Gillespie, D., Fielding, S., Jiménez, G., ... & Wyatt, R. (2019). A review of unmanned vehicles for the detection and monitoring of marine fauna. *Marine pollution bulletin*, 140, 17-29.
- Vermeulen, C., Lejeune, P., Lisein, J., Sawadogo, P., & Bouché, P. (2013). Unmanned aerial survey of elephants. *PLoS one*, 8(2), e54700.
- Vivoni, E. R., Rango, A., Anderson, C. A., Pierini, N. A., Schreiner-McGraw, A. P., Saripalli, S., & Laliberte, A. S. (2014). Ecohydrology with unmanned aerial vehicles. *Ecosphere*, 5(10), 1-14.
- Vayssade, J. A., Arquet, R., & Bonneau, M. (2019). Automatic activity tracking of goats using drone camera. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162, 767-772.
- Walker, S. E., Sheaves, M., & Waltham, N. J. (2023). Barriers to Using UAVs in Conservation and Environmental Management: A Systematic Review. *Environmental Management*, 71(5), 1052-1064.
- Wallace, L., Lucieer, A., Watson, C., & Turner, D. (2012). Development of a UAV-LiDAR system with application to forest inventory. *Remote sensing*, 4(6), 1519-1543.
- Wallace, L., Musk, R., & Lucieer, A. (2014). An assessment of the repeatability of automatic forest inventory metrics derived from UAV-borne laser scanning data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(11), 7160-7169.
- Wallace, P., Martin, R., & White, I. (2018). Keeping pace with technology: drones, disturbance and policy deficiency. *Journal of Environmental Planning and Management*, 61(7), 1271-1288.
- Wan, H., Q. Wang, D. Jiang, J. Fu, Y. Yang, et X. Liu, (2014). Monitoring the invasion of *Spartina alterniflora* using very high resolution unmanned aerial vehicles imagery in Beihai, Guangxi (China). *The Scientific World Journal: Article ID638296*, 7 p.
- Wang, D., Song, Q., Liao, X., Ye, H., Shao, Q., Fan, J., ... & Zhang, H. (2020). Integrating satellite and unmanned aircraft system (UAS) imagery to model livestock population dynamics in the Longbao Wetland National Nature Reserve, China. *Science of The Total Environment*, 746, 140327.
- Wang, D., Xin, X., Shao, Q., Brolly, M., Zhu, Z., & Chen, J. (2017). Modeling aboveground biomass in Hulunber grassland ecosystem by using unmanned aerial vehicle discrete lidar. *Sensors*, 17(1), 180.
- Wang, D., Shao, Q., & Yue, H. (2019). Surveying wild animals from satellites, manned aircraft and unmanned aerial systems (UASs): A review. *Remote Sensing*, 11(11), 1308.
- Wang, Y., Lu, Z., Sheng, Y., & Zhou, Y. (2020). Remote sensing applications in monitoring of protected areas. *Remote Sensing*, 12(9), 1370.
- Watts, A. C., Bowman, W. S., Abd-Elrahman, A. H., Mohamed, A., Wilkinson, B. E., Perry, J., ... & Lee, K. (2008). Unmanned Aircraft Systems (UASs) for ecological research and natural-resource monitoring (Florida). *Ecological Restoration*, 26(1), 13-14.
- Watts, A. C., Ambrosia, V. G., & Hinkley, E. A. (2012). Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: Classification and considerations of use. *Remote sensing*, 4(6), 1671-1692.
- Watts, A. C., Perry, J. H., Smith, S. E., Burgess, M. A., Wilkinson, B. E., Szantoi, Z., ... & Percival, H. F. (2010). Small unmanned aircraft systems for low-altitude aerial surveys. *The Journal of Wildlife Management*, 74(7), 1614-1619.
- Wavrek, M. T., Carr, E., Jean-Philippe, S., & McKinney, M. L. (2023). Drone remote sensing in urban forest management: a case study. *Urban Forestry & Urban Greening*, 127978.

- Wawrzyniak, V., Piégay, H., Allemand, P., Vaudor, L., & Grandjean, P. (2013). Prediction of water temperature heterogeneity of braided rivers using very high resolution thermal infrared (TIR) images. *International Journal of Remote Sensing*, 34(13), 4812-4831.
- Weber, S., & Knaus, F. (2017). Using drones as a monitoring tool to detect evidence of winter sports activities in a protected mountain area. *eco. mont: Journal on Protected Mountain Areas Research and Management*, 9(1), 30-34
- Wegdell, F., Hammerschmidt, K., & Fischer, J. (2019). Conserved alarm calls but rapid auditory learning in monkey responses to novel flying objects. *Nature ecology & evolution*, 3(7), 1039-1042.
- Weimerskirch, H., Prudor, A., & Schull, Q. (2018). Flights of drones over sub-Antarctic seabirds show species- and status-specific behavioural and physiological responses. *Polar Biology*, 41, 259-266.
- Weissensteiner, M. H., Poelstra, J. W., & Wolf, J. B. (2015). Low-budget ready-to-fly unmanned aerial vehicles: An effective tool for evaluating the nesting status of canopy-breeding bird species. *Journal of avian biology*, 46(4), 425-430.
- Weston, M. A., McLeod, E. M., Blumstein, D. T., & Guay, P. J. (2012). A review of flight-initiation distances and their application to managing disturbance to Australian birds. *Emu-Austral Ornithology*, 112(4), 269-286.
- Whitehead, K., & Hugenholtz, C. H. (2014). Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (UASs), part 1: A review of progress and challenges. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 2(3), 69-85.
- Whitehead, K., Hugenholtz, C. H., Myshak, S., Brown, O., LeClair, A., Tamminga, A., ... & Eaton, B. (2014). Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (UASs), part 2: scientific and commercial applications. *Journal of unmanned vehicle systems*, 2(3), 86-102.
- Whitworth, A., Pinto, C., Ortiz, J., Flatt, E., & Silman, M. (2022). Flight speed and time of day heavily influence rainforest canopy wildlife counts from drone-mounted thermal camera surveys. *Biodiversity and Conservation*, 31(13-14), 3179-3195.
- Wich, S. A., Hudson, M., Andrianandrasana, H., & Longmore, S. N. (2021). Drones for conservation. *Conservation technology*, 35.
- Wich, S., & Koh, L. (2012). The use of unmanned aerial vehicles by ecologists: conservation drones. *GIM International*, 26(11), 29-33.
- Wich, S., Dellatore, D., Houghton, M., Ardi, R., & Koh, L. P. (2015). A preliminary assessment of using conservation drones for Sumatran orang-utan (*Pongo abelii*) distribution and density. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 4(1), 45-52.
- Wich, S.A. & Koh, L.P. (2018). *Conservation drones: Mapping and monitoring biodiversity*. Oxford University Press, Oxford, 118 p.
- Wilson, A. M., Glass, D. B., Immordino, M. A., Ozoh, P. S., Sherman, L. B., & Somers, M. D. (2022). A method for estimating songbird abundance with drones. *Drone Systems and Applications*, 10(1), 367-381.
- Wilson, A. M., Barr, J., & Zagorski, M. (2017). The feasibility of counting songbirds using unmanned aerial vehicles. *The Auk: Ornithological Advances*, 134(2), 350-362.
- Witczuk, J., Pagacz, S., Zmarz, A., & Cypel, M. (2018). Exploring the feasibility of unmanned aerial vehicles and thermal imaging for ungulate surveys in forests-preliminary results. *International Journal of Remote Sensing*, 39(15-16), 5504-5521.
- Witt, R. R., Beranek, C. T., Howell, L. G., Ryan, S. A., Clulow, J., Jordan, N. R., ... & Roff, A. (2020). Real-time drone derived thermal imagery outperforms traditional survey methods for an arboreal forest mammal. *PLoS One*, 15(11), e0242204.
- Woellner, R., & Wagner, T. C. (2019). Saving species, time and money: Application of unmanned aerial vehicles (UAVs) for monitoring of an endangered alpine river specialist in a small nature reserve. *Biological conservation*, 233, 162-175.
- Woodget, A. S., Austrums, R., Maddock, I. P., & Habit, E. (2017). Drones and digital photogrammetry: from classifications to continuums for monitoring river habitat and hydromorphology. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 4(4), e1222.
- Woolcock, A. B., Cotton, S., & Cotton, A. J. (2022). Effectiveness of using drones and convolutional neural networks to monitor aquatic megafauna. *African Journal of Ecology*, 60(3), 544-556.
- Xiao, W., Ren, H., Sui, T., Zhang, H., Zhao, Y., & Hu, Z. (2022). A drone- and field-based investigation of the land degradation and soil erosion at an opencast coal mine dump after 5 years' evolution of natural processes. *International Journal of Coal Science & Technology*, 9(1), 42.
- Xiao, Y., Guo, Y., Yin, G., Zhang, X., Shi, Y., Hao, F., & Fu, Y. (2022). UAV multispectral image-based urban river water quality monitoring using stacked ensemble machine learning algorithms—A case study of the Zhanghe river, China. *Remote Sensing*, 14(14), 3272.
- Yang, B., Hawthorne, T. L., Hessing-Lewis, M., Duffy, E. J., Reshitnyk, L. Y., Feinman, M., & Searson, H. (2020). Developing an introductory UAV/drone mapping training program for seagrass monitoring and research. *Drones*, 4(4), 70.
- Yang, F., Shao, Q., Guo, X., Tang, Y., Li, Y., Wang, D., ... & Fan, J. (2018). Effect of large wild herbivore populations on the forage-livestock balance in the source region of the Yellow River. *Sustainability*, 10(2), 340.
- Yang, Z., Yu, X., Dedman, S., Rosso, M., Zhu, J., Yang, J., ... & Wang, J. (2022). UAV remote sensing applications in marine monitoring: Knowledge visualization and review. *Science of The Total Environment*, 838, 155939.

- Ying, H., Xia, K., Huang, X., Feng, H., Yang, Y., Du, X., & Huang, L. (2021). Evaluation of water quality based on UAV images and the IMP-MPP algorithm. *Ecological Informatics*, 61, 101239.
- Young, B. G., Yurkowski, D. J., Dunn, J. B., & Ferguson, S. H. (2019). Comparing infrared imagery to traditional methods for estimating ringed seal density. *Wildlife Society Bulletin*, 43(1), 121-130.
- Young, D. J., Koontz, M. J., & Weeks, J. (2022). Optimizing aerial imagery collection and processing parameters for drone-based individual tree mapping in structurally complex conifer forests. *Methods in Ecology and Evolution*, 13(7), 1447-1463.
- Yu, D., Zha, Y., Sun, Z., Li, J., Jin, X., Zhu, W., ... & Su, Z. (2023). Deep convolutional neural networks for estimating maize above-ground biomass using multi-source UAV images: A comparison with traditional machine learning algorithms. *Precision Agriculture*, 24(1), 92-113.
- Zaman, B., Jensen, A. M., & McKee, M. (2011, July). Use of high-resolution multispectral imagery acquired with an autonomous unmanned aerial vehicle to quantify the spread of an invasive wetlands species. In *2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 803-806). IEEE.
- Zbyryt, A., Dylewski, Ł., Morelli, F., Sparks, T. H., & Tryjanowski, P. (2021). Behavioural responses of adult and young White Storks *Ciconia ciconia* in nests to an unmanned aerial vehicle. *Acta Ornithologica*, 55(2), 243-251.
- Zhang, C., Atkinson, P. M., George, C., Wen, Z., Diazgranados, M., & Gerard, F. (2020). Identifying and mapping individual plants in a highly diverse high-elevation ecosystem using UAV imagery and deep learning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 169, 280-291.
- Zhang, C., Zhou, J., Wang, H., Tan, T., Cui, M., Huang, Z., ... & Zhang, L. (2022). Multi-species individual tree segmentation and identification based on improved mask R-CNN and UAV imagery in mixed forests. *Remote Sensing*, 14(4), 874.
- Zhang, H., Wang, C., Turvey, S. T., Sun, Z., Tan, Z., Yang, Q., ... & Yang, D. (2020). Thermal infrared imaging from drones can detect individuals and nocturnal behavior of the world's rarest primate. *Global Ecology and Conservation*, 23, e01101.
- Zhang, J., Hu, J., Lian, J., Fan, Z., Ouyang, X., & Ye, W. (2016). Seeing the forest from drones: Testing the potential of lightweight drones as a tool for long-term forest monitoring. *Biological Conservation*, 198, 60-69.
- Zhang, J., Liu, D., Meng, B., Chen, J., Wang, X., Jiang, H., ... & Yi, S. (2021). Using UAVs to assess the relationship between alpine meadow bare patches and disturbance by pikas in the source region of Yellow River on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Global Ecology and Conservation*, 26, e01517.
- Zhang, J., Zhang, Z., Lutz, J. A., Chu, C., Hu, J., Shen, G., ... & He, F. (2022). Drone-acquired data reveal the importance of forest canopy structure in predicting tree diversity. *Forest Ecology and Management*, 505, 119945.
- Zhang, Y., Shen, H., & Xia, C. (2020). Automatic identification of soil and water conservation measures from centimeter-resolution unmanned aerial vehicle imagery. *Journal of Soil and Water Conservation*, 75(4), 472-480.
- Zhou, D., Li, M., Li, Y., Qi, J., Liu, K., Cong, X., & Tian, X. (2020). Detection of ground straw coverage under conservation tillage based on deep learning. *Computers and electronics in agriculture*, 172, 105369.
- Zhou, H., Fu, L., Sharma, R. P., Lei, Y., & Guo, J. (2021). A hybrid approach of combining random forest with texture analysis and VDVI for desert vegetation mapping Based on UAV RGB Data. *Remote Sensing*, 13(10), 1891.
- Zhou, Z., Yang, Y., & Chen, B. (2018). Estimating *Spartina alterniflora* fractional vegetation cover and aboveground biomass in a coastal wetland using SPOT6 satellite and UAV data. *Aquatic Botany*, 144, 38-45.
- Zhu, X., Hou, Y., Weng, Q., & Chen, L. (2019). Integrating UAV optical imagery and LiDAR data for assessing the spatial relationship between mangrove and inundation across a subtropical estuarine wetland. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 149, 146-156.
- Zhu, Y., Jeon, S., Sung, H., Kim, Y., Park, C., Cha, S., ... & Lee, W. K. (2020). Developing UAV-Based Forest Spatial Information and Evaluation Technology for Efficient Forest Management. *Sustainability*, 12(23), 10150.
- Zink, R., Kmetova-Biro, E., Agnezy, S., Klisurov, I., & Margalida, A. (2023). Assessing the potential disturbance effects on the use of Unmanned Aircraft Systems (UASs) for European vultures research: a review and conservation recommendations. *Bird Conservation International*, 33, e45.
- Zontek, T.L., Ogle, B.R., Hoover, R., Jankovic J.T., & Hollenbeck, S. (2020). Tick dragging: Using a drone to reduce surveyor exposure. *Journal of Environmental Health*, 82 (7): 8-12.
- Zweig, C. L., Burgess, M. A., Percival, H. F., & Kitchens, W. M. (2015). Use of unmanned aircraft systems to delineate fine-scale wetland vegetation communities. *Wetlands*, 35, 303-309.

# Analyse comparative des outils existants pouvant être utilisés pour l'inventaire de la faune

B. Gréau, A. Debeire, A. Dubrulle, P. Cannesson, E. Deplancke, B. Schoene, L. Thorez & A. Coulombel

### Résumé

---

Développé au début du XX<sup>ème</sup> siècle pour un usage militaire, le drone, permet de transporter différents capteurs pour observer, inventorier, photographier ou acquérir des connaissances.

Aujourd'hui le drone est utilisé dans des domaines variés (photographie, culture, cinéma, agriculture, biodiversité ...), et existe sous différentes tailles et de formes. La typologie du drone utilisé varie en fonction des usages et des objectifs fixés, et se distingue principalement en deux catégories : ceux à voilures fixes et ceux à voilure tournante.

Tout comme les drones, les capteurs ont vécu une évolution fulgurante. Aujourd'hui nous comptons 6 types de capteurs différents pouvant être utilisés pour les inventaires faunistiques, et notamment ornithologiques : les capteurs Rouge-Vert-Bleu (RVB), thermique, multispectraux, avec télémètre laser ou un LiDAR, ou encore les capteurs de mesures spécifiques.

Si le drone peut être un allier dans le suivi de certaines espèces d'oiseaux le télépilote se doit néanmoins de respecter certaines règles éthiques et réglementaires. En effet, selon le site de décollage, l'angle et la vitesse d'approche, ainsi que la hauteur de vol, le drone peut occasionner du stress, ou des comportements agressifs de la part des oiseaux envers le drone. D'après notre expérience, nous recommandons, quand cela est possible, de voler à une hauteur de 120 m, puis descendre progressivement, tout en surveillant le comportement de la colonie ou des oiseaux étudiés.

Ensuite, l'utilisation de drone est réglementée afin d'assurer la sécurité du télépilote, la sécurité de l'espace aérien et des tiers au sol. Cette réglementation est apprise et comprise lors de la formation visant à acquérir le brevet de télépilote.

L'aviation Civile gère l'espace aérien français, où se partagent les catégories d'aéronefs dont celle du drone. Dans une segmentation dédiée aux aéronefs sans équipage à bord, différents scénarios réglementent les vols suivant des paramètres distincts. Ces scénarios et les règles associées sont amenés à évoluer avec la nouvelle réglementation européenne dont l'application est prévue entre 2025 et 2026. En complément des règles associées aux différents scénarios de vol, les télépilotes doivent connaître les éventuelles limitations et règles d'usage du drone sur les aires protégées ou soumises à un arrêté de protection de Biotope (APB), lorsqu'ils souhaitent travailler au sein d'espaces naturels. A noter que, les zones soumises à réglementation temporaire ou bornée dans le temps, ne sont pas représentées sur les cartes aéronautiques. La recherche parfois fastidieuse des arrêtés correspondants, le manque de clarté de ces derniers, et le manque de formation sur la réglementation au sujet des zones protégées sont, cependant, autant de facteurs qui peuvent occasionner des survols non prémédités de zones interdites.

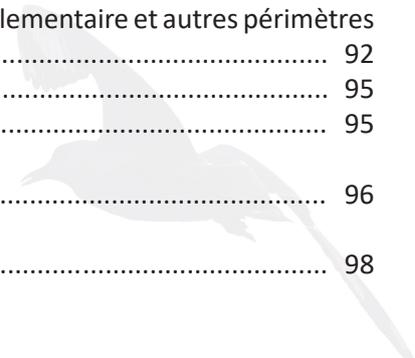
Enfin, il est possible de déroger aux réglementations par des demandes de dérogations et d'autorisation administratives spécifiques. Les autorisations sont adressées à différents acteurs en fonction de leur type ou usage. Dans le cadre de l'usage du drone dans les zones non réglementées par la Carte OACI, il faut se rapprocher du gestionnaire de la zone soumis à un arrêté de biotope, et s'adresser au préfet du département, et à la DREAL.





# SOMMAIRE CHAPITRE 2

<b>I Introduction</b> .....	59
<b>II. Matériels &amp; Méthodes</b> .....	60
<b>III. L'outil du drone</b> .....	60
A. Histoire du drone .....	60
B. Le drone civil : de multiples formes et fonctionnalités.....	62
C. Evolution des capteurs associés au drone .....	68
D. Les différentes typologies de capteurs .....	70
1. Les capteurs RVB (ou RGB) .....	70
2. Les autres capteurs .....	74
<b>IV. Application du drone aux suivis d'espèces d'oiseaux</b> .....	75
A. Retour d'expérience des inventaires ornithologiques par drone d'après Charbonneau & Lemaitre (2021) .....	75
B. Retour d'expérience des inventaires ornithologiques par drone en France .....	75
1. Les hauteurs de vol requises .....	76
2. Les capteurs utilisés .....	76
C. Les drones utilisés et leur gamme tarifaire .....	79
<b>V. Réglementations</b> .....	82
A. La réglementation Aéronautique générale .....	82
B. Evolution de la réglementation française relative aux aéronefs et à leurs usages dans l'espace aérien .....	85
C. Réglementation drone en vigueur (au 13/12/2023) : les connaissances essentielles .....	86
D. La réglementation du drone en zoange du patrimoine naturel réglementaire et autres périmètres de protection .....	92
E. Les dérogations .....	95
F. Les sanctions .....	95
<b>VI. Conclusion</b> .....	96
<b>VII. Références</b> .....	98



# I. Introduction



Les véhicules aériens sans pilote, les « Unmanned Aerial System » (UAS) ou également appelés « drones », dans le langage commun, sont définis par la Direction Générale de l'Aviation Civile par l'expression « aéronef qui circule sans équipage à bord ».

Un drone est avant tout une plateforme permettant de recevoir des capteurs mobiles. C'est un engin multi-usage permettant d'observer, d'acquérir ou encore de transmettre des données qui peuvent être géolocalisées (CNIL, consulté le 18/07/2024). Ils ont l'avantage de pouvoir être pilotés à distance par un opérateur humain et d'accéder à des milieux complexes ou inaccessibles. Le drone offre une facilité d'usage sur les 3 dimensions (x,y,z). Cet outil permet de se positionner à une élongation et/ou à une altimétrie définie par le télépilote, terme utilisé pour désigner le pilote du drone.

L'innovation au sein de l'industrie des drones augmente et évolue à un rythme frénétique (Crutsinger et al., 2016). Leurs capacités varient aujourd'hui considérablement en termes de temps de vol, de portée, de vitesse, de charge utile. En plus de la diversification des types de véhicules, le secteur connaît une évolution importante des caméras, de capteurs et des applications logicielles disponibles.

L'adaptation de cette technologie, utilisée initialement par le militaire, au marché public et à l'usage des amateurs, de la photographie et du cinéma a été le moteur de nombreuses innovations. Au cours de la dernière année, de grands progrès ont été réalisés en termes de résolution, de taille, de la qualité et du coût des capteurs embarqués. Des évolutions technologiques sont également à noter au niveau des technologies de contrôle de vol, de géolocalisation des images pour l'assemblage photogrammétrique, ainsi que des logiciels d'assemblage, des batteries au lithium polymère (LiPo), et de la précision et la fiabilité de la stabilisation de vol GPS (Crutsinger et al., 2016).

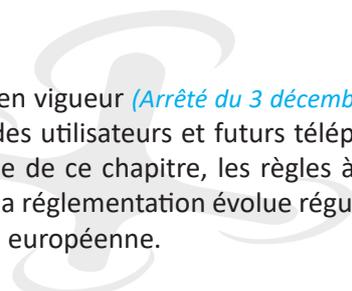
En plus des caméras dit RVB, « Rouge-Vert-Bleu » désignant la projection de l'affichage numérique à l'identique de la perception humaine colorée, les drones peuvent être équipés d'un certain nombre de capteurs légers pertinents pour l'écologie, notamment des caméras multispectrales<sup>1</sup> pour les études de végétation, des caméras thermiques et du LiDAR<sup>2</sup> (Camaretta et al., 2020).

Les progrès des technologies numériques ont donné naissance à de nouvelles façons de détecter, mesurer, surveiller, représenter et visualiser la nature. La polyvalence des drones a notamment eu un impact positif sur plusieurs domaines, notamment la gestion de l'environnement, la biologie de la conservation et l'agriculture (Hodgson et al., 2018 ; López & Mulero-Pázmány, 2019).

Aujourd'hui de très nombreux drones et capteurs sont sur le marché, offrant des possibilités multiples. Le choix parmi les drones et les capteurs peut paraître compliqué et déstabilisant pour les acteurs opérationnels ou chercheurs souhaitant utiliser le drone dans leurs études. Ainsi, dans une première partie, et après une brève synthèse de l'histoire du drone, nous proposons une liste courte de drones existant en 2023 pouvant être utilisés pour les inventaires des oiseaux. Puis nous proposons dans une seconde partie une synthèse non exhaustive de l'expérience des différents acteurs ayant utilisé ces outils dans le cadre de leurs travaux récents ainsi que leur efficacité et ressentis vis-à-vis des espèces et sites étudiés.

1 Une caméra multispectrale est une caméra qui enregistre en une seule prise de vue plusieurs longueurs d'onde qui sont isolées en vue d'analyses spécifiques et de techniques de recombinaison. Ceci permet une analyse des détails beaucoup plus fine et la visualisation de détails non visibles à l'œil nu.

2 Le LiDAR, un acronyme anglais de « détection et télémétrie par la lumière », est une technologie de télédétection qui utilise des faisceaux laser pour mesurer des distances et des mouvements précis en temps réel.



Enfin, la réglementation en vigueur ([Arrêté du 3 décembre 2020](#))<sup>1</sup> associé à l'utilisation de drone doit être connue et compris par l'ensemble des utilisateurs et futurs télépilotes. C'est pourquoi, nous nous proposons de synthétiser dans une troisième partie de ce chapitre, les règles à absolument connaître et à respecter pour tout inventaire faunistique. A noter que la réglementation évolue régulièrement et s'harmonisera probablement dans les années à venir avec une législation européenne.

## II. Matériels & Méthodes

La présente synthèse a été rédigée après l'étude de nombreux documents accessibles sur les moteurs de recherche Google, Yahoo et Bing, et des informations disponibles sur les réseaux sociaux LinkedIn, Facebook, X. Pour ce faire nous avons utilisé les mots clefs suivants : « Histoire du drone », « Histoire drone civil », « histoire de l'aéromodélisme », « drone avifaune », « drone inventaire faune ».

En complément, une consultation de différentes revues techniques a été réalisées (brèves techniques, site internet de constructeurs drones, reportages dans des magazines ou sur des plateformes de média télévision et vidéos sur les plateformes YouTube, Dailymotion).

Parallèlement, Prodrone et Ecosphère, co-rédacteurs de cette partie, partageront ici leur savoir-faire technique sur l'usage des drones qu'ils pratiquent depuis 2016 spécifiquement sur la faune sauvage.

Nous avons exclu dans cette analyse bibliographique les études portant sur les drones militaires, les drones non-aériens (Terrestre, Marin et Sous-Marin), les usages illégaux d'un aéronef et les usages du drone pour des activités non pertinentes dans l'inventorisation de la faune.

## III. L'outil drone

Dans cette partie, nous reviendrons sur l'histoire du drone depuis sa conception, puis nous présenterons ses différentes fonctionnalités et usages au fil du temps.

### ➤ A. Histoire du drone



La première utilisation connue et associée au terme drone, remonte en 1916. Le drone a été développé pour un usage militaire, et voit le jour en Grande Bretagne dans le cadre du projet « Aerial Target ». Ce projet avait alors pour objectif de décentraliser le poste de pilotage au sol et en « téléguidant » l'aéronef à l'aide d'un avion-cible sans pilote commandé ([Fig. 1](#)) au moyen des ondes de télégraphie sans fil (TSF) ([Studiofly audiovisual, consulté le 25/01/2024](#)).

---

<sup>1</sup> <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000042635883>

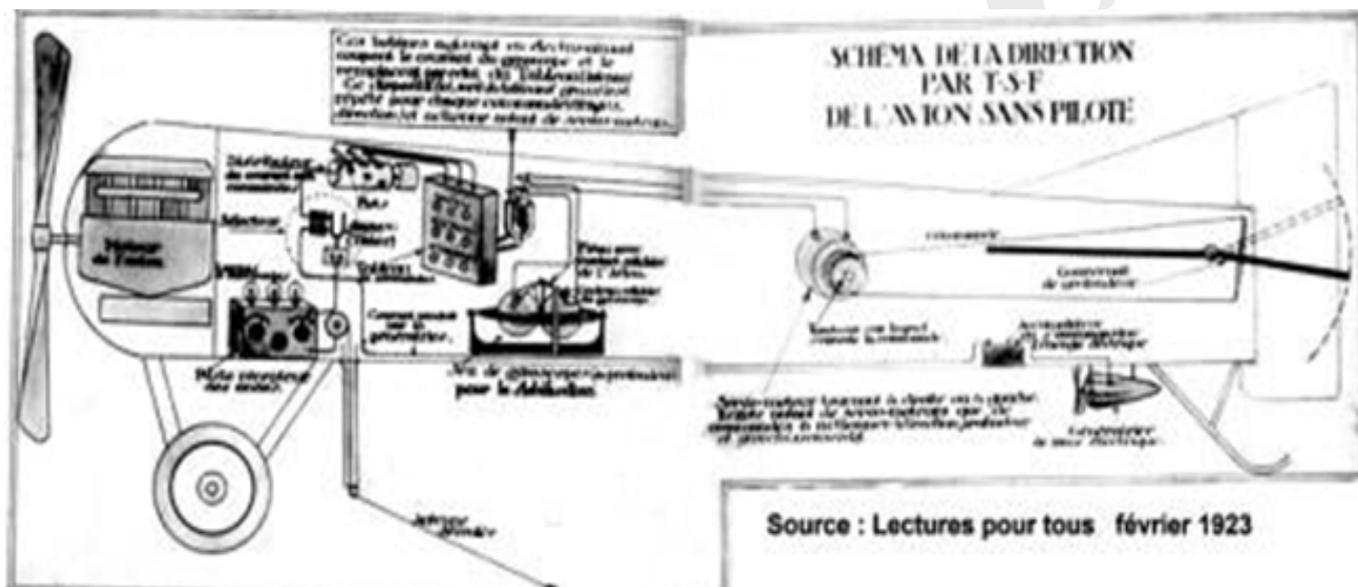


Figure 1 : Plans du premier aéronef guidés à la distance par des ondes de T-S-F du projet « Aerial Target » et réalisé par Max Boucher et Maurice Percheron. Source : Lecture pour tous, 1923 (Studiofly audiovisual, consulté le 25/01/2024).

L'origine du mot drone nous vient de la langue anglaise :

En anglais, le mot « drone » désigne le faux bourdon (mâle de l'abeille). Ce nom tient son origine d'une plaisanterie, en 1930, associé vol lent et bruyant d'un aéronef automatisé (*le DH. 82 Queen Bee*), qui ressemblait davantage à un vol d'un bourdon qu'à celui d'une reine abeille. Ce surnom a par la suite persisté et a été repris en 1941 par l'armée américaine pour désigner l'ensemble des aéronefs téléguidés (Studiofly audiovisual, consulté le 25/01/2024).

L'aéromodélisme fait son apparition à partir des années 1940/1950, avec pour but de réduire la taille de ces appareils volants tout en continuant d'être piloté par une radiocommande. Si à l'origine l'aéromodélisme était destiné et développé pour un usage militaire, celui-ci a été par la suite transposé rapidement à un usage civil.

Au début des années 2010 les premiers constructeurs font leur apparition dans le domaine du drone civil comme avec Parrot et l'AR. Drone commercialisé le 18 août 2010 et considéré comme le premier drone « prêt à l'emploi » à être commercialisé. (<https://www.lesechos.fr/2010/06/lar-drone-de-parrot-jouet-volant-non-identifie-427012>).

La différence avec l'aéromodélisme se trouve dans son usage et ses technologies embarquées. En effet, l'aéromodélisme, comme depuis sa création, à toujours pour usage d'effectuer des vols aériens d'une maquette à échelle réduite. Le drone, lui, se concentre sur des technologies embarquées comme les gyroscopes, compas magnétique, centrale inertielle (IMU) pour faciliter le pilotage de l'opérateur et greffer un capteur technique comme des capteurs photo, de cinéma, thermique, multispectraux... afin de récolter des données et de les transcrire dans un format métier.

Depuis 2015, le marché du drone civil gagne en popularité dans les usages dit « loisirs » comme le milieu des entreprises qui y voit un vecteur aérien compact, simple d'usage et grâce à la multiplication de capteurs techniques, permettant de répondre à de nombreuses problématiques d'accès parfois difficiles ou sur de grandes surfaces. L'avenir prévoit des drones pour le transport de marchandise, les vols commerciaux<sup>1</sup>, des métiers techniques mais également dans le militaire pour des distances longues portées.

<sup>1</sup> [https://x.com/volocopter/status/1826892462498922616?ref\\_src=twsrc%5Egoogle%7Ctwcamp%5Eserp%7Ctwgr%5Etweet](https://x.com/volocopter/status/1826892462498922616?ref_src=twsrc%5Egoogle%7Ctwcamp%5Eserp%7Ctwgr%5Etweet)

## ➤ B. Le drone civil : de multiples formes et fonctionnalités

Le drone est aujourd'hui utilisé de manière multi-usage dont l'agriculture, la livraison, les activités de loisirs et culturelles et dans la conservation de la biodiversité. En effet, le drone n'est pas conçu pour un seul domaine précis, sauf cas exceptionnels comme le drone canadien LineDrone ([source : Hydro-Québec, 2017](#)), qui est conçu uniquement pour l'intégration mécanique et fonctionnel de sondes de mesures de précision pour l'inspection de lignes hautes tension ([voir chapitre 1](#)).

La figure 2 détaille les différents constructeurs et revendeurs de drones à l'échelle internationale. Nous pouvons en compter 400 sur ce document. En France, nous pouvons compter sur différents revendeurs ou constructeurs. Parmi ces derniers, nous pouvons citer les 10 principaux ([source : Prodrone](#)).

Constructeurs :

- Parrot (types multi-rotor et voilure fixe)
- Elistair (type multi-rotor filaire)
- Delair (type voilure fixe et VTOL)
- Novadem (type multi-rotor)
- Hoverseen (type multi-rotor automatique)

Revendeurs :

- Prodrone (revendeur drone civil types multi-rotor, VTOL et voilure fixe)
- Escadrone (revendeur drone civil types multi-rotor, VTOL et voilure fixe)
- Studiosport (revendeur drone civil types multi-rotor, VTOL et voilure fixe)
- Dronevolt (revendeur drone civil types multi-rotor, VTOL et voilure fixe)
- Teledyne Flir (revendeur drone militaire type multirotor)



Figure 2 : Présentation des principaux constructeurs mondiaux classés par usage ou par type de drone. Source : Drone Industry Insights.

Au cours de cette dernière quinzaine d'année, nous avons vu passer les drones d'un aspect modélisme « fait maison » à un aspect de produit abouti autant visuellement que sur le plan aérodynamique. La miniaturisation des composants électroniques a également permis de réduire la taille et le poids de ces vecteurs aériens (Fig. 3).



Figure 3 : Illustration de l'évolution de deux drones, mettant en évidence les différences entre un modèle de première génération (DJI F450 étant sorti en 2011) et un modèle récent (DJI Mini étant sorti en 2020).

Cette évolution montre la montée en puissance de l'outil drone, avec travail sur l'aérodynamique, sur l'intégration de capteur photo miniaturisé ainsi qu'un travail sur la portabilité grâce aux bras rétractables.

Les besoins d'usages des aéronefs ont fait évoluer les différentes formes vers des typologies différentes (Fig. 4). Les drones sont habituellement répartis en différentes classes. Parmi elles, deux catégories dominent le marché du drone :

- Les drones à voilure fixe : ce sont par exemple les avions ou les ailes volantes. Leur avantage est qu'ils sont capables de voler longtemps en consommant peu d'énergie, cependant le site doit disposer d'une piste sur laquelle ils peuvent décoller ou atterrir ;
- Les drones à voilure tournante : ces appareils possèdent des hélices en rotation à l'horizontal. Ces drones peuvent réaliser des vols stationnaires et ont besoin seulement d'une surface réduite pour atterrir. Cependant, leur autonomie de vol est généralement assez limitée.
- Les VTOL, combinent les avantages du drone à voilure fixe, et à voilure tournante. Ce sont des drones à ailes fixes mais à décollage verticale.

Il existe néanmoins des appareils hybrides qui décollent et atterrissent comme des drones à voilure tournante, mais qui se comportent comme des drones à voilure fixe une fois en vol. C'est le cas par exemple du X450 de XK ou le Swing de chez Parrot (StudioSport, consulté le 04/03/2024).

Chaque typologie a ses avantages et ses inconvénients (Tab. 1 & 2). Le choix du drone à faire voler dépend de l'usage que l'on souhaite en faire. En effet, certains drones sont particulièrement adaptés à l'agriculture ou au cinéma, tandis que d'autres sont davantage plébiscités pour des activités de loisirs (Tab. 1 & 2).

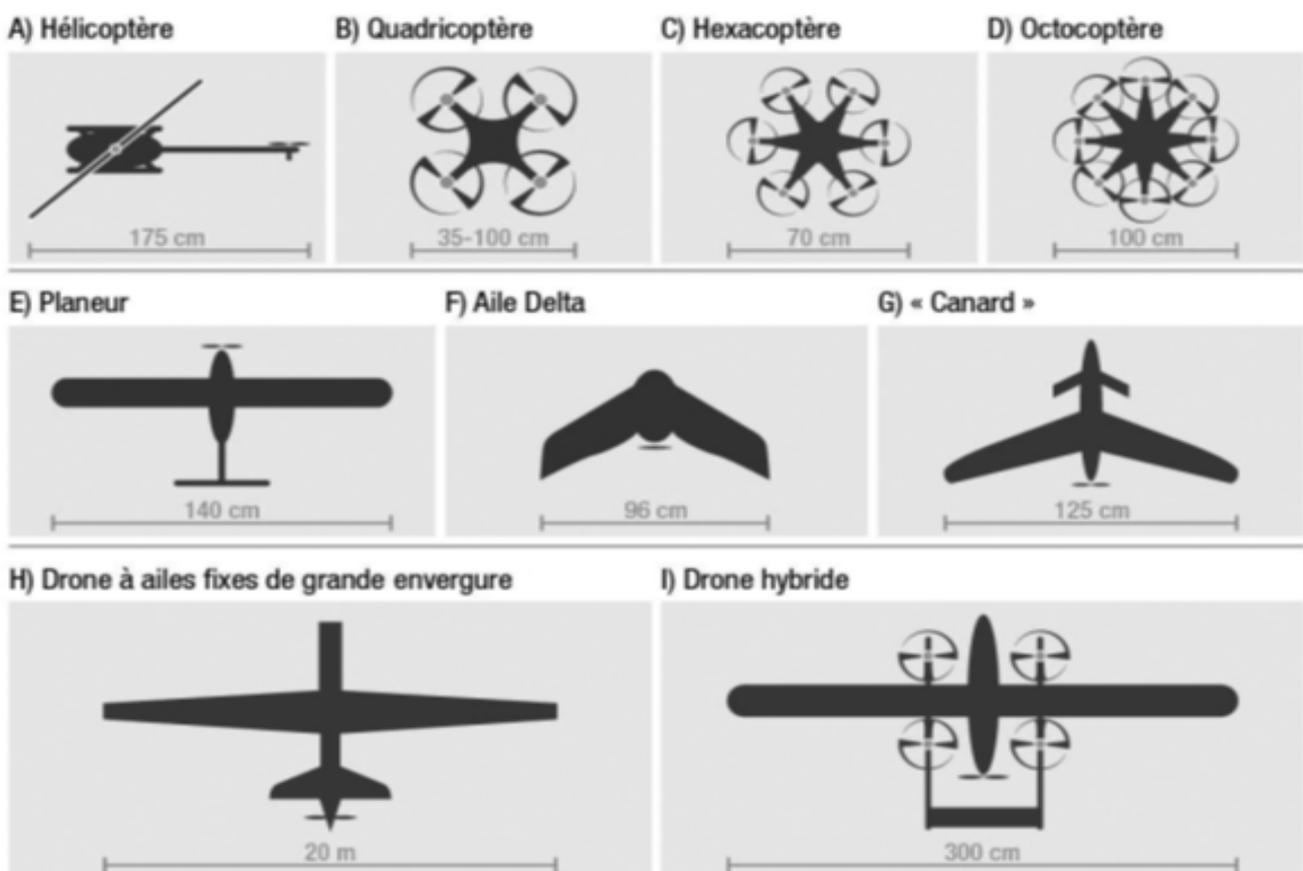


Figure 4 : Silhouette des différentes typologies de drone. Source : Charbonneau & Lemaître, 2021.

Dans la catégorie Multi-Rotor nous y retrouvons les :

Catégorie	Image	Usage	Avantages / Inconvénients	Caractéristiques
Monocoptère	 <p>Ex : Flir Black Hornet</p>	Militaire, loisir	<p>Avantages : Compact, léger, discret</p> <p>Inconvénients : Onéreux en usage, mécanique fragile, chute en cas de panne rotor, emport</p>	<p>Poids : entre 0.018 kg et 0.07 kg suivant les générations</p> <p>Charge utile : 0 kg</p> <p>Autonomie de vol : environ 25 min</p>
Bicoptère	 <p>Ex : V-COPTR FALCON - ZEROZERO ROBOTICS</p>	Loisir	<p>Avantages : Compact, léger, aérodynamique</p> <p>Inconvénients : Chute ne cas de panne rotor, faible emport</p>	<p>Poids : 1.5 kg</p> <p>Charge utile : 0.15 kg</p> <p>Autonomie de vol : environ 50 min</p>
Tricoptère	 <p>Ex : Yi Technology Yi Erida</p>	Loisir	<p>Avantages: Compact, léger, aérodynamique</p> <p>Inconvénients : Chute en cas de panne rotor, faible emport</p>	<p>Poids : 1.5 kg</p> <p>Charge utile : 0.5 kg</p> <p>Autonomie de vol : environ 40 min</p>
Quadricoptère	 <p>Ex : DJI Matrice 350 RTK</p>	Loisir et professionnel général	<p>Avantages : Stabilité, autonomie maîtrisée, fort emport</p> <p>Inconvénients : Chute en cas de panne rotor</p>	<p>Poids : 6.3 kg</p> <p>Charge utile : 2.7 kg</p> <p>Autonomie de vol : environ 55 min</p>
Hexacoptère	 <p>Ex : Yuneec H520</p>	Professionnel agriculture et cinéma	<p>Avantages : Fort emport, résistance au vent, maintien en vol en cas de panne d'un moteur</p> <p>Inconvénients : Faible autonomie, volumineux</p>	<p>Poids : 1.98 kg</p> <p>Charge utile : 1.6 kg</p> <p>Autonomie de vol : environ 30 min</p>

Catégorie	Image	Usage	Avantages / Inconvénients	Caractéristiques
Octocoptère	 <p>Ex : DJI Agras MG - P1</p>	Professionnel agriculture et cinéma	<p>Avantages : Très fort emport, résistance au vent, maintien en vol en cas de panne moteur</p> <p>Inconvénients : Autonomie, volumineux, onéreux en usage</p>	<p>Poids : 23.8 kg</p> <p>Charge utile : 10 kg</p> <p>Autonomie de vol : environ 20 min</p>

**Tableau 1** : Exemples, avantages, inconvénients et usage de chaque typologie de drone à voilure tournante. Source : page des constructeurs, et retour d'expérience Prodrone pour la partie avantage/inconvénients.

Un des inconvénients majeurs de ces drones est leur autonomie. Afin de pallier cette limite, Il existe une liaison filaire avec un poste de chargement pour une durée de vol illimité que l'on trouve principalement sur les différents quadricoptères et hexacoptères (Fig. 5). Cependant ces outils ne peuvent pas se déplacer librement dans l'espace.



**Figure 5** : Schéma de Fotokite Sigma avec une liaison filaire et sa drone box. Source : fotokite.com

Dans la catégorie voilure fixe et VTOL :

Catégorie	Image	Usage	Avantages / Inconvénients	Caractéristiques
Aile volante <1.5 m	 Ex : Parrot Disco	Loisir et professionnel (cartographie)	Avantages : Discret, léger, bonne autonomie  Inconvénients : Pas de vol stationnaire, vitesse de vol minimal, faible emport	Poids : 0.75 kg  Charge utile : 0.15 kg  Autonomie de vol : environ 45 min
Aile volante >1.5 m et <4 m	 Ex : Delair DT26	Professionnel (cartographie)	Avantages : Discret, léger, grande autonomie, capacité d'emport, longue élévation  Inconvénients : Pas de vol stationnaire, vitesse de vol minimal, zone de décollage/atterrissage importante	Poids : 15 kg  Charge utile : 3 kg  Autonomie de vol : environ 170 min
Aile volante >4 m	 Ex : Boreal UAS	Professionnel (cartographie) et militaire	Avantages : Discret, très grande autonomie, forte capacité d'emport, très longue élévation  Inconvénients : Pas de vol stationnaire, vitesse de vol minimal, rampe de lancement pour décollage, poids important, zone de décollage/atterrissage importante contraintes réglementaires	Poids : 35 kg  Charge utile : 7 kg  Autonomie de vol : environ 480 min
VTOL	 Ex : Wintra One	Professionnel (cartographie)	Avantages : Discret, grande autonomie, décollage vertical  Inconvénient : Pas de vol stationnaire	Poids : 3.7 kg  Charge utile : 0.8 kg  Autonomie de vol : environ 60 min

**Tableau 2 :** Exemples, avantage, inconvénients et usage de chaque typologie de drones à voilure fixe et VTOL.

## ➤ C. Évolution des capteurs associés au drone

Parallèlement à l'évolution du drone et de sa typologie, les capteurs portés par ces technologies ont également connu une révolution. Un capteur est un dispositif qui détecte et mesure des paramètres physiques ou chimiques, puis convertit ces données en signaux électriques ou numériques pouvant être interprétés par des systèmes informatiques ou électroniques. Les capteurs sont utilisés pour surveiller et collecter des informations sur divers aspects tels que la température, la pression, la lumière, la distance ou d'autres variables, en fonction de leur type et de leur application. (Sources : *Introduction to Sensors - John Vetlesen, 2020 / IEEE*).

Les premiers capteurs utilisés sur les drones étaient des caméras sportives type GoPro, caméra présentant les avantages d'un appareils compacts, résistants aux conditions extrêmes, conçus pour filmer des vidéos et capturer des images lors d'activités dynamiques ou de plein air. (Source : *DJI Phantom : un drone pour caméra GoPro – Edouard M., 2013*), ou des boîtiers photos de type reflex. Les premiers montages se faisaient avec une fixation fixe sur le corps de l'appareil (Fig. 6).



**Figure 6 :** Un drone 3DR Solo avec une installation de caméra GoPro ayant une fixation mécanique. Celui-ci est apparu en 2015 et c'est un des premiers capteurs portés par un drone. (Source : *leptidrone – Test du drone 3DR Solo : élégant et performant – Vincent B., 2015*)

Les drones ayant des mouvements difficilement contrôlables à leurs débuts, combiné par un manque de stabilisation des capteurs, les rendus photos et vidéo étaient faiblement qualitatifs (flou de bouger important). La première solution pour gagner en liberté de mouvement et en stabilisation fut de monter le capteur sur une nacelle motorisée (Fig. 7).



**Figure 7 :** Photo d'une Nacelle de Stabilisation DJI H4-3D pour DJI Phantom (janvier 2015). Crédit photo DJI

Par la suite, afin de pour continuer de gagner en qualité, les nacelles motorisées se sont pourvues d'un deuxième axe de roulis, puis un troisième axe de lacet. Elles ont également progressé sur la stabilisation de la nacelle grâce aux gyroscopes (Fig. 8a), puis par la technologie 5 axes en novembre 2014 (Fig. 8b). Cette dernière permet notamment de compenser les mouvements indésirables de l'appareil.

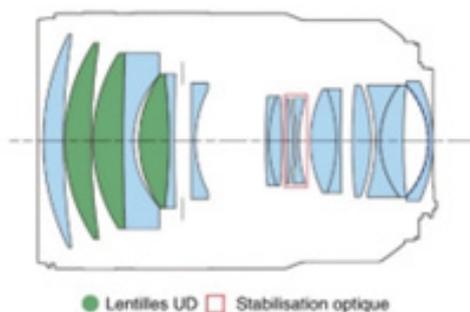


**Figure 8a** : photo d'une nacelle motorisée à 3 axes. Nacelle DJI Zenmuse Z15 pour reflex, ici Sony Alpha 7 (Avril 2015), Crédit photo DJI



**Figure 8b** : Photo de la technologie 5 axes. Stabilisation d'un boîtier Sony A7 III sur 5 axes grâce aux capteurs gyroscopiques. (Sources : Site Sony France).

En complément de la stabilisation des boîtiers, les objectifs utilisés, ont également été équipés d'une technologie de stabilisation optique avec pour objectif d'accroître les capacités d'absorption de mouvement. La technologie 4 axes apparaît en 2009 (Fig. 9).



**Figure 9** : Schéma d'un groupe de Lentilles qui se déplacent pour compenser les mouvements. Source : Site Phototrend

La dernière technologie de stabilisation introduite est celle de la stabilisation numérique (2016). Les logiciels de cette technologie présents dans les boîtiers de dernières générations, permet la détection des mouvements de caméra tout en affinant les réglages (Fig 10.).



Figure 10 : Exemple de différence entre Stabilisation d'Horizon actif et non-actif, extrait de la vidéo d'Abe Kislevitz réalisé en 2020 : <https://www.youtube.com/watch?v=n5-BXQw2kJ4>

## ➤ D. Les différentes typologies de capteurs

Nous distinguons 6 familles de capteurs différentes :

- Les capteurs RVB ou (RGB)
- Les capteurs thermiques
- Les capteurs avec télémètre laser
- Les capteurs multispectraux
- Les capteurs LiDAR
- Les capteurs de mesure spécifique

### 1. Les capteurs RVB (ou RGB)

Le capteur le plus connu est le capteur Rouge-Vert-Bleu (RVB) ou RGB pour Red-Green-Blue régulièrement employé dans les activités techniques de l'audiovisuel. Ces capteurs sont utilisés dans différents domaines, la photographie, la vidéographie de cinéma ou de communication, la photogrammétrie, la cartographie, la surveillance, la recherche visuelle, l'inspection.

La taille du capteur photographique peut être adapté en fonction des besoins et des usages (Fig. 11). Le capteur est associé à une focale, fixe pour la majorité des usages avec les drones « Ready to Fly » et interchangeable sur les gammes orientées aux usages professionnels.

Il existe 2 types de focales, la focale fixe et la focale variable ou « zoom ».

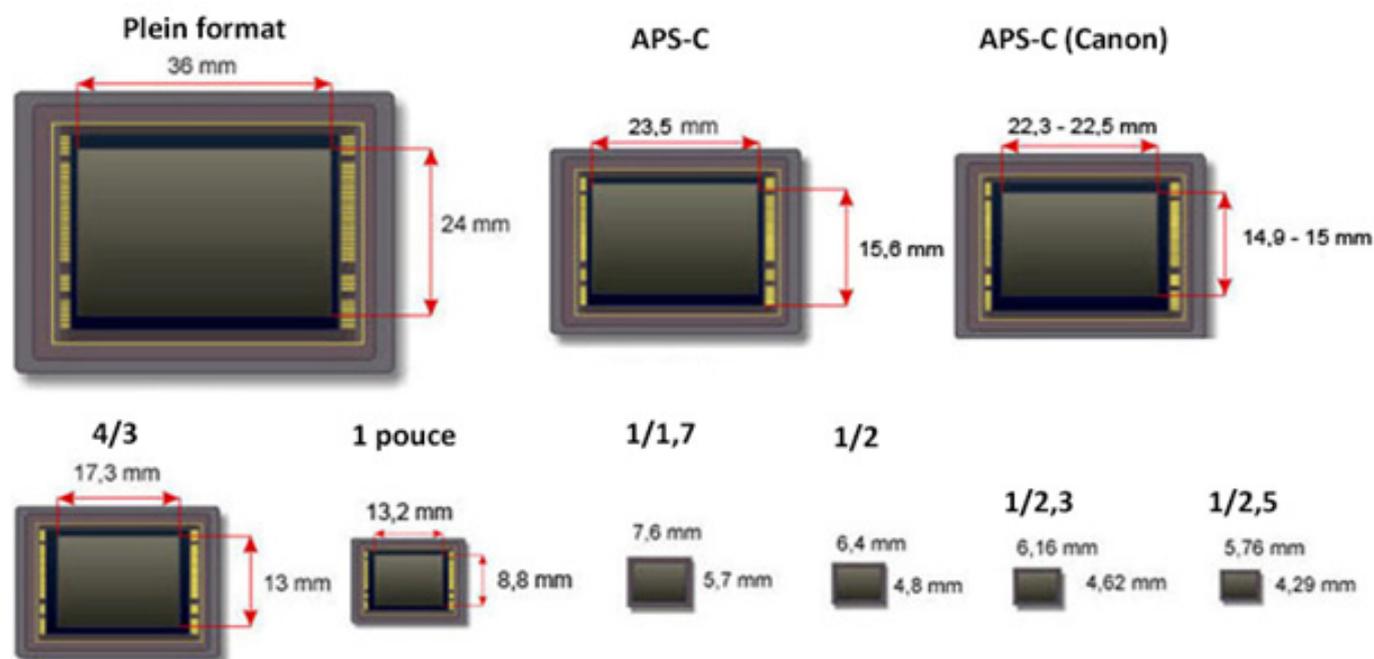
La focale fixe possède une longueur focale unique, ce qui signifie que la distance entre le capteur et le sujet ne peut pas être modifiée par une action de zoom. De plus, la focale fixe est plus légère dans la majorité des cas et est plus simple de conception que ce soit au niveau matériel que pour sa gestion de logiciel par le drone. Celle-ci n'a pas la capacité de modifier l'angle de vue, mais le drone pouvant se déplacer facilement et librement dans l'espace, c'est son action de déplacement qui effectue le « zoom » entre le capteur et le sujet.

La focale variable, offre quant à elle une capacité de zoom grâce à une variation de la valeur de la focale. Cela permet aux opérateurs de drones de modifier le champ de vision et de capturer des images à différentes distances sans devoir déplacer le drone, il faut bien évidemment que la nacelle et l'objectif soit compatibles avec le drone, le logiciel de gestion de l'appareil ainsi qu'avec la radiocommande).

Il existe plusieurs types de focale variable identique aux activités de la photographie (*sources : [dji.com / shop.dji.com](https://dji.com/shop.dji.com) / [dslrpros.com](https://dslrpros.com)*) :

- Objectifs grand angle : focale courte (autour de 12 à 24 mm en équivalent 35 mm) ex : DJI Mavic Air 2 (focale fixe 24 mm).
- Objectifs standards : focale moyenne (autour de 35 à 50 mm en équivalent 35 mm) ex : DJI Mavic 3 Pro (caméra Hasselblad focale 24 mm et caméra télé 70 mm).
- Objectifs téléobjectifs : focale longue (autour de 70 mm et plus en équivalent 35 mm) ex : DJI Mavic 3 Pro (caméra télé 166 mm).
- Objectifs à focale variable : ex : Zenmuse Z30 (29 mm – 872 mm, zoom optique x30).
- Objectifs spécialisés : focale ultra courte et macro.

La vidéographie s'appuie également sur cette technologie. Le capteur et sa focale peuvent être soit directement installés sur une nacelle stabilisée (*Fig. 12*), soit mis sous un carénage intégré au drone (*Fig. 13*)



**Figure 11** : Schéma des principaux formats de capteurs. Source : Karyl-aka, 2022. <https://www.cnetfrance.fr/produits/s-y-retrouver-dans-la-taille-des-capteurs-en-photo-numerique-39713467.htm>



**Figure 12** : Nacelle stabilisée Osmo Mobile 6. Crédit photo DJI



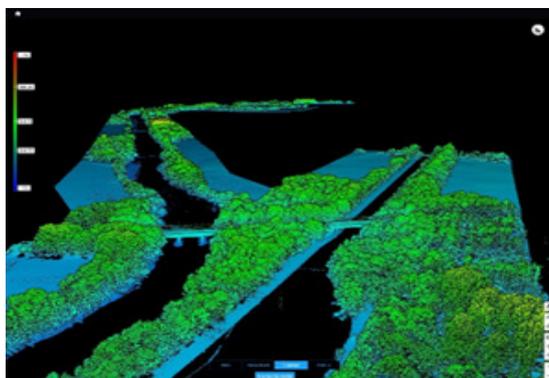
**Figure 13** : Drone Mavic 3 Pro avec les 3 capteurs et focales associées différentes. Crédit photo DJI



**Figure 14** : Différences visuelles entre 3 focales fixes (166mm Tele Camera, 70 mm Medium Tele Camera et 24 mm Hasselblad Camera), le drone étant au même emplacement sur les 3 photos. Crédit photo DJI

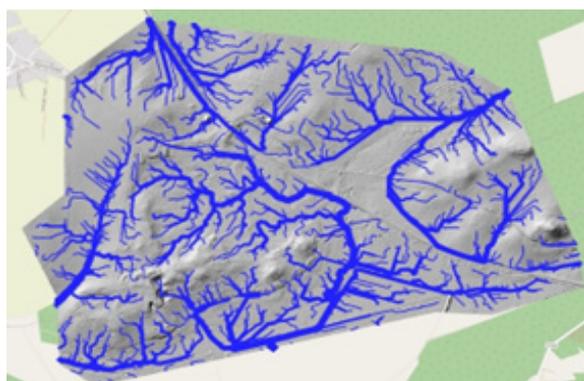


Les Capteurs LiDAR envoient un ensemble de faisceaux de lumière très concentré au sol permettant de générer un nuage de points, capteur principalement utilisé dans les métiers de la topographie (Fig. 18).



**Figure 18** : Topographie de berge réalisée avec un capteur LiDAR révélant les variations de relief et les structures cachées sous la végétation. Source : Prodrone

Comme exemple d'utilisation d'un capteur LiDAR dans l'écologie nous pouvons citer le suivi de fuite des eaux en zone humide (Fig. 19, Suivi opéré par Prodrone) :



**Figure 19** : Suivi de fuite des eaux en zone humide. Source : Prodrone

Les Capteurs de mesure spécifique : Il y a une infinité de possibilités sur les emports de capteurs spécifiques, le porteur peut emmener tout capteur de poids et taille pouvant être supporté et soulevé dans les airs à des fins militaires, scientifiques, expérimentales, ... Par exemple, ces capteurs peuvent être des détecteurs de Méthane, détecteur de soufre, magnétomètre, détection de signal électronique (Fig. 20), ...



**Figure 20** : Drone équipé d'un capteur électronique qui sert à détecter les signaux électroniques. Source : altigator.com

## 2. Les autres capteurs

Les capteurs thermiques (Fig. 15) permettent quant à eux d'obtenir des signatures thermiques et donc de détecter la présence d'animaux dans des environnements complexes (végétation, anfractuosités...).



Figure 15 : Drone Matrice 30T équipé d'un capteur thermique. Source : Prodrone

Certains drones offrent la possibilité d'embarquer plusieurs capteurs comme le drone en Figure 16 qui intègre également un capteur du type télémètre laser. Ce capteur permet de mesurer la distance entre l'aéronef et le point ciblé, et permet également sur les versions les plus avancées de définir les coordonnées X et Y de la cible. Comme exemple d'utilisation du capteur télémètre laser, nous pouvons citer la localisation d'un nid ou encore le calcul de la distance entre le drone et le nid.



Figure 16 : Drone Matrice 30T équipé d'un capteur télémètre laser (capteur rectangulaire). Crédit photo DJI

Les Capteurs Multispectraux/Hyperspectraux (Fig. 17) permettent d'acquérir des données sur la réflectance des végétaux et d'obtenir des informations sur le taux de chlorophylle, le stress hydrique... grâce à des indices normalisés de type NDVI.

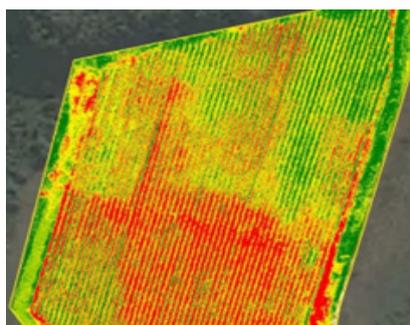


Figure 17 : Conversion d'images brutes en carte de résultat via le logiciel Pix4D Fields. Source : Pix4D

## IV. Application du drone aux suivis d'espèces d'oiseaux



### ➤ A. Retour d'expérience des inventaires ornithologiques par drone d'après Charbonneau & Lemaitre (2021)

Dans leur travail de synthèse, [Charbonneau & Lemaitre \(2021\)](#) répertorient 21 études faisant mention de l'utilisation du drone pour inventorier les nids, dénombrer une colonie, évaluer la détection d'une espèce, étudier la réponse comportementale ou physiologique face au drone ou encore pour développer un algorithme de dénombrement automatique. Ces études ont été réalisées sur plus de 30 espèces d'oiseaux différentes (oiseaux marins, espèces d'oiseaux d'eau, des rapaces, autres espèces forestières, de milieux ouverts, etc.).

Les auteurs répertorient 28 drones différents utilisés dans le cadre d'étude ornithologique. Parmi eux 8 drones sont à voilures fixes (1 aile volante et 7 planeurs), et 20 à voilures tournantes (5 octocoptères, 2 hexacoptères, et 13 quadricoptères) (Annexe 1). Si, d'après ces résultats, les drones à voilures tournantes tendent à être privilégiés aux planeurs et aux ailes volantes, ces dernières ne sont visiblement pas à exclure. En complément, ces auteurs mettent en évidence que les caractéristiques des drones utilisés pour les suivis ornithologiques varient de manière importante selon les études (poids, autonomie, prix, capteurs ...), tout comme les protocoles de vols (hauteurs des vols notamment). Ces propos sont ainsi développés dans le chapitre 3 du présent corpus.

### ➤ B. Retour d'expérience des inventaires ornithologiques par drone en France

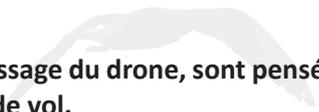
En France, plusieurs études ont été menées par des structures privées et associatives depuis la moitié des années 2010. Depuis, plus d'une cinquantaine d'espèces d'oiseaux ont bénéficié d'un inventaire, ou de suivi à l'aide d'un drone à voilure tournante.

Nous nous appuyons sur les retours d'expériences des études menées par Ecosphère et de son partenaire exclusif Prodrone, pour présenter des exemples d'études réalisées en France.

La majorité des études visait à :

- Détecter les espèces discrètes en milieux difficiles d'accès (roselières, marais, falaises, immenses plaines agricoles, forêts, etc.) ;
- Détecter et dénombrer les nids pour chaque espèce mais aussi les stationnements des hivernants, haltes migratoires (comptages, etc.) ;
- Étudier finement leur comportement.

**Le protocole de vol et les points de décollage et atterrissage du drone, sont pensés de façon à ne pas déranger les espèces tout en respectant les règles administratives de vol.**



## 1. Les hauteurs de vol requises

La hauteur de vol du drone a été expérimentée pour chaque espèce d'oiseau étudiée. Celle-ci diffère en fonction de chaque espèce et doit constamment être adaptée selon :

- La luminosité, sens du vent, couverture nuageuse et autres facteurs météorologiques pouvant altérer la sensibilité des individus ;
- La réactivité de l'espèce suivie : selon les cas, certaines espèces ne peuvent être suivies par drone pour des raisons de stress majeur.
- Le stress des oiseaux qui peut varier au cours de la même session de vol. Une accélération trop rapide du drone, un reflet, un prédateur, sont autant de facteurs pouvant induire une perturbation sur site. Dans ces cas précis, il convient d'arrêter le vol.

Nous recommandons fortement de toujours opter dans un premier temps pour un vol en altitude élevée tout en observant en direct la réponse comportementale de/des individu(s). Puis, d'ajuster les hauteurs ainsi que les trajectoires de vol, selon les signes et le niveau de stress observés. Enfin la hauteur de vol du drone dépend fortement des objectifs fixés et des capteurs disponibles pour le suivi.

A noter que les autres espèces sensibles présentes sur un milieu donné doivent toujours être prises en considération même si elles ne font pas partie de l'objectif initial, ceci afin de ne pas les déranger.

Etude de cas d'une petite population de guifettes nichant dans un marais.

*Cette petite colonie a été suivie au cours de plusieurs sessions par un ornithologue et un télépilote, afin d'estimer les effectifs. Lors de la première session, il a été décidé de faire voler le drone à une hauteur de 100m, puis de revoir progressivement à la baisse cette hauteur par palier de 5m, jusqu'à atteindre une hauteur de 80m. Cependant, la base de référence identifiée lors de la première session, n'était plus valable lors de la seconde session, en raison de présence d'un busard des roseaux sur site qui rendait la colonie particulièrement réactive.*

## 2. Les capteurs utilisés

Plusieurs types de capteur sur le marché sont aujourd'hui proposés et susceptibles d'être utilisés dans le cadre des suivis ornithologiques. Retenons deux cas de figures :

### 2.a. La recherche d'individu, de son nid ou aire

La recherche d'individu ou de son nid s'applique majoritairement lorsque le gestionnaire cherche à obtenir des données sur la présence d'une espèce discrète, dans un milieu difficile d'accès. Pour y répondre, la qualité de l'imagerie n'est pas une absolue nécessité, et il est possible d'utiliser, ou non, un zoom puissant.

Exemple : la recherche des nids de busards ou autres espèces isolées (Œdicnème criard, Vanneau huppé, Outarde canepetière, etc.) peut se faire avec un capteur de moindre qualité et un zoom peu puissant (un zoom x20 peut convenir ; Fig. 21).

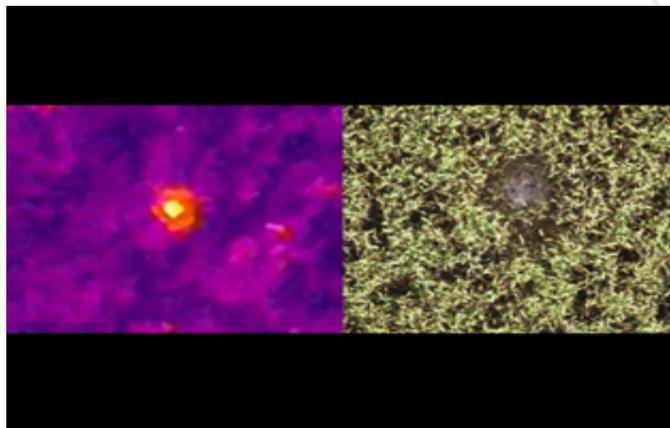


Figure 21 : Détection d'un nid de busards dans un champ grâce à un drone équipé d'une caméra thermique. Source : Prodrone.

Toutefois la puissance du zoom proposée par certains constructeurs peut constituer un réel avantage pour l'inventaire. A titre d'exemple, un zoom puissant permettrait de conserver une altitude peu impactante sur une nichée, tout en permettant d'ager les poussins observés.

Selon des contextes bien différents, le capteur thermique peut s'avérer être efficace et faire gagner un temps précieux pour la détection de l'espèce visée. La détection des nids de busards par exemple dans les immenses plaines agricoles uniformes serait fastidieuse et chronophage sans ce type de capteur. En revanche, le capteur thermique n'a pas d'utilité pour des diagnostics particuliers comme la recherche de l'aire du Faucon pèlerin sur des pylônes haute-tension.

Cependant, le capteur thermique présente certaines limites :

- La définition de l'image ne permet pas actuellement de discriminer certaines espèces entre elles (cas des busards par exemple) ;
- Les conditions météorologiques du moment peuvent altérer la qualité de l'imagerie. Le résultat produit lors d'un temps très ensoleillé à 20°C n'aura pas le même rendu qu'un temps couvert à 20°C. Nous conseillons de réaliser ces temps de vol à l'aube, là où les températures sont les plus fraîches et où la luminosité est suffisamment bonne pour identifier l'espèce.

## 2.b. Cas de dénombrement dans une colonie

Le dénombrement des colonies d'oiseaux (marins ou pas), le dénombrement des couveurs ou individus en stationnement migratoire peut vite s'avérer fastidieux (proximité de la colonie ou du stationnement, végétation au sol, identification des espèces, brume de chaleur, etc.). L'utilisation du drone peut permettre de pallier ces difficultés. Pour se faire, il convient de réaliser une orthophotographie de la colonie ou du reposoir. Celle-ci doit être réalisée à bonne hauteur de manière à passer le moins de temps sur site (limiter les dérangements) tout en prenant une image de qualité suffisante pour en analyser son contenu ;

Dans ce cas précis l'utilisation de capteur de très haute-définition est essentiel au traitement ultérieur de l'image<sup>1</sup>.

Exemple : la colonie mixte Mouette rieuse/Mouette mélanocéphale a justifié l'utilisation de capteurs puissants (résolution à 40 mpx) pour distinguer les deux espèces entre elles avec suffisamment de qualité. (Fig. 22)



**Figure 22** : Colonie de Mouettes Rieuses/Mouettes Mélanocéphales prise par drone à Conchil-le-Temple sur îlot végétalisé. Zoom optique x7 à une hauteur de vol d'environ 70 mètres. Source : Prodrone

Les drones et capteurs utilisés dès 2017 par Ecosphère & Prodrone étaient très performants à l'époque (Tab. 3). Les résultats étaient significatifs et permettaient d'obtenir des images de qualité suffisante pour nos analyses. Cependant l'évolution technologique des matériaux et autres composants permet depuis l'été 2023 (com.pers. Prodrone) d'accéder à des fonctionnalités supérieures :

- Autonomie beaucoup plus importante (jusqu'à 40min de vol selon les cas) ;
- Un confort de vol mieux assisté ;
- Un poids plus léger ;
- Un combo regroupant le capteur thermique et RGB (gain d'efficacité et de poids) ;
- Une définition de l'image bien plus importante aussi bien en RGB qu'en thermique.

Il est évident que la technologie du futur permettra encore d'améliorer les performances des porteurs et des capteurs. Bien entendu le choix de ces possibilités dépend aussi de l'espèce visée mais aussi le budget disponible pour chaque utilisateur.

1 Ce volet sera abordé au travers des tests TRIDA réalisés sur sites.

## ➤ C. Les drones utilisés et leur gamme tarifaire

Le marché du drone est florissant, si bien que le gestionnaire ou le professionnel souhaitant acheter un drone peut être confronté à un large choix. La gamme de prix des drones utilisés dans les inventaires et études ornithologiques, débute à environ 500 euros TTC jusqu'à 63 000 € TTC. Outre le prix à l'achat et le coût à l'usage, le choix du drone doit être motivé par les objectifs et les usages visés. Le Tableau 4 synthétise les avantages et les inconvénients de 17 drones différents et disponibles sur le marché.

Le tableau 4 indique la gamme tarifaire des outils employés :

Nom de l'outil	Tranche tarifaire (en € TTC) au 31/10/2024	Usage des études	Avantages	Inconvénients	Coût à l'usage <sup>1</sup>
DJI Mavic Mini	~500 €	Reconnaissance visuelle	Coût / Facilité de mise en oeuvre	Demande un vol bas pour reconnaissance de l'espèce	Faible
DJI Mavic 2	~1 500 €	Reconnaissance visuelle	Coût / Facilité de mise en oeuvre	Demande un vol bas pour reconnaissance de l'espèce	Faible
DJI Mavic 2 Dual	~3 000 €	Reconnaissance visuelle et indication thermique	Facilité de mise en oeuvre / capteur thermique intégré pour détection nocturne	Capteur thermique basse résolution / demande de vol bas pour reconnaissance de l'espèce	Faible
DJI Mavic 3T	~5 500 €	Reconnaissance visuelle et recherche thermique	Facilité de mise en oeuvre / capteur thermique intégré pour détection nocturne / zoom optique hybride 56x		Moyen
DJI Mavic 2 Advanced	~6 000 €	Reconnaissance visuelle et recherche thermique	Facilité de mise en oeuvre / capteur thermique intégré pour détection nocturne	Demande un vol bas pour reconnaissance de l'espèce	Moyen
Autel Evo 2 Dual	~7 000 €	Reconnaissance visuelle et recherche thermique	Facilité de mise en oeuvre / capteur thermique intégré pour détection nocturne / grande capacité de résistance au vent	Zoom optique faible / demande un vol bas pour reconnaissance de l'espèce	Moyen

1 C'est le cout total d'utilisation d'un produit ou service, incluant l'achat, l'entretien, l'énergie et autres dépenses sur sa durée de vie. Celui-ci inclus un appareil prêt à voler ainsi que ses accessoires complémentaires indispensables (chargeurs, hélices, batteries de rechange, ...).

Faible = inférieur à 3000 euros

Moyen = entre 3000 et 15 000 euros

Élevé = entre 15 000 et 60 000 euros

Très élevé = entre 50 000 euros et supérieur

Nom de l'outil	Tranche tarifaire (en € TTC) au 31/10/2024	Usage des études	Avantages	Inconvénients	Coût à l'usage
Parrot Anafi USA	~8 500 €	Reconnaissance visuelle et recherche thermique	Rapidité de mise en oeuvre / caméra thermique intégrée / zoom 32x numérique		Moyen
DJI Matrice 30	~9 000 €	Reconnaissance visuelle et identification de l'espèce à haute altitude	Rapidité de mise en oeuvre / capacité de zoom	Pas de capteur thermique	Moyen
Autel Robotics EVO Max 4T	~9 200 €	Reconnaissance visuelle / recherche thermique / identification de l'espèce à haute altitude	Facilité de mise en oeuvre / capteur thermique intégré pour détection nocturne / zoom hybride 160x		Moyen
DJI Matrice 30T	~13 000 €	Reconnaissance visuelle / recherche thermique / identification de l'espèce à haute altitude	Rapidité de mise en oeuvre / capacité de zoom / capteur thermique intégré pour détection		Moyen
Autel Evo 2 Dual	~7 000 €	Reconnaissance visuelle et recherche thermique	Facilité de mise en oeuvre / capteur thermique intégré pour détection nocturne / grande capacité de résistance au vent	Zoom optique faible / demande un vol bas pour reconnaissance de l'espèce	Moyen
DJI Matrice 300 RTK	~13 000 €	Reconnaissance visuelle / recherche thermique / identification de l'espèce à haute altitude	Grande polyvalence / nombreux capteurs compatibles	Mise en œuvre et transport plus complexe / Bruit important / Coût important des batteries / Coût important des périphériques	Élevé
Capteur Zenmuse H20	~4 500 €	Reconnaissance visuelle et identification de l'espèce à haute altitude	Capacité de zoom	Compatible uniquement avec le DJI Matrice 300 RTK / Pas de thermique	Élevé

Nom de l'outil	Tranche tarifaire (en € TTC) au 31/10/2024	Usage des études	Avantages	Inconvénients	Coût à l'usage
Zenmuse P1	~6 000 €	Reconnaissance visuelle et identification de l'espèce à haute altitude	Résolution du capteur important	Focale fixe / Compatible uniquement avec le DJI Matrice 300 RTK	Élevé
Nacelle Gremsy + A7RIV	~8 400 €	Reconnaissance visuelle et identification de l'espèce à haute altitude	Résolution du capteur important	Focale fixe	Élevé
Zenmuse H20T	~11 500 €	Reconnaissance visuelle / recherche thermique / identification de l'espèce à haute altitude	Capacité de zoom / capteur thermique	Compatible uniquement avec le DJI Matrice 300 RTK	Élevé
Nacelle Phase One + P3	~50 000 €	Reconnaissance visuelle / identification de l'espèce à haute altitude	Objectif interchangeable	Focale fixe / prix élevé	Très élevé
Phase One ixm - gs - 120	~63 000 €	Reconnaissance visuelle / identification de l'espèce à haute altitude	Vitesse d'obturation très élevée	Focale fixe / prix élevé / nécessite un gros porteur	Très élevé

**Tableau 4** : Tableau synthétique des gammes tarifaire (au 31/01/2024) des drones utilisés pour les suivis et les études ornithologiques.



## V. Réglementations

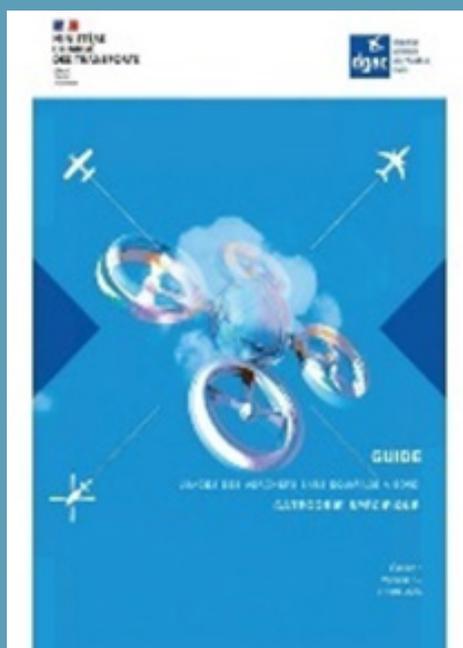
Qu'il relève d'une activité de loisirs ou professionnelle, l'utilisation du drone, est soumise à plusieurs règles qu'il faut absolument respecter pour assurer la sécurité du télépilote, la sécurité de l'espace aérien et des tiers au sol. Le drone faisant partie de la classe des aéronefs, il faut donc comprendre la réglementation aéronautique générale pour comprendre les règles qui sont alloué au drone.

C'est pourquoi nous détaillons ci-dessous, les couches réglementaires successives dans lesquelles le drone s'inscrit en commençant par la réglementation générale associée à l'aéronautique, jusqu'à la réglementation de l'utilisation du drone dans les espaces protégés.

### ➤ A. La réglementation Aéronautique générale

Les normes d'utilisation du drone et les pratiques recommandées sont éditées par une organisation internationale créée en décembre 1944 lors de la convention de Chicago (*Convention on International Civil Aviation, 1948*) : l'Organisation Aviation Civile Internationale (*OACI*). Ce sont ensuite les différentes instances aéronautiques nationales qui sont chargées de faire appliquer ces lois aéronautiques. Pour la France les textes sont édités par l'Agence Européenne de la Sécurité de l'Aviation (*EASA*) puis retranscrits en français par la Direction Générale de l'aviation (*DGAC*) (à retrouver sur le site du Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires dans « l'exploitation des drones en catégorie ouverte » et dans « l'exploitation des drones en catégorie spécifique », *Encadré A*).

#### Encadré A : Réglementation à connaître



Convention de Chicago : Convention on International Civil Aviation. Ninth Edition - 2006 (icao.int)

Une présentation d'introduction destinées à toutes les catégories d'exploitants et aux constructeurs : Présentation PowerPoint (ecologie.gouv.fr)

Guide exploitation des drones en catégorie ouverte (vol à faible risque) DGAC : Guide\_categorie\_Ouverte.pdf (ecologie.gouv.fr)

Guide exploitation des drones en catégorie spécifique (vol à risque modéré à important) DGAC : Guide\_categorie\_Specifique\_0.pdf (ecologie.gouv.fr)

La réglementation en vigueur met notamment l'accent sur la sécurité via un ensemble de règles, mais aussi par la certification, la formation des équipages et la culture juste plus communément appelée « retour d'expérience ». Tout utilisateur de l'espace aérien se doit d'appliquer les règles de l'air. Ces règles regroupent trois grands principes :

L'utilisation de drone implique d'entrer dans l'espace aérien et de connaître les spécificités de cet espace. L'organisation de l'espace aérien vise à répondre à plusieurs objectifs (*Direction de la sécurité aérienne d'État*) :

- La sécurité de la circulation aérienne ;
- La régulation du flux de la circulation ;
- L'adaptation de la réglementation à la densité et au type de trafic ;
- Une gestion harmonisée de l'espace situé au-dessus de la surface du sol.

Chaque pays publie les données de son espace aérien dans un AIP (*Air Information Publication – publication d'information aéronautique*). Ces données sont ensuite matérialisées sur la carte OACI (*Fig. 23*).

Les acteurs du monde de l'aéronautique ont pour obligation de connaître et d'utiliser ces informations aéronautiques. Les informations contenues dans ces cartes sont essentielles lors de la préparation du vol. Notamment, elles permettent la visualisation des différents espaces aériens et de prendre connaissance des contraintes et autorisations (réglementaires et administratives) à demander.



**Figure 23** : Exemple de carte OACI sur la partie nord de la France. Les polygones rouges représentent les espaces aériens contrôlés de classe A, et les polygones bleus représentent les espaces aériens contrôlés de classes B, C, et D. Source : Carte OACI présente sur le Géoportail : <https://www.geoportail.gouv.fr/donnees/carte-oaci-vfr>

L'espace aérien est constitué de 4 types de zone, elle-même subdivisées en classe d'espace aérien ayant chacune leurs caractéristiques. Ces classes portent des acronymes ou lettres associées à des mots anglais. En effet, l'Anglais est la langue officielle de l'OACI, il s'agit d'un langage universel au sein de l'aéronautique mondiale afin d'éviter les accidents à la suite d'erreurs de compréhension ou de traduction.

Ainsi l'espace aérien est réparti selon les zones suivantes :

- Les zones non contrôlées<sup>1</sup> : 2 types de classes (F et G)
- Les zones contrôlées : De classe A, B, C, D, E

La classe A est interdite au drone.

Les autres classes sont soumises à autorisation administrative :

- Les zones à statut particulier

Ces zones peuvent être permanentes et soumises à des autorisations administratives et/ou à des horaires d'activation:

- Zones P (De l'anglais Prohibited) : Zone interdite de vol
- Zones R (De l'anglais Restricted) : Zone de vol restreinte
- Zones D (De l'anglais Dangerous) : Zone dangereuse

Ces zones à statuts particuliers peuvent être également temporaires, ce sont les zones :

- ZRT Zone Règlementée Temporaire : on peut voler mais sous conditions. Il faut demander d'autorisation au préalable auprès des autorités aéronautiques ou de l'organisme en charge de la zone. Il faut également une obtention de demande spécifique pour voler ;
- ZDT Zone Dangereuse<sup>2</sup> Temporaire : On peut voler sous les mêmes conditions que les ZRT ;
- ZIT Zone Interdite Temporaire : le vol est interdit sauf sous dérogation exceptionnelle qui se procure après une procédure stricte. Cependant il est rare d'obtenir cette dérogation ;
- CBA (De l'anglais Cross Border Area) : Zones à cheval sur la frontière de deux pays ;
- TSA (De l'anglais Temporary Segregated Area) : Zones réservées temporairement pour un usage exclusif.

Les zones militaires :

- SETBA : secteur d'entraînement basse altitude et haute vitesse. (Armée de l'air et de l'espace) ;
- VOLTAC : secteur d'entraînement de l'ALAT (aviation légère de l'armée de terre) ;
- RTBA : suite de zone R formant des couloirs aérien très basse altitude et haute vitesse.

Les vols sur ces trois zones militaires sont possibles sous certaines conditions. Il faut consulter le NOTAMs (*Notice to Airmen*) pour connaître si la zone est active ou non, et également les restrictions qui y sont imposées (altitude ou durée). En cas de vol lors d'une activation, il faut contacter les autorités locales, le CNOA (*Centre National des Opérations Aériennes*) ou l'organisme en charge afin d'obtenir une autorisation spéciale qui peut ne pas toujours être acceptée.

Les zones dangereuses ou d'interdiction permanente sont présentes sur la carte OACI avec une codification<sup>3</sup>. Les « zones P » sont numérotées et facilement retrouvables.

La figure 24 est un exemple le visuel d'une zone « P » sur la carte OACI Ici la zone de la centrale nucléaire de Dampierre-en-Burly. Zone P numéro 24 s'étalant de 0 à 3700 pieds.

1 Les pilotes doivent prendre des mesures pour éviter les collisions eux-mêmes et être particulièrement vigilants.

2 Une zone est qualifiée comme dangereuse lorsque des activités ou des conditions dans cette zone présentent des risques significatifs pour les aéronefs (ex : activités militaires, opérations aériennes spécifiques, activités industrielles, conditions météorologiques extrêmes, obstacles fixes comme des éoliennes, ...).

3 <https://sites.google.com/site/derogzonesinterdites/home>



**Figure 24** : Exemple de représentation de zone P sur la carte OACI. Source : Extrait de la carte OACI présent sur le Géoportail : <https://www.geoportail.gouv.fr/donnees/carte-oaci-vfr>

Il existe également des règles de priorité telles que :

- Priorité aux aéronefs habités (avions, hélicoptères, planeurs, ...)
- Priorité aux drones plus lourds ou de catégories spéciales (drone effectuant une mission de secours ou d'inspection critique).
- Évitement d'obstacles et maintien de distances de sécurité (autour des aéroports, près des centrales nucléaires, d'espaces militaires, ...).

## ➤ B. Évolution de la réglementation française relative aux aéronefs et à leurs usages dans l'espace aérien

La France est le premier pays au monde à réglementer l'usage d'aéronef télépiloté. Le premier cadre réglementaire intervient dans 2 Arrêtés du 11 avril 2012<sup>1</sup> relatif à la conception des aéronefs civils qui circulent sans aucune personne à bord, aux conditions de leur emploi et sur les capacités requises des personnes qui les utilisent. Le premier développe les caractéristiques des aéronefs télépilotés, les conditions d'évolution et les compétences du télépilote. Le second détaille les conditions d'évolution dans les espaces aériens.

Les premiers renforcements des usages d'aéronef circulant sans personne à bord pour accroître la sécurité et suivre l'évolution du marché, interviennent dans l'arrêté du 17 Décembre 2015<sup>2</sup> relatif à l'utilisation de l'espace aérien par les aéronefs qui circulent sans personne à bord.

Le 24 octobre 2016, dans la loi n° 2016-1428<sup>3</sup>, le dispositif réglementaire évolue, afin de diminuer les survols illégaux en forte augmentation. Il précise également les peines encourues en cas de vol en zone règlementée.

Le 30 mars 2017 une modification de l'arrêté de 2015 apporte quelques correctifs et mises à jour du texte, elle concerne principalement des simplifications de demandes d'autorisations.

1 Liens vers les arrêtés du 11 avril 2012 : <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000025834986> ; <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000025834953>

2 Lien vers l'arrêté du 17 décembre 2015 : <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000031679868>

3 Lien vers la Loi N°2016-1428 du 24 octobre 2016 : [https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000033293745?init=true&page=1&query=loi+n%C2%B0+2016-1428&searchField=ALL&tab\\_selection=all](https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000033293745?init=true&page=1&query=loi+n%C2%B0+2016-1428&searchField=ALL&tab_selection=all)

Une importante révolution réglementaire intervient dans l'arrêté du 3 décembre 2020<sup>1</sup> relatif à l'utilisation de l'espace aérien par les aéronefs sans équipage à bord. L'EASA ayant une volonté d'harmoniser l'usage du drone au sein de l'Europe y introduit par le biais de la DGAC une nouvelle réglementation. Celle-ci concerne les scénarios de vol (segmentations des types de vol en agglomérations et hors agglomérations), les diplômes du télépilote, les catégorisations des aéronefs et l'ouverture sur l'emploi du drone dans des usages interdits ou non prévus par les précédentes réglementations. A la date de rédaction de ce présent document, seuls les vols dit loisirs sont entièrement basculés dans cette nouvelle réglementation. La mise en application totale de la réglementation européenne interviendra fin 2025 (Fig. 25).

Enfin, l'abrogation de l'article D133-10 du Décret n° 2022-1397 du 2 novembre 2022<sup>2</sup> portant application de l'article L. 6224-1 du code des transports relatif au régime encadrant la captation et le traitement des données recueillies depuis un aéronef dans certaines zones, supprime, dès le 01 janvier 2023, l'obligation de déclaration de prises de vues aériennes dans le spectre du visible, comme celle de procéder à une demande d'autorisation pour réaliser des prises de vues hors du spectre du visible.



## Un point sur le calendrier : les scénarios standards



Figure 25 : Calendrier de la réglementation relative aux scénarios de vols des aéronefs sans équipage à bord. Source : DSA, 2021

## ➤ C. Réglementation drone en vigueur (au 13/12/2023) les connaissances essentielles

Pour réaliser ses vols les télépilotes français s'appuient sur la réglementation du 03 décembre 2020, celle-ci permet encore de voler dans les scénarios nationaux. Les scénarios européens STS équivalents n'étant pas encore définitivement publiés il est impossible, en cette date, de les exploiter.

1 Lien vers l'arrêté du 03 décembre 2020 : <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORF-TEXT000042635803#:~:text=1%C2%B0%20L'a%C3%A9ronef%20n,d'associations%20d'a%C3%A9romod%C3%A9lisme.>

2 Lien vers le décret : [https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000046519903?init=true&page=1&query=D%C3%A9cret+n%C2%B0+2022-1397+du+2+novembre+2022&searchField=ALL&tab\\_selection=all](https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000046519903?init=true&page=1&query=D%C3%A9cret+n%C2%B0+2022-1397+du+2+novembre+2022&searchField=ALL&tab_selection=all)

L'emploi de drone nécessite des connaissances théoriques et pratiques spécifiques. Ainsi, selon la classe de drone piloté, le pilote de drone professionnel doit passer un brevet d'aptitude de télépilote obtenu à la suite d'une formation (*Encadrés B et C*). Pour la DGAC, le drone s'inscrit dans le même espace aérien que les autres aéronefs donc les connaissances générales relatives au brevet sont communes avec les différents examens de l'aviation de loisirs. Dans les dernières mises à jour des référentiels de questionnaires, des connaissances spécifiques liées au drone ont été rajoutées.

La réglementation européenne régit le drone par la dangerosité du vol, la catégorie ouverte (vols à faible risque) puis la catégorie spécifique (vols de risques modérés à importants). Le pilote doit donc définir son scénario de vol et donc s'assurer qu'il détient le diplôme adéquat.

En effet, toute personne voulant piloter un drone doit réussir l'examen relatif aux scénarios ou catégorie(s) dans lequel il souhaite opérer, afin de voler en règles. La catégorie ouverte impose l'obtention d'un examen théorique en ligne, avec une auto-certification pratique pour la catégorie Ouverte A2, tandis que la catégorie spécifique impose une formation pratique en centre de formation et le passage d'un examen théorique en salle d'examen officielle OCEANE de la DGAC ou en ligne.

#### **Encadré B :**

Pour piloter un drone et passer le brevet de télépilote, à partir de 14 ans révolus. Une condition primordiale au pilotage de drone est de ne pas être sous influence de médicaments, alcool et drogues, ne pas mettre en danger l'aviation habitée, ne pas gêner les services d'urgence et interdiction de transporter des matières dangereuses.

#### **Le diplôme de formation ouverte d'un pilote d'aéronef :**

La formation se passe en ligne avec le passage d'un examen en autodidacte sur la partie théorique et ne nécessite pas de partie pratique en centre de formation.

Celle-ci vous permet d'obtenir le diplôme Catégorie Ouverte A1/A3 sur la plateforme AlphaTango (plateforme web française) si votre taux de réussite est adéquat.

Les conditions de vol applicables pour les sous-catégories A1/A3 sont :

- Hauteur maximale de vol de 120 m (sans restriction suivant la localisation).
- Ne jamais survoler de groupes de personnes.
- Télépilote âgé d'au moins 14 ans en France et peut varier entre 14 et 18 ans en Europe.
- Survol à proximité de personnes autorisés sans survol de rassemblement de personnes avec des drones de classe C0 (moins de 250 g) et C1 (m<900g)
- Survol loin de personnes et à au moins 150 m des zones résidentielles, commerciales, industrielles ou récréatives est autorisé avec des drones de classes C0, C1, C2, C3 et C4 (moins de 25 kg).

Pour le diplôme Catégorie Ouverte A2 il faudra passer un second examen théorique en ligne (toujours sur la plateforme AlphaTango ou en centre d'examen) à la suite de l'obtention du A1/A3 ainsi qu'une autoformation pratique (déclarative).

Les conditions de vol applicables pour la sous-catégorie A2 sont :

- A distance des personnes : 30m
- 5m autorisé si fonction basse vitesse disponible et enclenchée sur l'aéronef
- Survol avec des drones de classe C2 (moins de 4 kg)

### Encadré C :

#### Le diplôme de formation spécifique d'un pilote d'aéronef :

La formation impose 2 aspects : 1 examen théorique (en salle OCEANE de la DGAC) suivi d'un examen pratique (en centre de formation agréé). Celle-ci n'impose pas un nombre d'heures précises de vol.

Le programme imposé par la DGAC pour l'obtention du diplôme de télépilote :

- Règlementation générale
- Connaissances générales des aéronefs qui circulent sans personne à bord
- Instrumentation
- Performance - préparation et suivi du vol
- Performance humaine
- Navigation
- Météorologie
- Liaison de données et radio navigation
- Procédures opérationnelles
- Principe du vol
- Communications

Programme détaillé des connaissances théoriques de l'examen de télépilote de drone civil : Programme examen théorique ([ecologie.gouv.fr](http://ecologie.gouv.fr)).

Lorsque les télépilotes ont obtenu les parties pratiques et théoriques du diplôme, ces derniers ont donc la possibilité de voler en France dans les 3 scénarios nationaux standards (S1, S2, S3 jusqu'au 31 décembre 2025) s'ils ont rejoint un exploitant déclaré avant le 31 décembre 2023, ou en scénario européen dans 2 catégories (Ouvverte et/ou Spécifique) décrits dans le Tableau 5 à 7. Ces scénarios identifient les paramètres et caractéristiques du vol à respecter, tels que la hauteur de vol, la distance horizontale par rapport au télépilote et le poids du drone. La hauteur de vol est à une distance maximale de 120 mètres du point le plus proche de la surface de la Terre avec une exception à l'abord d'un obstacle artificiel qui autorise un plafond de 15m au-dessus de son point le plus haut et de 50m à l'horizontale sur ses côtés ([Fig. 26](#)).

Tous drones supérieurs à 250g demandent à minima un premier niveau de qualification que ce soit pour un usage « loisir » ou « professionnel » dans la catégorie ouverte et au besoin requiert des niveaux de qualifications supérieurs dans les utilisations de la catégorie spécifique (STS – 01 et STS – 02).

Scénario / Catégorie	Condition de vol	Hauteur maximum	Distance horizontale	Catégorie et poids maximum du drone
Catégorie Ouverte A1	- Survol près, voire au-dessus des personnes - Hors espace public en agglomération ou autres zones de restriction mais possible au-dessus de l'espace privé avec accord du gestionnaire ou propriétaire.	120 m Sans être dans une zone de restriction	En vue directe entre le pilote et sa machine	- C0 (moins de 250g) - Construction à titre privé et moins de 250g

Scénario / Catégorie	Condition de vol	Hauteur maximum	Distance horizontale	Catégorie et poids maximum du drone
Catégorie Ouverte A1	- Hors espace public en agglomération ou autres zones de restriction mais possible au-dessus de l'espace privé avec accord du gestionnaire ou propriétaire	120 m Sans être dans une zone de restriction	En vue directe entre le pilote et sa machine	C1 (moins de 900g)
Catégorie Ouverte A2	- Jusqu'à 30 mètres des personnes - Hors espace public en agglomération ou autres zones de restriction mais possible au-dessus de l'espace privé avec accord du gestionnaire ou propriétaire	120 m Sans être dans une zone de restriction	En vue directe entre le pilote et sa machine	C2 (moins de 4kg)
Catégorie Ouverte A3	- Loin des personnes : à 150 m des zones résidentielles, commerciales, industrielles et récréatives	120 m Sans être dans une zone de restriction	En vue directe entre le pilote et sa machine	Classes C0 à C4 Construction à titre privé et moins de 25kg Possible d'utiliser des drones non normés CE

**Tableau 5 :** Synthèse des règles à respecter dans les catégories ouvertes A1, A2 et A3. Source : Présentation PowerPoint (ecologie.gouv.fr)

Scénario / Catégorie	Condition de vol	Hauteur maximum	Distance horizontale	Catégorie et poids maximum du drone
Catégorie Spécifique STS 01	- Vol à vue à l'intérieur d'une surface contrôlée (sans personne non impliquée) en zone peuplée ou non.	120 m Sans être dans une zone de restriction	Il n'y a pas de valeur fixe, cependant le guide de l'EASA recommande ce calcul : - Pour les multitoror : distance [m]= 327 x CD <sup>1</sup> [m] + 20m - Pour les voilures fixe : distance [m]= 490 x CD [m] + 30m	C5 < 25kg et dimensions < 3m

1 CD = Dimension maximum du drone

Scénario / Catégorie	Condition de vol	Hauteur maximum	Distance horizontale	Catégorie et poids maximum du drone
Catégorie Spécifique STS 02	- Vol à vue à l'intérieur d'une surface contrôlée à une distance inférieure à 1km, distance pouvant être augmentée à 2km avec la présence d'observateurs visuels en charge d'assurer la surveillance de l'espace aérien hors zone peuplée.	120 m Sans être dans une zone de restriction	1 km maximum du pilote, 2 km maximum avec observateur	C6 < 25kg et dimensions < 3m

**Tableau 6 :** Synthèse des règles à respecter dans les catégories spécifiques STS 01 et STS 02. Source : Présentation PowerPoint (ecologie.gouv.fr)

Scénario / Catégorie	Condition de vol	Hauteur maximum	Distance horizontale	Catégorie et poids maximum du drone
S1	Vol à vue hors agglomération	120 m Sans être dans une zone de restriction	200 m	25 kg
S2	Vol hors vue hors agglomération	50 m	1 km	25 kg
		120 m Sans être dans une zone de restriction	1 km	2 kg
S3	Vol en vue en agglomération	120 m Sans être dans une zone de restriction	100 m dans le périmètre d'une zone d'exclusion des tiers	8 kg

**Tableau 7 :** Synthèse des règles à respecter selon les scénarios S1, S2 ou S3. Source : DGAC, 2023

Il est à noter que le scénario S4, qui autorisait le vol sans limite de distance horizontale hors agglomération a disparu de la réglementation le 31 décembre 2021.

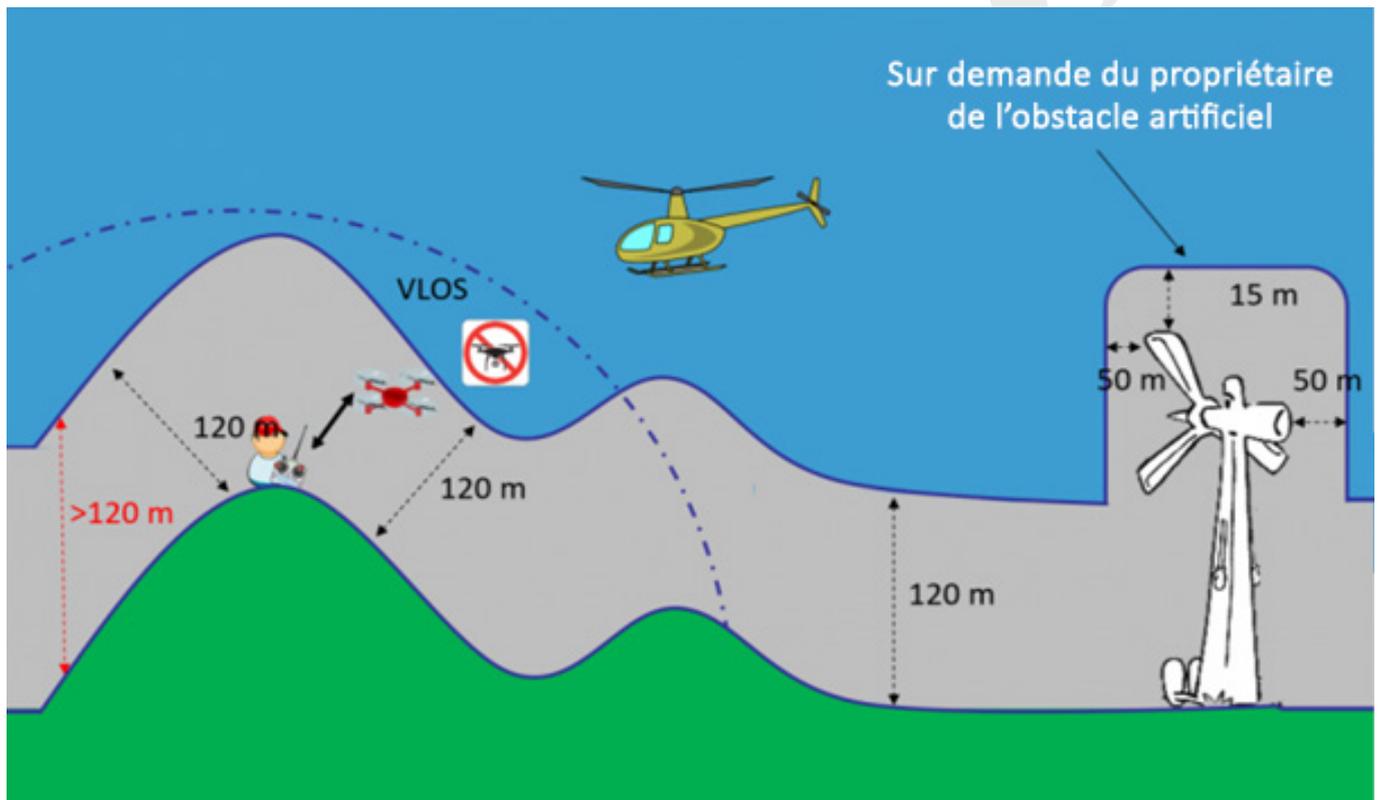


Figure 26 : Schéma de la variation de vol en cas de présence d'un obstacle artificiel Source : EASA

A noter que d'après le Ministère chargé des transports ([source : assurer la sécurité des personnes et des autres aéronefs est de votre responsabilité, 2019](#)), je ne survole pas une propriété privée à basse hauteur sans l'accord de son propriétaire. Les personnes autour de moi et de mon aéronef sans équipage à bord doivent être informées de ce que je fais, en particulier si mon aéronef sans équipage à bord est équipé d'une caméra ou de tout autre capteur susceptible d'enregistrer des données les concernant. J'informe les personnes présentes, je réponds à leurs questions et je respecte leur droit à la vie privée. Je m'abstiens d'enregistrer des images permettant de reconnaître ou identifier les personnes (visages, plaques d'immatriculation, etc.) sans leur autorisation.

La DGAC a rédigé les 10 commandements les plus importants pour l'utilisation d'un drone dans le cadre d'une activité loisir.

Voici les 8 règles à suivre :

- Ne pas survoler des personnes
- Respecter les hauteurs maximales de vol (120 mètres de hauteur)
- Ne jamais perdre de vue son appareil et ne pas l'utiliser la nuit
- Ne pas faire voler son appareil au-dessus de l'espace public en agglomération
- Ne pas faire voler son appareil à proximité des terrains d'aviation
- Ne pas survoler de sites sensibles ou protégés : centrales nucléaires, terrains militaires, - réserves naturelles...
- Respecter la vie privée des autres, en ne diffusant pas les prises de vue sans l'accord des personnes concernées, et en n'en faisant pas une utilisation commerciale
- Vérifier dans quelles conditions on est assuré pour la pratique de cette activité

En cas de doute, se renseigner auprès de la Direction générale de l'aviation civile (DGAC).

Source : Drone : règles de pilotage à respecter | Service-Public.fr

Nous avons résumé les différentes responsabilités réparties entre :  
 Les responsabilités en milieu public et/ou privé :

- Milieu public : Respect des réglementations locales et nationales : respect des zones de survol telles que les parcs, les écoles, et les rassemblements publics. Sécurité et vie privée : Eviter les survols non autorisés de lieux sensibles ou d'activités. Assurance et déclaration : assurance adéquate, dans certains cas déclarés leurs opérations aux autorités locales ou à l'aviation civile directement.
- Milieu Privé : Consentement du propriétaire : éviter les intrusions non désirées et respecter les droits de propriété. Respect des règlements spécifiques : par exemple la nécessité de ne pas perturber les activités normales du site ou de respecter des heures spécifiques pour les vols.

## ➤ D. La réglementation du drone en zonage du patrimoine naturel réglementaire et autres périmètres de protection

Les télépilotes peuvent se voir confier des missions impliquant de survoler des périmètres de protection réglementaires et autres zonages du patrimoine naturel réglementaire. Le survol de ces zones est généralement réglementé ou interdit (Tab. 8). Pour autant, identifier les réglementations associées aux vols de drone sur ces espaces n'est pas toujours aisé ; les informations et les interdictions de vols au-dessus de ces espaces ne figurent pas ou rarement sur les cartes OACI. En revanche, certaines informations comme la délimitation de ces zones protégées peuvent être présentes sur la carte aéronautique. Ces zones se reconnaissent par un trait rouge accolé de points rouges (Fig.28) qui indique la présence d'un Parc ou d'une Réserve Naturelle par exemple. Les services de l'information Aéronautique indiquent également les ZONES DE SENSIBILITÉ MAJEURE - GRANDS RAPACES dans la partie ENR 5.6-A de l'AIP (Fig 27).

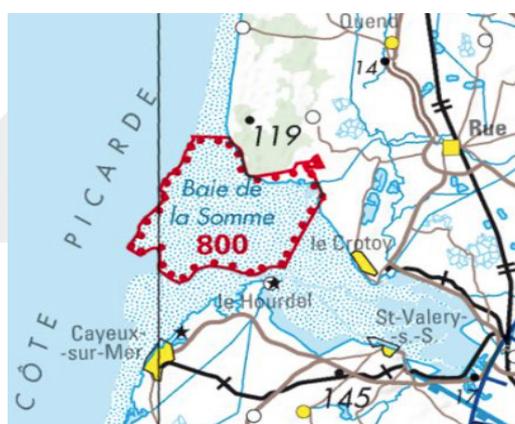
MILAIP FRANCE		ENR 5.6 - p1	
Manuel d'Information Aéronautique Militaire		Parcs nationaux et réserves naturelles 07 MAR 13	
<b>ENR 5.6</b> <b>Parcs nationaux et réserves naturelles</b> <i>National parks and nature reserves</i>			
PARCS NATIONAUX NATIONAL PARKS	TEXTES DE REFERENCE REFERENCE TEXTS	ARTICLES RELATIFS AUX RESTRICTIONS DE SURVOL ARTICLES RELATIVE TO FLY-OVER RESTRICTIONS	
<b>VANOISE</b>	décret n°2009-447 du 21 avril 2009  Decree No. 2009-447 dated 21 April 2009	I. - Sauf autorisation du directeur de l'établissement public du parc, sont interdits : 2° Le survol du cœur du parc à une hauteur inférieure à 1 000 mètres du sol des aéronefs motorisés ; II. - Sont réglementés par le directeur de l'établissement public et, le cas échéant, soumis à autorisation : 3° Le survol du cœur du parc à une hauteur inférieure à 1 000 mètres du sol des aéronefs non motorisés ; IV. - Les autorisations délivrées au titre du 1° du I et des 1° et 2° du II pour le stationnement ainsi que des 2° et 3° du I et des 3°, 4° et 5° du II peuvent être subordonnées au paiement d'une redevance dont le montant est fixé par le conseil d'administration.  I. - Unless authorised by the park's public authority director, the following are prohibited: 2 Fly-over of the heart of the park at an altitude of below 1000 metres above the ground by motorised aircraft; II. - The following are restricted by the public authority director and, if required, subject to authorisation: 3 Fly-over of the heart of the park at an altitude of below 1000 metres above the ground by non-motorised aircraft; IV. - The authorisations issued as part of 1 of I and of 1 and 2 of II for parking, as well as of 2 and 4 of I and of 3, 4 and 5 of II can be subject to payment of a fees the amount of which is fixed by the board of directors.	3300ft ASFC Survol  3300ft ASFC Fly-over

Figure 27 : Extrait du Manuel d'Information Aéronautique Militaire indiquant les restrictions de survol officielles en fonction de chaque parc national ENR 5.6 – Parc nationaux et réserves naturelles, 2023 ; Source : ENR 5.6 – Parc nationaux et réserves naturelles, 2023 ; Lien : MIAM\_OACI\_ENR 5.6.pdf (defense.gouv.fr).

Zonage	Réglementation	Précaution à prendre
Réserve Naturelle Nationale (RNN)	Survol interdit sauf accord du gestionnaire de la réserve.	Se référer au gestionnaire
Réserve Naturelle Régionale (RNR)	Pas de réglementation spécifique.	Vérifier qu'il n'y a pas d'autres contraintes.
Parc Naturel Régional (PNR)	Survol interdit sauf accord du gestionnaire de la réserve ou à la réglementation propre au parc.	Se référer au gestionnaire
Arrêté de Protection du Biotope (APB / Arrêté Préfectoral de la Protection du Biotope (APPB))	Se référer à l'arrêté. Exemples : - Arrêté inter-préfectoral de protection de biotope du cap blanc-nez de 2021 n°22/2021/PREMAR MANCHE/AEM/NP <sup>1</sup> - Arrêté préfectoral de création du 01/10/1991 Mont-Cenis et Vallon de Savine <sup>2</sup>	Se référer à ce qui est spécifié dans l'arrêté.
Zone Natura 2000	Pas de réglementation spécifique.	Vérifier qu'il n'y a pas d'autres contraintes.
Toutes zones	Attention au dérangement ou perturbation des espèces protégées.	Vérifier qu'il n'y a pas d'autres contraintes.

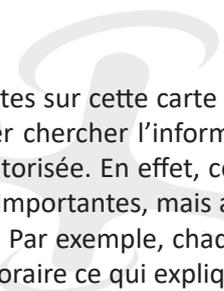
La réglementation aéronautique, et plus précisément celle du drone, ne fait pas mention de restriction particulière sur les PNM (Parc Naturel Marin).

**Tableau 8 :** Tableau expliquant les précautions à prendre et les réglementations en fonction du zonage (sources : Sources : DGAC – Drones, 2023 / Geoportail – Restrictions drones, 2024 / Code de l'environnement, 2024 / Ministère de la transition écologique – Zones protégées, 2023 / Article R415-1 - Code de l'environnement - Légifrance (legifrance.gouv.fr) / Arrêté inter-préfectoral de protection de biotope du cap blanc-nez n°22/2021/PREMAR MANCHE/AEM/NP / Arrêté inter-préfectoral de protection de biotope de la pointe de la crèche n°23/2021/PREMAR MANCHE/AEM/NP).



**Figure 28 :** Exemple de carte aéronautique montrant la zone de la Baie de la Somme (80), interdite de survol à une hauteur inférieure à 800 pieds (soit 244 mètres). Source : Extrait de la carte OACI présent sur le Géoportail : <https://www.geoportail.gouv.fr/donnees/carte-oaci-vfr>

- 1 Arrêté inter-préfectoral de protection de biotope du Cap Blanc Nez. - DREAL HAUTS-DE-FRANCE (developpement-durable.gouv.fr)
- 2 FR380020819911001.pdf (mnhn.fr)



Pour les zones non présentes sur cette carte aéronautique, c'est une démarche fastidieuse qui commence pour le télépilote, c'est à lui d'aller chercher l'information sur les différents sites étatiques ou associatifs afin de vérifier si sa zone de survol est autorisée. En effet, certaines zones sont manquantes par manque de place sur la carte et parce qu'elles sont moins importantes, mais aussi parce que la réglementation en vigueur est temporaire ou à des périodes bien particulière. Par exemple, chaque zone sensible peut disposer d'un arrêté protégeant le biotope de façon temporelle ou temporaire ce qui explique qu'il ne figure pas sur la cartographie de la DGAC (mise à jour 1x / an). Et il n'existe pas, à la date de rédaction de ce document, de site officiel permettant de lister l'ensemble de ces petits secteurs qui réglementent le vol de drone.

Le survol en drone est par défaut interdit dans les Parc Nationaux et les Réserves Naturelles Nationales. Pour les autres types de sites (Natura 2000, RNR...) il n'y a pas d'interdiction par défaut, il faut donc chercher puis lire attentivement chaque Arrêté de Protection de Biotope (APB). C'est une tâche fastidieuse puisque le télépilote doit rechercher la publication de ce document sur le site <https://www.drone-spot.tech/> qui recense les APB qui concernent le drone, et y trouver la mention interdisant ou réglementant l'évolution de l'aéronef dans cette zone. A noter que certains arrêtés disposent de réglementation de survol bien avant l'essor du drone en France (par exemple un arrêté de 1997 emploie des termes qui peuvent être assimilés à l'activité aéronautique et donc en finalité aux drones). A noter, que l'interdiction de survols de certaines zones protégées court uniquement sur une période donnée de l'année. Pour exemple l'APPB datant de 2021 du site du Cap Blanc nez <sup>1</sup>, situé dans le département du Pas-de-Calais (62), interdit le survol par tout aéronef motorisé de loisir à moins de 150 mètres d'altitude du 1er janvier jusqu'au 31 août.

Cependant, ces arrêtés sont parfois datés de plusieurs décennies, bien avant que le drone ne soit plus communément utilisé. A noter qu'ils peuvent être difficilement compréhensibles au sujet de l'activité aérienne de type Aéromodélisme ou Drone [Encadré D].

#### Encadré D : Exemple d'Arrêté difficilement transposable à l'activité d'un télépilote

Arrêté préfectoral de création du 01/10/1991 sur le site de *MONTCENIS ET VALLON DE SAVINE* : FR380020819911001.  
[pdf \(mnhn.fr\)](#)

##### ARTICLE 10 : Circulation :

La circulation de tout engin à moteur est interdite sur l'ensemble du site. Seuls les ayants-droits ou personnes dûment accrédités par l'Administration sont autorisés à utiliser leur véhicule sur les pistes existantes.

Dans cet exemple, peut-on assimiler un engin à moteur à un drone ? Le fait qu'il n'y ai pas le mot « terrestre » après le terme « engin à moteur » peut suggérer l'intégration du drone dans cette interdiction.

Il est également fréquent de voir une erreur de langage dans la rédaction de ces arrêtés de protection de sites naturels protégés réglementés en confondant hauteur et altitude. Les utilisateurs de l'espace aérien, eux, distinguent ces deux notions. L'altitude est la distance verticale entre l'aéronef et le niveau moyen de la mer. La hauteur est la distance verticale entre l'aéronef et le sol.

La difficulté, le manque de clarté des arrêtés et le manque de formation sur la réglementation au sujet des zones protégées sont autant de facteurs qui peuvent occasionner des survols non prémédités de zones interdites.

---

1 Arrêté inter-préfectoral de protection de biotope du Cap Blanc Nez. - DREAL HAUTS-DE-FRANCE (developpement-durable.gouv.fr)

## ➤ E. Les dérogations

Les cartes aéronautiques et de l'OACI et les réglementations en vigueur fixent un cadre légal des usages standards. Cependant un télépilote peut être amené à utiliser son aéronef sans pilote à bord en dehors des règles des différents scénarios préétablis.

L'Aviation Civile a de ce fait, inclus des possibilités de déroger aux réglementations par des demandes de dérogations et d'autorisations administratives spécifiques. Les autorisations sont adressées à différents acteurs en fonction de leur type ou la localisation du vol, tels que la DSAC, le ministère des armées via le CNOA, la préfecture, le gestionnaire de la CTR, le gestionnaire de l'aérodrome, le gestionnaire de l'hélistation... Les demandes peuvent être cumulatives auprès de ces différents interlocuteurs. Dans le cadre de l'usage du drone dans les zones non réglementées par la Carte OACI, il faut se rapprocher du gestionnaire de la zone soumis à un arrêté de biotope, dans la majorité des cas, il faut s'adresser au préfet du département, à la DREAL ou par le comité de gestion seul.

La dérogation peut se révéler nécessaire lorsque le télépilote a besoin d'une élongation ou une hauteur de vol supérieure au cadre standard, évoluer avec une machine supérieure au poids maximal autorisé, ou encore pénétrer dans les zones P (*zones « prohibed » interdites de vol par défaut*) présentes sur les cartes OACI. Il faut alors se rapprocher de la DSAC pour obtenir ces dérogations.

Pour des opérations très spécifiques non prévues par la réglementation, il est possible de rédiger une PDRA (*Pre-Defined Risk Assessment - analyse de risque pré-formatée*), ou encore une SORA (*Specific Operations Risk Assessment - méthode d'évaluation des risques pour les opérations de drones spécifiques*) pour un usage considéré comme des plus à risque par l'aviation civile (*Guide DGAC, 2023*).

La demande et l'obtention de dérogation dépend de la catégorie de vol, et du type d'opération à réaliser.

En catégorie ouverte, l'utilisation de drones est interdite la nuit, même lorsqu'ils sont équipés de dispositifs lumineux. Dans la catégorie spécifique, les drones peuvent effectuer des vols de nuit s'ils ne dépassent pas un plafond de 50 mètres, s'ils ne pèsent pas plus de 8 kilos et s'ils sont équipés d'un dispositif lumineux qui exclut le blanc et le rouge visible par un observateur au sol situé à 150 mètres de distance. Il faut également que la zone survolée est suffisamment éclairée pour éviter toute intrusion étrangère au vol.

Les conditions ci-dessus s'appliquent également dans des scénarios nationaux S-1 ou S-3.

## ➤ F. Les sanctions

Selon la DGAC, toute personne est passible d'une peine d'emprisonnement et d'une forte amende sur le fait :

- D'utiliser un drone dans des conditions non conformes aux règles édictées en vue d'assurer la sécurité
- Pour un télépilote, de faire survoler par un drone, par maladresse ou négligence, une zone du territoire français en violation d'une interdiction de survol
- De porter atteinte volontairement à l'intimité de la vie privée d'autrui :
  - en captant, enregistrant ou transmettant, sans le consentement de leur auteur, des paroles prononcées à titre privé ou confidentiel ;
  - en fixant, enregistrant ou transmettant, sans le consentement de celle-ci, l'image d'une personne se trouvant dans un lieu privé.

Toute personne est passible d'une contravention sur le fait :

- Pour le télépilote d'un drone de 800g ou plus :
  - d'utiliser un drone sans avoir obtenu le certificat d'aptitude théorique et l'attestation de suivi de formation (ou l'attestation d'aptitude aux fonctions de télépilotes) ;
  - de ne pas être en mesure de présenter ces documents immédiatement en cas de contrôle
  - de ne pas être en mesure de présenter ces documents dans un délai de 5 jours
  
- Pour le propriétaire d'un drone de 800g ou plus, de laisser utiliser son drone :
  - sans avoir procédé à l'enregistrement ;
  - en ayant fourni, lors de l'enregistrement, des informations inexactes sur les caractéristiques de l'aéronef ou sur l'identité du ou des propriétaires ;
  - sans avoir apposé le numéro d'enregistrement sur l'aéronef ;
  - sans avoir équipé son drone du dispositif de signalement électronique ou numérique.

Source : [Exploitation de drones en catégorie spécifique | Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires \(ecologie.gouv.fr\)](https://ecologie.gouv.fr)

Il faut savoir aussi qu'en cas de violation des règles de sécurité et des interdictions de survol, vous risquez de 1 à 6 mois d'emprisonnement et de 15 000 € à 75 000 € d'amende et vous faire confisquer votre drone. Mais également en cas de violation de la vie privée, en captant, enregistrant ou diffusant des images ou paroles de personnes sans leur consentement, vous risquez 1 an d'emprisonnement et 45 000 € d'amende.

## VI. Conclusion

En conclusion, par son histoire, le drone est une prouesse évolutive qui a prouvé son intérêt dans le suivi et les études ornithologiques. S'il existe une grande variété de drones, de capteurs et de constructeurs, les expériences menées montrent que les drones à voilure tournante semblent être des alliés particulièrement intéressants pour les ornithologues.

En France de drones d'une gamme de prix allant d'environ 500 € à 30 000 € environ sont utilisés dans le suivi de nombreuses espèces ornithologiques. Le choix du drone dépend du contexte dans lequel est réalisé l'étude et l'objectif visé. C'est ainsi que des capteurs RVB ou encore thermique peuvent être utilisés pour repérer des individus, des nids ou compter les œufs.

L'analyse de la présence d'individus ou de nids peut se faire en direct par un ornithologue ou en aval du survol grâce aux vidéos et photos enregistrées. L'enregistrement de photos permet notamment de géo référencer et cartographier les détections sur des logiciels SIG et d'identifier les espèces détectées.

Cependant, il apparaît clairement que l'utilisation de drones dans le contexte des milieux naturels est un défi complexe nécessitant une compréhension approfondie de l'évolution rapide de la réglementation aéronautique. Les gestionnaires de milieux naturels souhaitant utiliser cette technologie peuvent être confrontés à certaines conditions d'usage

Premièrement, en parallèle de la complexité du droit aéronautique, le télépilote doit également avoir une connaissance des textes réglementaires annexes à l'activité drone comme le respect de la vie privée des citoyens.

Deuxièmement, la gestion des parties « autorisations » complexes, telles que le SORA et les interactions avec l'armée, émerge comme un aspect incontournable du travail des gestionnaires. Cependant, ces autorisations nécessitent une expertise spécifique et une coordination rigoureuse pour garantir le respect des règles et la sécurité des opérations.

Enfin, le télépilote se doit d'effectuer régulièrement une lecture attentive des réglementations en constante évolution. Il se doit d'avoir également une bonne compréhension des nuances du droit aéronautique et savoir où chercher les informations sur les aires protégées pour travailler dans des environnements naturels.

En effet, il est crucial de souligner le manque de visibilité des zonages réglementés, notamment dans les périmètres de protection du patrimoine naturel. La création d'outils permettant de cartographier ces zones réglementées apparaît comme une initiative légitime et nécessaire pour faciliter le travail des gestionnaires et assurer une meilleure gestion des drones. Nous pourrions également suggérer d'intégrer l'utilisation du drone sur les territoires à risque pour l'environnement au sein du programme théorique pour l'obtention du brevet de télépilote.

Il est également impératif de sensibiliser d'avantage le grand public à la réglementation du drone. Les dégâts potentiels causés par un manque de compréhension des règles sont significatifs, et une éducation accrue sur la réglementation drone est nécessaire pour minimiser les impacts négatifs sur les sites naturels. Il est à noter que sur de nombreux sites la signalétique n'indique pas clairement une interdiction de son usage et des règles associés.

En somme, la conclusion met en lumière la nécessité d'une approche intégrée pour faire face aux complexités de la réglementation des drones, soulignant l'importance de la formation, de la sensibilisation du grand public et de la création d'outils spécifiques pour une gestion plus efficace des drones dans les milieux naturels.



## VII. Références

### Documentations & Articles :

Camarretta, N., Harrison, PA, Lucieer, A., Potts, BM, Davidson, N. et Hunt, M. (2020). Des drones au phénotype : utilisation d'UAV-LiDAR pour détecter les variations d'espèces et de provenances dans la productivité et la structure des arbres. *Téledétection*, 12 (19), 3184.

Charbonneau, P., & Lemaître, J. (2021). Revue des applications et de l'utilité des drones en conservation de la faune. *Le Naturaliste canadien*, 145(2), 3-34.

Convention on International Civil Aviation. Signed at Chicago, on 7 December 1944. *United Nations Treaty Series*, vol. 15, no. 102, 1948, pp. 295-429

Crutsinger, G. M., Short, J., & Sollenberger, R. (2016). The future of UAVs in ecology: an insider perspective from the Silicon Valley drone industry. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 4(3), 161-168.

Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC), 2023. Guide des usages des aéronefs sans équipage à bord – Catégorie spécifique. Version 1.7.

Helicomicro, 2021. Les zones « biotope » sont-elles interdites de vol en drone ? Disponible sur : Les zones « biotope » sont-elles interdites de vol en drone ? - Helicomicro

Hodgson, JC, Mott, R., Baylis, SM, Pham, TT, Wotherspoon, S., Kilpatrick, AD, Raja Segaran, R., Reid, I., Terauds, A. et Koh, LP (2018). Les drones comptent la faune sauvage avec plus de précision que les humains. *Méthodes en écologie et évolution*, 9 (5), 1160 – 1167.

Jiménez López, J. et Mulero-Pázmány, M. (2019). Drones pour la conservation dans les zones protégées : présent et futur. *Drones*, 3 (1), 10.

### Sites internet & webinaires :

Aligator. Consulté le 18/07/2024. Disponible sur <https://altigator.com/fr/>

CNIL. Définition du Drone. Consulté le 18/07/2024. Disponible sur <https://www.cnil.fr/fr/definition/drone>

Dji. Consulté le 04/03/2024 et 22/05/2024. Disponible sur [https://store.dji.com/fr/selection/camera-drones?from=site-nav&\\_gl=1\\*6yr-v5b\\*\\_up\\*MQ..\\*\\_ga\\*MT10NTcwMD-g0Ni4xNzI2ODU4Mzcx\\*\\_ga\\_HXRDE344GS\\*MTcyNjg1ODM3MC4xLjAuMTcyNjg1ODM3MC4wLjAuMA..&gclid=EAlaIQobChMllpDT3JjSiAMVkgw-GAB0RcA6kEAAAYASAAEgJaEvD\\_BwE](https://store.dji.com/fr/selection/camera-drones?from=site-nav&_gl=1*6yr-v5b*_up*MQ..*_ga*MT10NTcwMD-g0Ni4xNzI2ODU4Mzcx*_ga_HXRDE344GS*MTcyNjg1ODM3MC4xLjAuMTcyNjg1ODM3MC4wLjAuMA..&gclid=EAlaIQobChMllpDT3JjSiAMVkgw-GAB0RcA6kEAAAYASAAEgJaEvD_BwE)

Drone Industry Insight. Consulté le 04/03/2024. Disponible sur <https://droneii.com/electric-aircraft-and-sustainable-aviation-fuels/>

Footkite. Consulté le 10/05/2024. Disponible sur <https://fotokite.com/fr/public-safety-uas/>

Karyl-aka, 2022. Consulté le 22/04/2024. Disponible sur <https://www.cnetfrance.fr/produits/s-y-retrouver-dans-la-taille-des-capteurs-en-photo-numerique-39713467.htm>

Studiofly audiovisual. Histoire du drone : un siècle de recherches et d'élaboration. Consulté le 25/01/2024. Disponible sur : <https://www.studiofly.fr/les-drones-un-siecle-de-recherches-et-d-elaboration/>

StudioSport – spécialiste drone & caméras. Tour d'horizon des variétés de drones de loisir et professionnels. Consulté le 04/03/2024. Disponible sur : <https://www.studiosport.fr/guides/drones/quels-sont-les-differents-types-de-drones.html>

Ministère chargé des transports – Mise en œuvre de la Sora pour l'exploitation d'aéronefs sans équipage à bord en catégorie spécifique. La demande

d'autorisation d'exploitation et l'évaluation des risques. Consulté le 04/03/2024. Disponible sur : Mise en œuvre de la SORA pour l'exploitation d'aéronefs sans équipage à bord en catégorie Spécifique ([youtube.com](https://www.youtube.com)).

## ANNEXE 1 : TABLEAU DE SYNTHÈSE DE CHARBONNEAU & LEMAITRE (2021) SUR L'UTILISATION DU DRONE POUR LES ÉTUDES ORNITHOLOGIQUES

L'étude « Revue des applications et de l'utilité des drones en conservation de la faune » de Patrick Charbonneau et Jérôme Lemaître publié dans Le Naturaliste Canadien à répertorier les drones utilisés dans diverses parutions d'utilisation d'un aéronef radio piloté sur une étude de l'Avifaune :

Espèce	Drone	Capteur	Réponse au drone	Type d'étude	Référence
Balbusard pêcheur <i>Pandion haliaetus</i>	Quadricoptère Draganflyer X-4	Caméra GoPro Hero 1	- Variable selon les espèces, mais dérangement faible - Distances de 3 à 5 m	Inventaire de nids	Junda et collab. (2015 ; 2016)
Buse à queue rousse <i>Buteo jamaicensis</i>					
Buse rouilleuse <i>Buteo regalis</i>					
Pygargue à tête blanche <i>Haliaeetus leucocephalus</i>					
Bernache du Canada <i>Branta canadensis</i>	Planeur CropCam Planeur Trimble UX5	- CropCam: Caméra intégrée du drone - Trimble : Caméra Sony NEX-5R	- Aucun dérangement à 183 m d'altitude - Vigilance à 75 m d'altitude - Altitudes de 75 et 183 m	- Dénombrement - Réponse comportementale face au drone	Chabot (2009) Chabot et Bird (2012) Barnas et collab. (2018 b)
Oie des neiges <i>Chen caerulescens</i>					
Canard colvert <i>Anas platyrhynchos</i>	Quadricoptère Cileone Phantom	Caméra GoPro Hero 3	- Peu de dérangement observé - Altitudes de 2 à 30 m	Réponse comportementale face au drone	Vas et collab. (2015)
Chevalier aboyeur <i>Tringa nebularia</i>					
Flamant rose <i>Phoenicopterus roseus</i>					
Corneille mantelée <i>Corvus cornix</i>	Quadricoptère DJI Phantom 2 Vision	Caméra intégrée du drone	Cris d'alarme et défense du nid à une altitude de 5 m au-dessus du nid	Inventaire de nids	Weissensteiner et collab. (2015)
Échassiers	Planeur A.U.A.V	Caméra Canon Elura 2 et blackandwhite CMOS	- Non étudiée - Altitude non spécifiée	Développement d'un algorithme pour le dénombrement automatisé	Abd-Elrahman et collab. (2005)
Engoulevent d'Europe <i>Caprimulgus europaeus</i>	Octocoptère Falcon 8	Non spécifié	- Aucun dérangement - Altitudes de 10, 20 et 50 m	Détection	BES (2018)
Frégate ariel <i>Fregata ariel</i>	Octocoptère X8, 3D Robotics Planeur FX79 airframe	Caméra Canon EOS M	- Non étudiée - X8 : altitude de 75 m - FX19 : altitude de 120 m	Dénombrement	Hodgson et collab. (2018)
Gorfou de Schlegel <i>Eudypetes schlegeli</i>					
Sterne huppée <i>Thalasseus bergii</i>					

Espèce	Drone	Capteur	Réponse au drone	Type d'étude	Référence
Fulmar boréal <i>Fulmarus glacialis</i>	Quadricoptère DJI Phantom 4 Pro	Caméra intégrée du drone	- Non étudiée - Distance de 150 m	Suivi de population	Mallory et collab. (2020)
Grand héron <i>Ardea herodias</i>	Quadricoptère DJI Spark	Caméra intégrée du drone	- Aucun dérangement - Altitude à 90 m	Inventaire de nids	Laporte (2019)
Goéland arctique <i>Larus glaucooides</i>	Quadricoptère DJI Phantom 4	Caméra intégrée du drone	- Vigilance, fuite lors du passage du drone et prédation des nids abandonnés - Distances de 15 et 30 m	Réponse comportementale face au drone	Brisson-Curadeau et collab. (2017)
Goéland bourgmestre <i>Larus hyperboreus</i>					
Guillemot de Brünnich <i>Uria lomvia</i>					
Guillemot marmette <i>Uria aalge</i>					
Goéland cendré <i>Larus canus</i>	- Octocoptère Falcon 8 - Quadricoptère MD4- 1000	- Falcon 8 : Sony NEX5 MD4- - 1000 : Olympus PEN E2	- Non étudiée - Altitudes de 50 et 55 m	Développement d'un algorithme pour le dénombrement automatisé	Grenzdörffer (2013)
Hirondelle bicolor <i>Tachycineta bicolor</i>	Quadricoptère DJI Inspire 1	Caméra intégrée du drone	- Comportement agressif - Distances de 1,5 m à 10 m	- Réponse comportementale face au drone - Réponse physiologique	Scholten et collab. (2020)
Ibis d'Australie <i>Threskiornis spinicollis</i> et plusieurs autres espèces	- Quadricoptère DJI Phantom 3 Aile Delta eBee - Hexacoptère DJI S900	Caméra intégrée du drone	- Selon les espèces: aucune réaction, réaction à 10 m, agressivité, vocalisation agressive, attaque du drone, comportement défensif à moins de 5 m - Altitudes de 5 à 120 m	Réponse comportementale face au drone	Lyons et collab. (2018)
Manchot à jugulaire <i>Pygoscelis antarctica</i>	- Octocoptère MK-OktoXL - Quadricoptère APQ-18	- Sony NEX-5 - Canon EOS-M - Olympus E-P1 - Canon EOS M	- Aucun dérangement - Altitude de 30 m	Dénombrement	Goebel et collab. (2015), Ratcliffe et collab. (2015)
Manchot papou <i>Pygoscelis papua</i>	- Hexacoptère APH-22 - Octocoptère DJI Naza F550				
Mouette rieuse <i>Chroicocephalus ridibundus</i>	Planeur bimoteur Multiplex Twin Star II	Panasonic Lumix FT-1	- Aucun dérangement - Altitudes de 30 à 40 m	Dénombrement	Sardà-Palomera et collab. (2012)

Espèce	Drone	Capteur	Réponse au drone	Type d'étude	Référence
Oiseaux de mer (plusieurs espèces)	Quadricoptère DJI Phantom 2	Caméra GoPro Hero 4	- Aucun dérangement - Altitudes de 20 à 150 m	Dénombrement	McClelland et collab. (2016)
Pygargue de Steller <i>Haliaeetus pelagicus</i>	Quadricoptère Arducopter	Caméra GoPro 2	- Très peu de dérangement lorsque le drone est près du nid - Altitude ou distance non spécifiée	Inventaire de nids	Potapov et collab. (2013)
Sterne pierregarin <i>Sterna hirundo</i>	Planeur AI-Multi UAS	Caméra Canon PowerShot S90	- Aucun dérangement - Altitudes de 91 et de 122 m	Dénombrement	Chabot et collab. (2015)
Tétràs à queue fine <i>Tympanuchus phasianellus</i>	Quadricoptère DJI Phantom 4	Caméra intégrée du drone	- Aucun dérangement - Altitudes de 91 et de 122 m	- Détection - Dénombrement	Rischette et collab. (2020)
Tétràs des armoises <i>Centrocercus urophasianus</i>	Planeur Raven RQ-11A	- Capteur NADIR infrarouge - Caméra GoPro Hero 3 Black Edition	- Aucun dérangement - Altitudes de 61 à 104 m selon capteur	- Détection - Dénombrement - Suivi de population	Hanson et collab. (2014)
Vautour du Cap <i>Gyps coprotheres</i>	Non spécifié	Non spécifié	- Non spécifiée - Altitude non spécifiée	Dénombrement	Jewitt (2018)

## SIGLES :

**UAS** : Unmanned Aerial System (littéralement : « système d'aéronef sans humain à bord »)

**CNIL** : Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés

**EASA** : European Union Aviation Safety Agency (Agence européenne de la sécurité aérienne)

**DGAC** : Direction Générale de l'Aviation Civile

**DSAC** : Direction de la Sécurité de l'Aviation Civile

**OACI** : Organisation de l'Aviation Civile Internationale

**CNOA** : Centre National des Opérations Aériennes

**PDRA** : Pre-Defined Risk Assessment (Analyse de risque pré-formatée)

**SORA** : Specific Operations Risk Assessment (Analyse des risques pour une demande d'autorisation)

**DREAL** : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

**CTR** : Control Traffic Region

**APPB** : Arrêté Préfectoral de Protection du Biotope

**APB** : Arrêté de Protection du Biotope

## CHAPITRE 3

# Analyse bibliographique concernant l'utilisation du drone pour le recensement des colonies d'oiseaux marins et les outils d'analyse d'images, et retours d'expérience pour les suivis réalisés en France

B. Cadiou & O. Scher

### Résumé

---

Le drone ouvre de nouvelles perspectives dans le cadre des inventaires de la biodiversité. Les évolutions technologiques et d'accessibilité de cet outil ont permis l'essor de nouveaux protocoles visant à améliorer ou à compléter les suivis réalisés sur des espèces à enjeux de conservation, telles que les oiseaux marins.

En France, l'utilisation du drone sur ce groupe est référencée dès 2013 sur les laridés. Depuis lors, de nombreux retours d'expérience, sur le suivi par drone des cormorans, sternes, mouettes, goélands, alcidés et ardeidés ont été produits. Dans la majorité des cas, des petits modèles de drone, type quadricoptère sont utilisés. Le décollage est en général situé à 100 - 150 m de la colonie. Le drone s'approche ensuite à une hauteur de vol d'environ 70 m, puis descend progressivement au-dessus de la colonie, afin de réaliser des photos de qualité permettant le décompte ultérieur des individus en position de couveur.

D'après les documents et l'expérience des personnes consultés, la réponse des oiseaux marins à l'approche du drone varie selon les espèces, les colonies, mais aussi les conditions locales. Lorsque les colonies montrent des signes de stress, il est préconisé d'attendre plusieurs minutes avant de tenter de les survoler de nouveau, ou d'augmenter la distance du point de décollage par rapport à la colonie. La hauteur de vol préconisée lors des survols de colonies dépend des espèces, et du compromis à faire entre la qualité des images pouvant être obtenues et la réaction de la colonie au drone. Cette hauteur de vol peut être comprise entre 80m et 20m. D'autres paramètres doivent être pris en compte telle que la vitesse de vol, l'angle d'approche et le temps de vol au-dessus de la colonie. Ces paramètres sont à adapter selon le drone utilisé et la colonie suivie.

Le comptage des individus nicheurs est réalisé manuellement à l'aide d'un logiciel de SIG ou de photographie, à partir des photos prises par drone assemblées manuellement ou traitées par photogrammétrie. Dans un premier temps, il est conseillé que ce dénombrement soit réalisé par au moins deux personnes, afin de comparer les chiffres et limiter les erreurs.

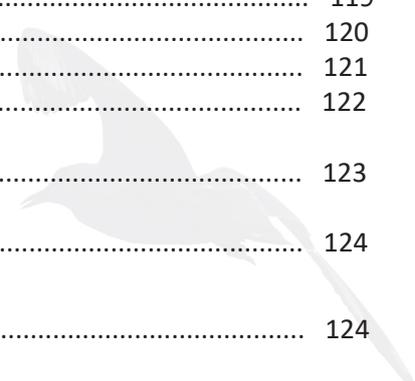
L'utilisation de drone permet de rendre compte de l'occupation spatiale d'une colonie nichant sur des sites peu visibles depuis le sol, ou nécessitant l'utilisation d'un bateau. Les suivis à l'aide de drones permettent également dans certains cas une meilleure estimation des proportions d'espèces différentes au sein de colonie mixte (cas par exemple de colonies de goéland argenté avec quelques couples ou dizaines de couples de goéland brun). Il existe néanmoins certaines limites à l'utilisation du drone, telles que la couverture végétale, la dépendance à une météo favorable au vol et la qualité des images produites. L'automatisation de la reconnaissance et du dénombrement des oiseaux permettrait de gagner un temps considérable, ce qui n'est malheureusement pas encore le cas aujourd'hui.



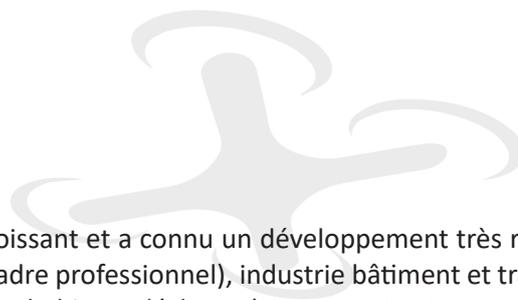


# SOMMAIRE CHAPITRE 3

<b>I. Introduction</b> .....	105
<b>II. Analyse bibliographique</b> .....	106
A. Types de drone .....	106
B. Espèces concernées .....	107
C. Protocoles mis en oeuvre .....	108
<b>III. Modalités de suivi et réponse des oiseaux</b> .....	109
A. Évaluation de la réponse des oiseaux .....	109
1. Caractérisation de la réponse comportementale .....	109
2. Retours d'expériences sur les comportements des oiseaux .....	110
3. Réponse physiologique .....	111
B. Évaluation de l'effet du drone et des paramètres de trajectoire de vol .....	111
1. Forme et couleur du drone .....	111
2. Distance entre le point de décollage et la colonie .....	111
3. Hauteur du vol .....	112
4. Vitesse de vol et type de vol .....	113
<b>IV. Traitement des données</b> .....	113
A. Assemblage des photos .....	113
B. Résolution des photos .....	114
C. Comptage des oiseaux et des nids .....	115
1. Repérage et identification .....	115
2. Méthodes de comptage .....	119
3. Limites et avantages .....	120
4. Perspectives : évaluation de la production en jeunes .....	121
D. Méthodes de Deep Learning .....	122
<b>V. Conclusion</b> .....	123
<b>VI. Remerciements</b> .....	124
<b>VII. Bibliographie</b> .....	124



# I. Introduction



Ces dernières années, l'utilisation de drones suscite un intérêt croissant et a connu un développement très rapide dans des domaines très divers : photographies-vidéos (loisirs ou cadre professionnel), industrie bâtiment et travaux publics, agriculture, secours, suivis environnementaux (faune, flore, habitats, déchets...) (*Mulero-Pázmány et al. 2014, Chabot & Bird 2015, Christie et al. 2016, Singh & Frazier 2018, Elliott et al. 2019, Geraeds et al. 2019, Jiménez López & Mulero-Pázmány 2019, Johnston 2019, Maes & Steppe 2019, Nowak et al. 2019, Shakhathreh et al. 2019, Charbonneau & Lemaître 2021*).<sup>1</sup>

L'engouement pour cette nouvelle technologie s'explique notamment par son coût relativement réduit et par sa facilité d'utilisation. Dans le contexte de la récolte de données scientifiques, l'utilisation des drones a été testée ces dernières années dans différentes régions du monde, entre autres pour le suivi des colonies d'oiseaux marins, mais aussi d'autres espèces coloniales comme les threskiornithidés et les ardéidés. Si cette nouvelle technologie apporte d'indéniables avantages (*Borrelle & Fletcher 2017*), elle est également susceptible d'engendrer le dérangement des espèces suivies (*Rebolo-Ifrán et al. 2019, Charbonneau & Lemaître 2021, Marchowski 2021, Millner et al. 2023*) et cette source potentielle de dérangement doit donc être minimisée. D'où l'importance de respecter les bonnes pratiques en la matière (*Hodgson & Pin Koh 2016*).

De plus, le drone permet d'accéder à des milieux difficiles d'accès et de limiter le dérangement et le stress des comptages sur la population nicheuse d'oiseaux marins, lorsqu'il est utilisé de manière éthique (*Chabot & Bird 2015, Rush et al. 2018, Edney et al. 2023, Mattern et al. 2023*). En effet, les inventaires « traditionnels » mobilisant de nombreuses personnes pour prospecter à pied les colonies à la recherche des nids peuvent parfois occasionner une réponse physiologique et comportementale défavorable à la reproduction (*Anderson & Keith 1980, Beale & Monaghan 2004, Rush et al. 2018*). Ces inventaires demandent également un investissement en temps et en énergie particulièrement importants, tout en étant conditionnés par la capacité visuelle des observateurs à détecter les nids.

Les drones révolutionnent les approches méthodologiques de l'étude de l'écologie des populations d'oiseaux, notamment coloniaux (*Valle & Scarton 2021b*), et permettraient de s'affranchir des limites des inventaires traditionnels (*Chabot et al. 2015*).

L'objectif de ce document est de dresser une synthèse des études réalisées sur les oiseaux coloniaux, dont les oiseaux marins, à l'aide du drone, des protocoles utilisés, des modes de traitement des données, des tests de calibration entre la méthode de comptage par drone et les méthodes classiquement utilisées auparavant, et des leçons à tirer pour réaliser des inventaires éthiques et en toute sécurité.



1 Voir aussi le dossier « drones » paru en 2019 dans le numéro 65 la revue Espaces naturels, à télécharger sur le lien <http://www.espaces-naturels.info/espaces-naturels-65>

## II. Analyse bibliographique

La recherche bibliographique s'est faite sur Google Scholar, ResearchGate et sur Google en utilisant principalement les mots clés suivants : seabird, drone, unmanned aerial vehicle (UAV), unmanned aircraft system (UAS), remotely piloted aircraft systems (RPAS). Cette recherche bibliographique a permis de sélectionner plusieurs dizaines de documents, principalement des articles de revues scientifiques mais aussi quelques rapports, dont une partie seulement a finalement été retenue en fonction de l'intérêt de leur contenu. Ces articles sont en majorité des études spécifiques, mais il existe aussi quelques articles de synthèse (Chabot & Bird 2015, Christie et al. 2016, Borrelle & Fletcher 2017, Mustafa et al. 2018, Harris et al. 2019, Rebolo-Ifrán et al. 2019, Charbonneau & Lemaître 2021, Edney et al. 2023, Millner et al. 2023). Des sites internet dédiés aux drones ou relatant des suivis d'oiseaux marins par drone ont également été consultés. Le rapport se focalise sur la littérature qui s'intéresse exclusivement aux oiseaux marins.

### ➤ A. Types de drone

Il existe différents types de drones qui se répartissent en deux familles, les drones à voilure fixe, ou à ailes fixes, et les drones à voilure rotative, ou drones multiroteurs (tri, quadri, hexa ou octocoptère) (McEvoy et al. 2016, Hassanalian & Abdelkefi 2017, Jiménez López & Mulero-Pázmány 2019, Johnston 2019, Charbonneau & Lemaître 2021, Figure 1). Ces appareils ont des dimensions et des poids très variables. Les appareils à voilure rotative sont adaptés pour effectuer des vols stationnaires et prendre des photos aériennes (voir Edney et al. 2023 pour une approche comparative des drones à voilure fixe ou rotative). Selon les objectifs fixés, les drones peuvent être équipés d'un appareil photo, d'une caméra vidéo, voire même d'une caméra thermique (McEvoy et al. 2016, Israel & Reinhard 2017, Jiménez López & Mulero-Pázmány 2019, Johnston 2019, Lee et al. 2019, Mapes et al. 2020).

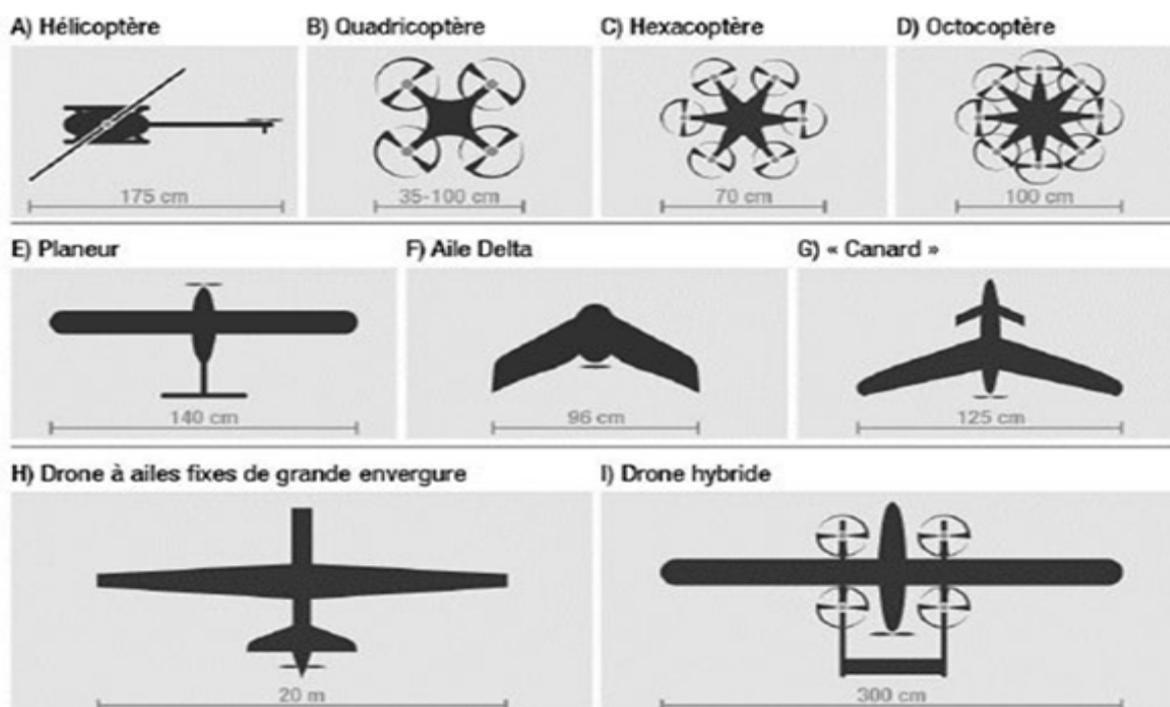


Figure 1. Les différents types de drones, à voilure rotative ou à voilure fixe (Figure extraite de Charbonneau & Lemaître 2021).

## ➤ B. Espèces concernées

L'examen de la littérature disponible indique qu'un certain nombre d'études concernent directement les oiseaux marins. La liste des groupes/espèces concernés est présentée dans les [tableaux 1 et 2](#). Les objectifs de ces études étaient d'évaluer les possibilités de recenser des colonies de différentes espèces avec un drone en faisant aussi bien, voire mieux, qu'avec les méthodes traditionnelles de dénombrement, ou de recenser des colonies d'accès difficile ou impossible. A noter que plusieurs études concernent différentes espèces dans des territoires limités, comme par exemple le delta du Po, dans lesquels l'utilisation du drone a été fortement accélérée ces dernières années.

Familles	Références des études
Cormorans	Irigoin-Lovera et al. 2019, Oosthuizen et al. 2020, Bishop et al. 2022, Mattern et al. 2023
Mouettes	- colonies au sol = Sardà-Palomera et al. 2012, Valle & Scarton 2018, 2021b, Scarton & Valle 2022 - colonies en falaise = Bishop et al. 2022
Goélands	- colonies en milieu naturel = Brisson-Curadeau et al. 2017, Mustafa et al., 2018, Rush et al. 2018, Valle & Scarton 2018, Corregidor-Castro et al. 2022, Lalach et al. 2023 - colonies en milieu urbain = Blight et al. 2019
Sternes	Chabot et al. 2015, Hodgson et al. 2016, Mustafa et al. 2018, Valle & Scarton 2018, 2021a, 2021b, Magness et al. 2019, Scarton & Valle 2021
Alcidés	Brisson-Curadeau et al. 2017, Slingsby et al. 2022

**Tableau 1.** Familles d'oiseaux marins, dont des espèces nichent en France métropolitaine, ayant fait l'objet dans d'autres pays d'études dédiées sur les suivis par drone.

Familles	Références des suivis
Cormorans	grand cormoran îlots-35 (Bretagne Vivante, R. Morel), colonie mixte cormorans-goélands-aigrette baie de Morlaix-29 (Bretagne Vivante, Y. Jacob), archipel de Molène-29 (OFB-PNMI, H. Mahéo), colonie mixte cormorans-goélands Verdelet-22 (Vivarmor, D. Even), grand cormoran Trégor-Goëlo-22 (Geoca, Y. Février)
Mouettes	mouette rieuse et mélanocéphale Occitanie (CEN Occitanie, SMCG, Tour du Valat, O. Scher), mouette rieuse et sterne pierregarin (CEN Occitanie, A. Joris)
Goélands	- colonies en milieu naturel = île aux Chevaux-56 et île du Pilier-85 (LPO, F. Latraube), Glénan-29 (Biotope 2018, Bretagne Vivante), colonie mixte cormorans-goélands-aigrette baie de Morlaix-29 (Bretagne Vivante, Y. Jacob), goéland railleur (CEN Occitanie & Tour du Valat, O. Scher), colonie mixte cormorans-goélands Verdelet-22 (Vivarmor, D. Even), Sept-Îles-22 (Deniau 2022) - colonies en milieu urbain = Lorient-56 (Fortin et al. 2013), Lamballe-22 (Cadiou et al. 2018), Fougères-35 (Cadiou et al. 2019)

Familles	Références des suivis
Sternes	sterne caugek, pierregarin, hansel et naine Occitanie (CEN Occitanie & Tour du Valat, O. Scher), sterne pierregarin Gravelines-59 (GON, N. Legroux), sterne pierregarin marais salants-44 (Life SALLINA, P. Della Valle), sterne pierregarin Trégor-Goëlo-22 (Geoca, Y. Février), sterne caugek, pierregarin ria d'Étel-56 et île aux Moutons-29 (Bretagne Vivante, J. Laborie, Cadiou et al. 2023), sterne pierregarin PACA (A. Joris)
Alcidés	guillemot de Troïl, pingouin torda cap Fréhel-22 (Bretagne Vivante, B. Cadiou)
Ardéidés/Threskiornithidés	marais de Gannedel-35 (CD35, J.-F. Lebas) , colonie mixte cormorans-goélands-aigrette baie de Morlaix-29 (Bretagne Vivante, Y. Jacob)

**Tableau 2.** Retours d'expérience de suivis d'oiseaux coloniaux par drone réalisés en France métropolitaine.

## ➤ C. Protocoles mis en oeuvre

La bibliographie consultée indique que des petits modèles de drone, type quadricoptère sont le plus souvent utilisés avec un décollage en général à 100 - 150 m de la colonie, un survol à environ 70 m pour l'approche, puis une descente progressive, souvent par palier de 5 m pour atteindre 15 - 20 m, voire beaucoup plus bas quand l'objectif est de créer un envol afin de pouvoir contrôler le contenu des nids (cf. [Valle & Scarton 2021a, 2021b](#), [Scarton & Valle 2022](#) ; [tableau 3](#)).

Référence	Pays	Espèces	Drone	Type
Sarda-Palomera et al. 2012, 2017	Espagne	mouette rieuse	Skywalker	Aile delta
Chabot et al. 2015	Canada	sterne pierregarin	AI-Multi	Planeur
Brisson-Curadeau et al. 2017	Canada	guillemot de Brunnich + espèces associées	DJI Phantom IV	Quadricoptère
Afan et al. 2018	Espagne	ibis falcinelle	DJI Phantom IV	Quadricoptère
Rush et al. 2018	UK	goéland brun	DJI Inspire 1	Quadricoptère
Blight et al. 2019	Canada	goéland à ailes grises	DJI Phantom IV + DJI Inspire 1 + Sensefly eBee Plus	Quadricoptère + aile delta
Magness et al. 2019	USA	sterne des Aléoutiennes	3DR Solo	Quadricoptère
Mapes et al. 2020	USA	petite sterne	senseFly eBee	Aile delta
Scarton & Valle 2020	Italie	sterne hansel	DJI Mavic Pro	Quadricoptère
Valle & Scarton 2021	Italie	goéland raïleur, mouette mélanocéphale, sterne hansel et caugek	DJI Mavic Pro	Quadricoptère
Scarton & Valle 2022	Italie	mouette rieuse	DJI Mavic Pro	Quadricoptère
Corregidor-Castro et al. 2022	Pays-Bas	goéland argenté et brun	Event 38 E384 Mapping Drone	Planeur
Slingsby et al. 2022	UK	alcidés	DJI Phantom IV	Quadricoptère
Bishop et al. 2022	USA	guillemot de Troïl, mouette tridactyle, cormoran pélagique et à aigrettes	DJI Inspire 2 + DJI Mavic Air	Quadricoptère

Référence	Hauteur (m)	Vitesse (m/s)	Résolution (cm/pixel)	Remarques
Sarda-Palomera et al. 2012, 2017	30-40	8 à 11	?	
Chabot et al. 2015	91-122	?	3 à 4	
Brisson-Curadeau et al. 2017	15-20	?	?	prise en compte d'une distance horizontale de 15 à 30 m des falaises
Afan et al. 2018	50	3,3	1,32	
Rush et al. 2018	15-40	3 à 4	1 à 4	
Blight et al. 2019	15-20	15 à 20	2,8-2,9	colonie en milieu urbain
Magness et al. 2019	15-61	3	0,4-0,8	
Mapes et al. 2020	85-119	?	2,8 à 22	utilisation de caméra thermique
Scarton & Valle 2020	70-30-3	1,5	?	survol des nids avec oiseaux envolés
Valle & Scarton 2021	70-30-5-2	3	?	provoquent le décollage de la colonie pour compter les œufs
Scarton & Valle 2022	70-30-5-2	?	?	provoquent le décollage de la colonie pour évaluer le taux d'éclosion
Corregidor-Castro et al. 2022	75	13	?	application d'un facteur de correction de 0,7 sur le nombre d'adultes pour estimer le nombre de couples nicheurs
Slingsby et al. 2022	70	?	1,92	suivi en mer à partir d'un bateau
Bishop et al. 2022	75-45	2 à 8	?	prise en compte d'une distance horizontale de 30 à 60 m des falaises

Tableau 3. Synthèse des protocoles utilisés par différents auteurs.

## III. Modalités de suivi et réponse des oiseaux

### A. Évaluation de la réponse des oiseaux

La réponse des oiseaux marins à l'approche du drone a été étudiée à travers différents indicateurs comportementaux et/ou physiologiques. Cette réponse tend à varier selon les espèces et les colonies, et doit être considérée lors de tout inventaire.

#### 1. Caractérisation de la réponse comportementale

La réponse comportementale des oiseaux peut être notée en utilisant cinq différents niveaux (Rummler et al. 2016, Weimerskirch et al. 2018) :

- Pas de réaction (0) : l'oiseau reste au repos (bec sous les plumes, yeux fermés), ou montre un comportement de toilettage ou un comportement reproducteur (parade, construction ou réarrangement du nid, roulage des œufs ou réajustement du couveur sur des poussins, nourrissage...);
- Vigilance (1) : l'oiseau a les yeux ouverts et effectue des mouvements horizontaux de la tête qui indiquent qu'il scrute son environnement ;
- Observation du drone (2) : l'oiseau a des mouvements de la tête vers le haut, il regarde et suit du regard le drone ;
- Comportement agonistique (3) : l'oiseau montre un comportement agressif envers le drone (et pas envers ses congénères), avec des menaces du bec, des cris ou des mouvements des ailes ;
- Fuite (4) : l'oiseau quitte son nid et laisse ses œufs et poussins à découvert, et donc exposés aux variations d'ambiance thermique ou aux prédateurs, ou dans le cas des poussins et des nonreproducteurs rassemblés en crèche ou sur des reposeurs ou sur des clubs, l'oiseau quitte son reposoir en réaction à la présence du drone.

*Irigoin-Lovera et al. (2019)* ont également pris en compte cinq différents niveaux dans le cadre du suivi d'une colonie de cormorans, pélicans et fous :

- Pas de réaction notable (0) ;
- Observation du drone (1) : l'oiseau pointe la tête en direction du drone ;
- Battements d'ailes (2) : l'oiseau bat des ailes ;
- Déplacement (3) : l'oiseau se déplace en marchant ou en courant ;
- Envol (4) : l'oiseau décolle.

Lorsqu'un oiseau montre plusieurs de ces réactions, seul le score le plus élevé est retenu.

*Chabot et al. (2015)* ont pris en compte trois différents niveaux de réponse comportementale dans le cadre du suivi d'une colonie de sternes :

- Pas de réaction notable (0) ;
- Dérangement modéré (1) : envols localisés ou agitation notable des oiseaux concernant moins de la moitié de la colonie ;
- Dérangement important (2) : envols des oiseaux sur la quasi-totalité ou la totalité de la colonie, notamment avec des « envols panique » soudains et silencieux, les oiseaux se mettant ensuite à crier après avoir pris de l'altitude.

*Rush et al. (2018)* ont répertorié sur les vidéos enregistrées lors des survols trois différents niveaux de réponse comportementale dans le cadre du suivi d'une colonie de goélands :

- « saut de puce » : le goéland s'envole brièvement (moins de 10 s) et se repose ailleurs dans la colonie ;
- vol : le goéland s'envole et reste en l'air pendant plus de 10 s, mais sans s'approcher du drone ;
- attaque : le goéland s'envole agressivement en direction du drone (une seule réelle attaque a été notée dans cette étude).

Le comportement des oiseaux doit d'abord être enregistré avant le décollage du drone, puis lors du vol, puis après le vol pour évaluer correctement l'impact du drone (*Rush et al. 2018, Weimerskirch et al. 2018, Bishop et al. 2022*). En effet, dans une colonie en situation normale sans dérangement avéré, certains oiseaux sont en état de vigilance tandis que les autres n'en montrent aucun signe.

## 2. Retours d'expériences sur les comportements des oiseaux

*Brisson-Curadeau et al. (2017)* ont mis en évidence que les goélands à ailes blanches alarmaient dès que le drone arrivait à une trentaine de mètres de distance, mais que les oiseaux se reposaient dans un délai de 3 min environ. Dans ce cas de figure, il est donc préconisé d'attendre au moins 5 min, le temps que la colonie retrouve son calme, avant de commencer les comptages.

Lors d'un test de suivi par drone des guillemots de Troïl nicheurs dans les falaises du cap Fréhel (Côtes d'Armor) en 2014, l'envol et les cris des goélands qui étaient en reposoir au pied des falaises mettaient en alerte les guillemots couveurs. Les oiseaux semblaient en position d'incubation sur l'écran de contrôle du drone, mais l'examen ultérieur des photos a mis en évidence qu'en fait ils étaient en alerte et donc en position légèrement relevée et par conséquent difficiles à identifier comme couveur potentiel ou pas (*B. Cadiou, obs. pers.*). Il aurait sans doute fallu attendre quelques minutes de plus avant de faire les prises de vue. Lors des suivis réalisés par la suite, le point de décollage du drone est plus éloigné des zones de reproduction et le drone arrive en vol parallèlement à la falaise, ce qui n'engendre pas de réaction des individus couveurs.

Des recensements par drone menés à Gravelines (Nord) en 2018 et 2019 sur des colonies de sterne pierregarin ont montré des réactions totalement différentes des oiseaux entre les deux survols malgré un modèle de drone et un protocole d'intervention identique (*N. Legroux, comm. pers.*). En 2018, les toits où est implantée la colonie ont été survolés à deux reprises (pic des couveurs/jeunes) à 25 mètres de hauteur, sans dérangement visible (absence

d'envol). En 2019, le survol de la colonie située à proximité de ces toits a engendré des envols répétés malgré une hauteur de vol supérieure (70 mètres) et la stabilisation du drone plusieurs minutes pour habituer les oiseaux. Les dérangements réguliers (goélands, fréquentation humaine) constatés sur cette colonie pendant la saison de nidification augmentent le degré de sensibilité de la sterne pierregarin vis-à-vis du survol par drone. En Loire-Atlantique, le survol de colonies de sterne pierregarin a également mis en évidence des différences de réaction des individus selon les colonies (*P. Della Valle, comm. pers.*). Une sensibilité accrue des oiseaux pour des colonies soumises à des dérangements fréquents a aussi été notée chez les goélands (*B. Degonne, comm. pers.*).

*Scarton & Valle (2022)* ont mis en évidence que le temps passé loin du nid par les oiseaux est bien plus élevé après une prospection à pied dans la colonie par un observateur qu'après le passage d'un drone à basse altitude (2-5 m) pour identifier le contenu des nids.

Les survols des colonies dans l'Hérault (site du Grand Bastit, îlots dégagés dans une lagune) à 15-20 m en période de couvaison n'ont jamais provoqué de comportement de vigilance ou d'envol de la part des espèces concernées (mouettes mélanocéphale et rieuse, sternes pierregarin, hansel, caugek et naine, goéland railleur ou avocette élégante). Sur ce secteur des survols sont réalisés 2 à 3 fois par an depuis 4 ans. Les survols conduits en présence des poussins n'ont pas non plus permis d'observer de comportements particuliers de vigilance ou de stress (*O. Scher, obs. pers.*).

### 3. Réponse physiologique

La réponse physiologique des oiseaux au survol d'un drone a été analysée dans quelques études, mettant en évidence qu'une absence de réponse comportementale ne traduit pas nécessairement une absence de stress, comme par exemple une augmentation du rythme cardiaque, de la fréquence respiratoire ou des hormones de stress, notamment la corticostérone (*Mustafa et al. 2018, Weimerskirch et al. 2018*).

Un travail récent de *Geldart et al. (2022)* sur l'eider à duvet a montré que des vols stationnaires (30 m) ou horizontaux ne changeaient pas le rythme cardiaque des oiseaux survolés par rapport à leur rythme sans survol.

## ➤ B. Évaluation de l'effet du drone et des paramètres de trajectoire de vol

### 1. Forme et couleur du drone

Les drones à voilure fixe ont un aspect qui peut être proche de la silhouette d'un prédateur, et peuvent donc engendrer une réaction plus prononcée des oiseaux survolés (*McEvoy et al. 2016*).

*Vas et al. (2015)* n'ont pas mis en évidence de différence de réaction des oiseaux en fonction de la couleur du drone.

### 2. Distance entre le point de décollage et la colonie

Les phases de décollage et de changements d'altitude sont susceptibles d'engendrer une réponse des animaux, et doivent donc être effectuées dans la mesure du possible en dehors de la colonie (*Mustafa et al. 2018*). Une distance minimale de 100 m est préconisée, et si possible hors de la vue des espèces ciblées (*Vas et al. 2015, Hodgson & Pin Koh 2016, Hodgson et al. 2016, Rümmler et al. 2016, MuleroPázmány et al. 2017, Mustafa et al. 2018, Irigoien-Lovera et al. 2019*).

En falaise, le point de décollage doit être situé à au moins 20 m de la zone d'étude (Brisson-Curadeau et al. 2017).

Si, le plus souvent, le drone est utilisé depuis la terre, il est possible de le faire décoller depuis un bateau, soit en le tenant à bout de bras, soit directement depuis le pont soit en utilisant une table pliante ou un autre support qui servira de piste de décollage.

### 3. Hauteur de vol

Weimerskirch et al. (2018) ont mis en évidence qu'à 50 m du sol une seule espèce sur les onze espèces étudiées (manchots, albatros, pétrel, cormoran, labbe) montrait une réaction significative à l'approche du drone. Et à 10 m du sol, la majorité des espèces montre une nette réaction comportementale. Les espèces qui se reproduisent en colonies importantes et bruyantes apparaissent moins sensibles que les espèces qui se reproduisent de manière plutôt isolée (Mustafa et al. 2018, Weimerskirch et al. 2018).

Une hauteur de vol de l'ordre de 30-40 m au-dessus du sol ne génère généralement pas de réaction des oiseaux sur leurs nids (Sardà-Palomera et al. 2012, Rush et al. 2018, Irigoien-Lovera et al. 2019, Marchowski 2021). Pour certaines espèces (goélands, sternes), et dans certaines conditions (niveau de dérangement de la colonie hors contexte du survol par drone), il est possible de descendre à 15 m, voire même plus bas, sans dérangement, et sans aucun cas de prédation ou de cannibalisme sur les pontes chez les goélands (Piec 2018, Rush et al. 2018, Magness et al. 2019). Chez l'huître-pie, espèce qui peut nicher sur les mêmes zones que les oiseaux marins, les couveurs quittent leur nid même lorsque le drone vole à plus de 50 m, et les oiseaux peuvent venir houspiller le drone (Valle & Scarton 2019, Cadiou et al. 2023). Leurs cris d'alarme peuvent alors engendrer l'envol des espèces ciblées par le survol par drone (Cadiou et al. 2023). Dans le cadre de tests de suivi de colonies mixtes (sternes, goélands et mouettes) réalisés dans l'Hérault en 2019, huit îlots ont été survolés de manière identique, avec un déplacement jusqu'à l'îlot à 80 m de haut puis une descente au-dessus de ce dernier à 25-30 m. Les photos ont été réalisées à cette hauteur lors d'un survol rectiligne permettant de couvrir tout l'îlot (drone DJI Phantom 3). Aucune réaction n'a été observée dans les colonies (O. Scher, obs. pers.). Le même constat avait été fait lors d'un essai de survol jusqu'à 40 m d'altitude d'une colonie mixte de mouettes et de sternes en 2014 sur les salines de Villeneuve (drone multicoptère). L'appareil photo professionnel embarqué ne nécessitait pas de descendre plus bas pour avoir une très bonne résolution (Scher 2015).

Des ajustements ont été conduits en 2021 et 2022 par la Tour du Valat et le CEN Occitanie sur les colonies mixtes (mouette rieuse et mélanocéphale, goéland railleur, sterne pierregarin, naine, caugek, hansel) du Grand Bastit (34). La distance entre le site de décollage et les îlots était variable en fonction de la topographie des digues, mais comprise entre 100 à 200 m. Le drone s'élevait à 40 m avant de se positionner au niveau de l'îlot visé. Aucun dérangement n'a jamais été observé à cette altitude. Le drone est ensuite descendu doucement jusqu'à une hauteur de 15 à 20 m puis déplacé au-dessus de la colonie à une vitesse de 1 à 2 mètres/seconde. Un contrôle permanent d'une éventuelle réaction des oiseaux était assuré par un deuxième observateur pendant toute l'opération. Les images étaient prises à l'arrêt (caméra de 20 Mp) de manière à ensuite reconstituer l'îlot par photogrammétrie. Aucun dérangement n'a jamais été observé lors de ces survols.

Pour les suivis en falaise, Brisson-Curadeau et al. (2017) préconise une distance horizontale de 20-25 m avec un petit drone de moins de 2 kg. Pour la réalisation d'une orthophoto au cap blanc Nez (Pas-de-Calais), la distance horizontale était de 45 m de la falaise. Les résultats sont suffisamment précis pour pointer via ArgGIS les sites de nidification d'oiseaux marins (fulmar boréal, mouette tridactyle ; N. Legroux, comm. pers.). Babcock et al. (2016) considère une distance horizontale de 35-50 m comme optimale. Pour les suivis en falaises, la hauteur de vol retenue doit être atteinte et maintenue constante avant l'arrivée au-dessus de la colonie.

Il convient de trouver le compromis entre les objectifs de l'étude qui ont été fixés, et donc le niveau de précision en termes de qualité d'image, et la hauteur de vol la plus élevée possible. Avec les améliorations technologiques dans les années à venir, il sera certainement possible d'obtenir des images de qualité suffisante en volant plus haut (Rush

## 4. Vitesse de vol et type de vol

Il apparaît que des changements soudains de l'intensité sonore du drone sont plus susceptibles d'engendrer une réponse des animaux, qu'il s'agisse du vrombissement de l'appareil ou du bruit généré lorsque le télépilote cherche à maintenir la position de l'appareil dans une rafale de vent (*Mustafa et al. 2018*). Il est donc préférable de privilégier les petits appareils les moins bruyants.

L'expérience du télépilote, qui maîtrise parfaitement son appareil, est donc un élément important afin d'avoir une allure régulière et de limiter les risques d'accélération soudaine de l'appareil, ou de changement brusque de direction de vol ou de hauteur de vol.

Les vitesses de vol sont plus élevées pour les drones à voilure fixe, soit environ 30 à 70 km/h selon les études (*Sardà-Palomera et al. 2012, Chabot et al. 2015, Blight et al. 2020*). Pour les drones à voilure tournante, les vitesses varient d'environ 2 à 50 km/h selon les études, le plus souvent de l'ordre de 10 à 20 km/h (*Hodgson et al. 2016, Brisson-Curadeau et al. 2017, Weimerskirch et al. 2018, Rush et al. 2018, Cadiou et al. 2019, Irigoien-Lovera et al. 2019 ; tableau 3*).

L'angle d'approche est également important et l'approche horizontale en direction des espèces ciblées est conseillée, l'approche verticale étant particulièrement déconseillée car source de réaction importante des oiseaux (*Vas et al. 2015*).

Le temps de vol doit être le plus court possible, et il est possible de paramétrer un plan de vol permettant ainsi au drone d'effectuer automatiquement les transects paramétrés pour assurer la couverture complète de la zone d'étude, en s'assurant bien d'une superposition partielle des bordures des photos des transects successifs, afin de permettre leur assemblage et afin d'éviter de rater des nids. Actuellement, l'autonomie des batteries est de l'ordre d'une vingtaine de minutes.

## IV. Traitement des données

Le traitement des données peut se faire par une analyse visuelle et manuelle des photos. Des outils d'analyse spatiale peuvent être, notamment, utilisés pour faciliter le travail de traitement des images. La première étape consiste à assembler les photos et la deuxième étape consiste à repérer les oiseaux et les nids.

### ➤ A. Assemblage des photos

Le prestataire qui réalise le survol par drone peut fournir un assemblage des photos ou fournir les photos non assemblées. Il existe des logiciels qui permettent de faire cet assemblage pour obtenir une orthomosaïque, comme par exemple PTGui (*Chabot et al. 2015*), Pix4D (*Afán et al. 2018, Lyons et al. 2019*) ou Agisoft PhotoScan (*Rush et al. 2018, Oosthuizen et al. 2020*). Pour que l'assemblage soit faisable, il faut nécessairement un recouvrement des photos, vers l'avant et sur les côtés, dont le pourcentage varie selon les études (*Singh & Frazier 2018*). Cet assemblage des photos prises par drone peut être très chronophage (*O. Scher, obs. pers.*).

Pour faciliter le calage de l'assemblage des photos, il peut s'avérer utile de positionner, avant la saison de reproduction, dans ou autour de la colonie des points de contrôle au sol, repères facilement identifiables sur les photos aériennes, et de relever leur position au GPS (*Sardà-Palomera et al. 2012, 2017, Rush et al. 2018*).

## ➤ B. Résolution des photos

La résolution des photos est un point essentiel. On parle aussi de distance d'échantillonnage au sol (GSD - ground sample distance). La résolution correspond à la taille d'un pixel de la photo dans la réalité. Ainsi une résolution de 1 cm/pixel indique qu'un pixel (qui est la plus petite entité de l'image numérique) sur la photo correspond dans la réalité à un carré de 1 cm de côté. Plus la valeur GSD est faible, plus la résolution spatiale de la photo est élevée, et plus on peut zoomer et avoir du détail (Figure 2). Cette valeur GSD est déterminée par la hauteur de vol et les spécifications de l'appareil photo ou de la caméra, notamment la largeur de l'image, la largeur du capteur et la distance focale. Il existe des sites internet qui permettent de faire le calcul en ligne (voir par exemple à ce sujet : <https://enterprise-insights.dji.com/fr/blog/distance-de-l-echantillon-au-sol>, <https://www.propelleraero.com/gsd-calculator/>).

La résolution des photos doit être de l'ordre de 0,5-1 à 3-4 cm/pixel en fonction de la taille des espèces et des besoins d'identification de différentes espèces assez similaires d'aspect (Chabot et al. 2015, Dulava et al. 2015, Chabot & Francis 2016, Afán et al. 2018, Hodgson et al. 2018, Rush et al. 2018, Blight et al. 2019, Lyons et al. 2019, Magness et al. 2019, Hayes et al. 2021, Weinstein et al. 2022, Tyndall et al. 2024 ; tableau 3). Ce besoin d'images en haute résolution, pour pouvoir zoomer pour vérifier le repérage des oiseaux et des nids, engendre une contrainte en termes de puissance des ordinateurs pour traiter les données et en termes de capacités de stockage et d'archivage des images.

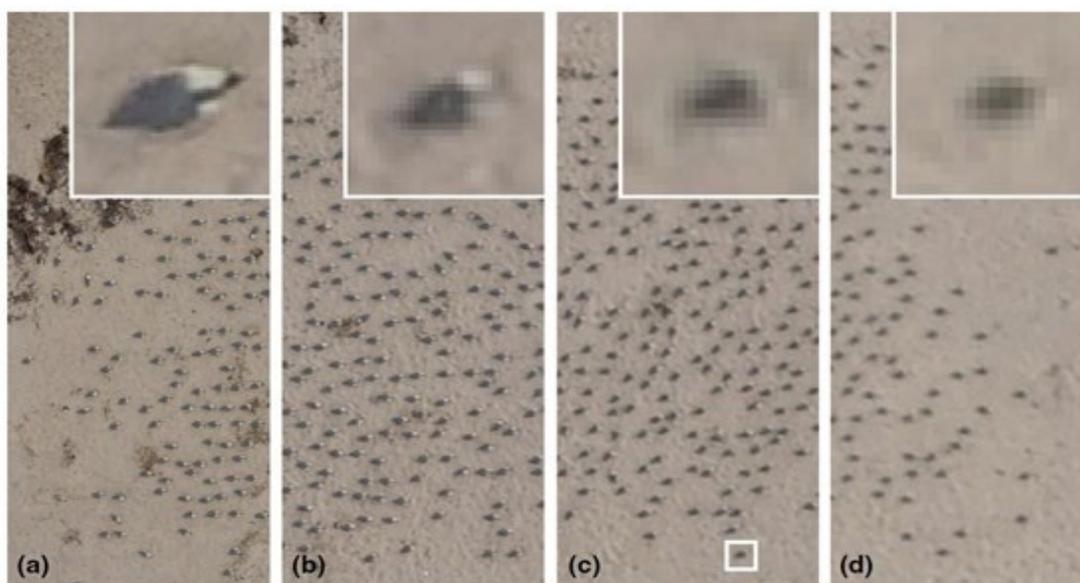


Figure 2. Illustration de la variation de la résolution des images et de l'effet engendré lorsque l'on zoome (de gauche à droite, la valeur GSD est de 0,82, 1,64, 2,47, 3,29 ; extrait de Hodgson et al. 2018).

Les photos prises par drone peuvent aussi être utilisées pour faire une modélisation 3D de la falaise ou de l'île ou îlot suivi. Ainsi, au cap Fréhel, une des falaises où nichent les mouettes tridactyles est difficile à suivre car les observations se font depuis plusieurs points avec un angle de vue parallèle à la paroi, sans recul suffisant, ce qui engendre des difficultés de correspondance des sites depuis les différents points d'observation. Le suivi par drone a permis d'obtenir pour la première fois une vue d'ensemble complète de la falaise, permettant ainsi de valider les correspondances depuis les différents points d'observation. Une modélisation 3D de la falaise a également été réalisée, en utilisant les logiciels Metashape puis Blende, améliorant ainsi cette compréhension des correspondances (Cadiou et al. 2021).

## ➤ C. Comptage des oiseaux et des nids

En préambule, il est important de rappeler que, quelle que soit la méthode utilisée, la reconnaissance des oiseaux en position d'incubation, des pontes ou des poussins nécessite un apprentissage indispensable en amont. Ceci est d'autant plus vrai dans le cas des colonies mixtes où certaines espèces ont des morphologies ou couleurs proches entraînant une vraie source de confusions. Par ailleurs, une reconnaissance de terrain est nécessaire afin de pré-identifier les espèces nicheuses et leur localisation sur les îlots concernés par les survols.

### 1. Repérage et identification

Le repérage des oiseaux et l'identification des espèces sur les photos se fait d'après la couleur et la forme (Fig. 3). Le contraste entre les oiseaux et leurs nids et le substrat ou le couvert végétal est un élément important pour le repérage des reproducteurs sur les photos (Grenzdörffer 2013). Ainsi, même si des photos aériennes sont utilisées depuis longtemps par le monde ornithologique, la reconnaissance des espèces depuis une vue dorsale n'est pas évidente au premier abord. En effet, ce point de vue inhabituel nécessite de se faire « l'œil » afin d'éviter les confusions entre espèces. Une fois ce premier point éludé, il convient d'identifier dans quels cas l'individu observé est en position d'incubation ou pas. Cette reconnaissance est variable en fonction de la manière dont ont été capturées les images : de manière frontale ou avec un angle (45° en général) et si des ombres sont visibles (plus importantes en début et en fin de journée). Les ombres sont en effet un bon indicateur de la position debout/couchée de l'oiseau. Cependant, la végétation à proximité d'un nid peut aussi générer une ombre, ce qui est source d'erreur (Grenzdörffer 2013, obs. pers.). Il est donc possible de ne pas prendre les photos vraiment à la verticale mais avec un léger angle afin de visualiser les oiseaux un peu plus sur leur profil pour faciliter l'identification des couveurs ou des différentes espèces présentes (Magness et al. 2019). Pour des suivis en falaises, Babcock et al. (2016) considèrent comme optimal un angle de prise de vue de 10° par rapport à l'horizontale. La prise de vidéos à la place de photos permet aussi d'avoir des informations comportementales qui peuvent aider à identifier un couveur potentiel (Piec 2018).

La position d'incubation est souvent caractérisée par une silhouette large (à comparer aux oiseaux debout à proximité), une queue relevée et une attitude de couveur (on parlera de jizz). Il est également possible de repérer des matériaux assemblés autour de l'oiseau (ceci n'est pas le cas des sternes) voire des zones de fientes importantes indiquant souvent la présence d'un nid. Lors de l'identification des oiseaux en position apparente d'incubation, le risque est l'identification des partenaires posés ou des non-reproducteurs posés comme étant des « couveurs ». Il faut donc bien choisir la période optimale de la journée en fonction du cycle d'activité des oiseaux pour que les partenaires des couveurs soient en majorité hors de la colonie à se nourrir (Sardà-Palomera et al. 2012). Selon les espèces, la présence des partenaires des oiseaux couveurs sur la colonie peut varier en fonction de la période de la journée, par exemple selon les horaires des marées (Yoon et al. 2013). Il est également possible de réaliser plusieurs vols, à 20 minutes ou 1 heure d'intervalle, voire à quelques jours d'intervalle, pour identifier les non-reproducteurs, en ne retenant comme nids actifs que les points qui sont identifiés à la même position sur les photos ou vidéos successives (Sardà-Palomera et al. 2012, 2017, Piec 2018).

Suivant ces éléments il est donc nécessaire d'attribuer un statut aux objets observés, et de définir les différentes unités de comptage à identifier. Deux approches peuvent être mentionnées comme exemple :

- Sardà-Palomera et al. (2012) proposent de classer les éléments identifiés en 3 catégories, avec (1) nid certain (base de nid visible et oiseau en position de couveur), (2) nid probable (oiseau en position de couveur mais pas de base de nid visible) et (3) pas de nid (oiseau debout et pas de matériaux de nid visibles),
- Corregidor-Castro et al. (2022) considèrent quant à eux 5 catégories, avec (1) nid vide inoccupé, (2) oiseau en position d'incubation sur un nid (matériaux de nid visibles), (3) oiseau couché (sans matériaux de nid visibles), (4) oiseau debout et (5) statut inconnu.

Si la date des prises de vue n'est pas optimale et que certains couples ont déjà des petits poussins mobiles, hors des nids, il faut aussi chercher à repérer ces poussins, qui se confondent facilement avec leur environnement (obs. pers.). La nature du couvert végétal et du substrat les rend plus ou moins mimétiques (*Figure 3*).

Dans les colonies mixtes, avec des espèces morphologiquement très similaires, la hauteur de vol peut être un paramètre déterminant. Ainsi, sur une colonie en Alaska, contrairement aux survols réalisés à plus grande hauteur, seuls les survols à environ 15 m ont permis de distinguer sur les photos la sterne arctique de la sterne des aléoutiennes (*Magness et al. 2019*).

	<p>a) Sterne hansel qui couve : on remarque le corps élargi et les rémiges primaires croisées en position relevée</p>
	<p>b) Sterne hansel en position debout : on remarque le corps longiligne, les rémiges primaires alignées et le corps décalé du sol</p>
	<p>c) Mouettes mélanocéphales sur leur nid (les 2 individus de gauche) et debout (individu de droite) On remarque la présence de matériaux de construction sous les oiseaux à gauche tandis que celui de droite est sur sol nu. On remarque également les corps plus bombés des 2 individus de gauche par rapport à celui de droite</p>
	<p>d) Mouettes mélanocéphales non couveuses. A gauche, individu en mouvement dont on aperçoit les pattes. A droite, individu au repos : corps longiligne, pas de trace de matériaux de nid</p>
	<p>e) Mouette rieuse (à droite) qui couve au milieu des mouettes mélanocéphales. Pour la rieuse, on remarque le bout des rémiges bien noir et la tête qui ne montre qu'un léger triangle brun. Pour les mélanocéphales, on remarque les rémiges bien blanches et la tête nettement noire. Ici, on remarque l'absence de matériaux de construction mais des corps bien larges.</p>

*Figure 3. Quelques exemples de cas rencontrés dans les colonies de sternes, de mouettes et de goélands (sources : Tour du Valat & CEN Occitanie, Bretagne Vivante).*

	<p>f) Sternes caugek avec couronne de fientes caractéristique autour des « nids »</p>
	<p>g) Couple de goélands bruns : individu de droite couveur sur le nid et partenaire posé debout à sa gauche (noter la différence d'ombre projetée)</p>
	<p>h) Goéland brun posé sur un caillou à proximité du nid, et petits poussins visibles hors du nid (1 poussin d'un côté du caillou, et les 2 autres côte à côte dans la végétation sous la queue de l'adulte)</p>

**Figure 3 (suite).** Quelques exemples de cas rencontrés dans les colonies de sternes, de mouettes et de goélands (sources : Tour du Valat & CEN Occitanie, Bretagne Vivante).

Lors du repérage visuel, les principales sources d'erreur concernent le repérage d'éléments « oiseaux » qui n'en sont pas (morceaux de bois, pierres, taches de végétation claire...) mais aussi l'absence de repérage de certains nids (oiseaux dans des zones d'ombre, oiseaux momentanément absents de leur nid...) (Sardà-Palomera et al. 2012, Grenzdörffer 2013, Hong et al. 2019). L'existence de zones floues sur certaines photos, ou une résolution d'image insuffisante (pixellisation qui ne permet pas de voir correctement des détails de la photo en zoomant), peuvent compliquer le repérage des oiseaux et des nids. Pour la distinction des goélands argentés et des goélands bruns, la couleur apparente des oiseaux sur les photos peut varier en fonction de la couverture nuageuse (B. Cadiou, obs. pers.). Ainsi, avec un ciel couvert les couleurs sont normales (gris argenté vs gris foncé), alors qu'avec un temps ensoleillé les clichés peuvent être surexposés et les parties supérieures des goélands argentés peuvent apparaître plutôt blanches tandis que celles des goélands bruns apparaissent alors plutôt gris argenté (Figure 4).



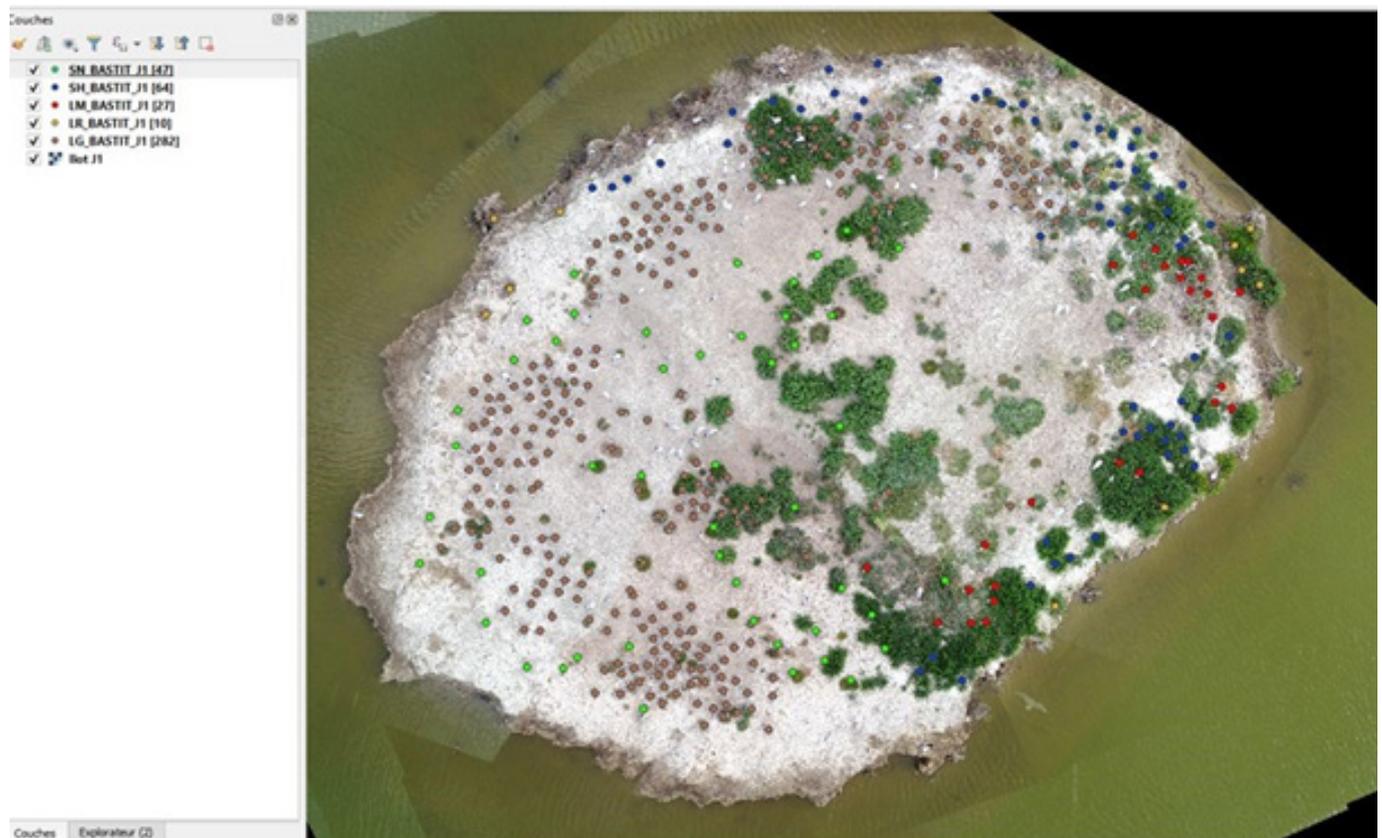
**Figure 4.** Nids de goélands argentés et bruns sur des toits, avec à gauche un faible ensoleillement permettant de bien voir la couleur des parties supérieures, et à droite un fort ensoleillement, montrant la difficulté d'identifier le nid de goéland brun (au centre) parmi les nids de goélands argentés (clichés SkyRoad Production et Civic Drone).

*Corregidor-Castro et al. (2022)* ont montré qu'un facteur de correction de 0,7, voire plutôt 0,6 dans certains cas (après l'éclosion), peut être utilisé pour convertir le nombre total de goélands présents sur photo en nombre de nids. Cela revient à considérer approximativement 1 nid pour 1,5 adultes posés (individus partenaires des oiseaux couveurs, mais aussi individus non-reproducteurs). Ce facteur de correction de 0,7 avait été proposé par le passé dans le cadre d'un guide méthodologique pour le recensement des colonies d'oiseaux marins et de limicoles côtiers en mer des Wadden (*Hälterlein et al. 1995*). Et un facteur de correction de 0,67 est classiquement utilisé pour convertir approximativement un nombre d'individus en un nombre de couples lors du recensement des sternes en provoquant l'envol de la colonie ou lors du recensement des alcidés agglutinés sur des corniches (*Walsh et al. 1995*). Un suivi précis sur une zone échantillon, et pas sur l'ensemble de la colonie, avec survol préalable puis prospection à pied, peut aussi permettre de calculer un ratio entre le nombre d'oiseaux présents sur photo et le nombre de nids, ratio qui peut être utilisé pour estimer le nombre de nids à partir du nombre total d'individus dénombrés (*Biotope 2018*). Le facteur de correction ainsi obtenu était d'environ 0,6 à 0,7 pour une colonie de goélands (*Biotope 2018*), ordre de grandeur identique à celui obtenu dans l'étude précitée (*Corregidor-Castro et al. 2022*). Si la validité de ce facteur de correction est vérifiée à l'avenir sur différentes colonies, cela simplifiera le processus d'analyse des images (*Corregidor-Castro et al. 2022*). Il suffira alors de dénombrer les individus présents, ce qui sera bien plus rapide que de chercher à identifier le statut de chaque oiseau (couveur certain, probable, possible ou non couveur). Lors de l'exploitation automatisée de clichés pris par drone, *Corregidor-Castro & Valle (2022)* suggèrent de faire manuellement une évaluation du nombre total d'oiseaux et du nombre d'oiseaux en position d'incubation sur une zone échantillon du centre de la colonie (10 % de la surface de la colonie ou toute la colonie si moins de 50 oiseaux). Le ratio ainsi obtenu peut ensuite être appliqué au nombre total d'oiseaux dénombrés en utilisant un logiciel de traitement d'image.

## 2. Méthodes de comptage

Si le nombre de nids n'est pas trop important, le comptage peut se faire à la main sur un tirage papier des photos ou de l'orthomosaïque, tout en examinant les photos à l'écran sur un ordinateur. Pour faciliter le comptage sur les photos, il est possible de générer un quadrillage, puis de faire le dénombrement des nids carré par carré (par exemple 50 × 50 m ; [Lyons et al. 2019](#)). Des logiciels, comme par exemple GIMP, ImageJ, Photoshop, ArcGIS, QGIS, peuvent être utilisés pour faire les comptages manuels sur les photos à l'écran sur un ordinateur, en utilisant l'outil comptage, avec différents calques ou différentes couleurs des points en fonction des différentes espèces présentes. Bien évidemment, plus les effectifs nicheurs sont importants sur la colonie étudiée, et plus ce travail de pointage manuel est long et fastidieux.

A titre d'exemple, sur le littoral méditerranéen, les données collectées sont exploitées avec le logiciel QGIS, dans lequel est importée la photo générée par photogrammétrie au format TIFF (image de près d'1 Go). Ensuite, une couche est créée par espèce présente et l'option « montrer le décompte des entités » est activée sur la couche, ce qui permet d'avoir l'évolution du comptage à chaque clic. Ne sont pris en compte que les oiseaux en position d'incubation ([Figure 5](#)). Une concertation préalable à trois observateurs a permis de déterminer ce qui est considéré comme un oiseau en incubation versus tous les autres cas (oiseau au repos, oiseau debout, etc.). Ceci a permis d'avoir des résultats de comptage très proches alors qu'ils ont été réalisés de manière indépendante ([O. Scher, obs. pers.](#)). Des images réalisées lors de survols en autogyre (par le SMCG - Syndicat mixte de Camargue gardoise) sur des secteurs difficiles d'accès sont intégrées de la même manière. Contrairement aux images prises par drone et assemblées par photogrammétrie, ces images sont assemblées manuellement. D'autres images prises par drone de manière ponctuelle sont également comptées de cette manière.



**Figure 5.** Exemple de comptage réalisé sous QGIS. On retrouve à gauche les différentes couches espèces avec leur effectif. Source : CEN Occitanie & Tour du Valat

Faire le dénombrement sur les photos à deux observateurs (ou plus) séparément, sans concertation, puis comparer les résultats, permet d'affiner l'estimation du nombre de couples nicheurs (Cadiou et al. 2021, 2023). Ainsi, par exemple, les résultats d'un comptage sur un îlot du cap Fréhel en 2020 ont montré qu'aucun des deux observateurs n'avait détecté 100 % des nids de goélands (une soixantaine au total pour trois espèces, argentés, marins et bruns par ordre décroissant d'importance), mais que chacun des observateurs avait détecté quelques nids non repérés par l'autre (Cadiou et al. 2021). En Occitanie, des comptages réalisés à trois observateurs ont montré des différences parfois importantes (jusqu'à 20 %) en fonction des espèces et de la configuration des îlots. Une différence de 80 % dans l'estimation du nombre de mouettes mélanocéphales nicheuses sur un îlot a même été observée (O. Scher, obs. pers.). En Bretagne, l'exploitation des clichés d'une colonie de sternes a également mis en évidence une variabilité entre cinq observateurs dans l'attribution des statuts de couveur, non couveur ou incertain (Cadiou et al. 2023).

### 3. Limites et avantages

De la même manière que des conditions météorologiques défavorables (vent, pluie, température ambiante) limitent les possibilités de recensement d'une colonie par prospection à pied (risque accru de refroidissement des œufs et des petits poussins), des conditions météorologiques défavorables limitent également les possibilités de recensement par drone (manœuvrabilité plus délicate avec du vent en rafales, visibilité et qualité des photos réduites en cas de pluie).

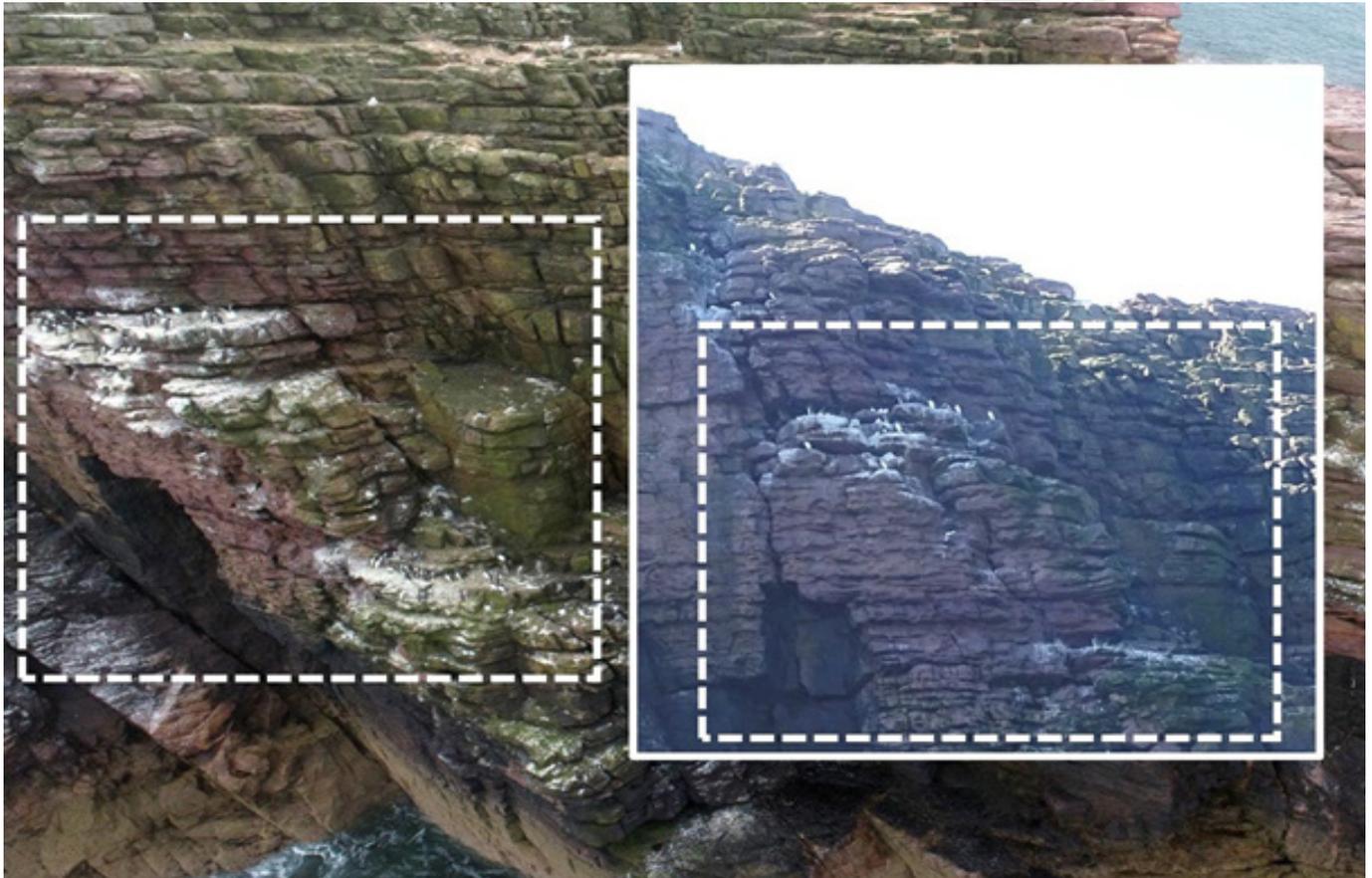
Lorsque la hauteur de végétation ne permet pas la visualisation des nids, une caméra thermique installée sur le drone permet de détecter les adultes sur les nids (N. Legroux, comm. pers.). Les tests réalisés ont montré que les œufs peuvent aussi être identifiés par cette méthode si l'adulte s'est envolé, ce qui se produit fréquemment chez les sternes sans aucune raison apparente (N. Legroux, comm. pers.). En cas d'envol des sternes, il convient de maintenir le drone en vol stationnaire en attendant que les oiseaux soient revenus couvrir et que la colonie retrouve son calme (Cadiou et al. 2023).

Si les résultats présentés par Chabot et al. (2015) indiquent que les comptages aériens permettent d'identifier de 91 à 97 % des nids de sternes détectés par prospection dans la colonie, Piec (2018) obtient des résultats totalement différents, avec 22 à 167 % de « nids » en plus pour les comptages aériens par rapport aux comptages terrestres. Parmi les explications possibles, Piec (2018) met en avant la qualité des images, la technique retenue (photo ou vidéo) et le biais lié à l'observateur. Sur les îlots faiblement végétalisés, l'identification des individus couveurs est facilitée, même sans repérage particulier d'un nid comme dans le cas des sternes qui ne font que des cuvettes (O. Scher, obs. pers.). Pour les sternes, des drones performants permettent de distinguer la « cuvette » du couveur afin de certifier de la reproduction de l'individu (N. Legroux, comm. pers.).

Les résultats obtenus avec des suivis par drone sont néanmoins plus précis que lors d'un comptage dans la colonie pour connaître la proportion respective des différentes espèces dans les colonies mixtes, notamment si une espèce est présente en faible nombre, comme par exemple des couples de goélands bruns dans une colonie de goélands argentés (Février 2020, Deniau 2022).

L'utilisation du drone a été testée pour affiner les recensements des guillemots de Troïl et des pingouins tordas dans les zones peu visibles au cap Fréhel (Côtes d'Armor), sur les falaises continentales ou sur les îlots (Cadiou et al. 2021). Contrairement aux photos prises de mer depuis un bateau, les photos prises par drone permettent d'avoir une vue plongeante en oblique sur les corniches, les failles et les recoins où s'installent ces alcidés (Figure 6). Le drone est une technique de suivi à mettre en œuvre annuellement, si possible, car elle est complémentaire des méthodes d'observation traditionnelles, et permet d'augmenter la précision et l'exhaustivité des dénombrements.

Concernant le temps nécessaire à l'exploitation des données, le comptage par espèce peut être très chronophage. Cet aspect s'améliore avec l'expérience de l'observateur, mais reste long dans le cas de colonies denses et multi-spécifiques (de quelques heures à parfois quelques dizaines d'heures ; Baudoint 2021, Deniau 2022, obs. pers.).



**Figure 6.** Corniches à alcidés au cap Fréhel (Côtes d'Armor) et comparaison des clichés pris par au-dessus avec le drone et par en-dessous depuis un bateau (clichés B. Degonne et P. Quéré).

#### 4. Perspectives : évaluation de la production en jeunes

Quelques études ont évalué les possibilités d'utiliser des drones pour obtenir des données sur le taux de nids avec éclosion (Sardà-Palomera et al. 2017, Valle & Scarton 2021b, Scarton & Valle 2022), ou pour dénombrer des poussins, et donc estimer la production en jeunes, en utilisant des drones (Goebel et al. 2015, Piec 2018, Valle & Scarton 2018, 2021a). Valle & Scarton ont particulièrement étudié cet aspect qui nécessite de provoquer l'envol de la colonie afin de pouvoir contrôler le contenu des nids en faisant des photos. Le temps de retour des oiseaux au nid est bien plus réduit après le survol à basse altitude qu'après la prospection de la colonie par un observateur (Valle & Scarton 2021a, 2021b, Scarton & Valle 2022).

Dans le cadre des essais sur le site du Grand Bastit (34) en 2022, un survol a été réalisé quatre semaines après les éclosions afin d'évaluer le nombre de poussins de mouette mélanocéphale et de goéland railleur présents sur plusieurs îlots. Sur les quelques essais de comptage réalisés, il est apparu extrêmement difficile de mener à bien cette opération du fait de la morphologie des poussins et de leur homochromie (Figure 7). Par ailleurs, leur rassemblement en « tas » ne permet pas tout le temps de distinguer les individus de manière évidente. Par ailleurs, seuls les « gros » poussins sont dénombrables par cette méthode sans toutefois pouvoir distinguer de classes d'âge (O. Scher, obs. pers.).





**Figure 7.** Exemple de comptage de poussins sur une colonie de l'Hérault. Les points orange indiquent les poussins de mouette mélanocéphale (cliché CEN Occitanie & Tour du Valat).

## ➤ D. Méthodes de Deep Learning

Il est possible d'automatiser la reconnaissance des oiseaux sur les photos (Chabot & Francis 2016, Rush et al. 2018, Dujon & Schofield 2019, Lyons et al. 2019, Corregidor-Castro & Valle 2022), voire d'identifier les différentes espèces présentes, d'après leur spectre de couleur (Corregidor-Castro et al. 2021), ou de distinguer les oiseaux morts des oiseaux vivants pour évaluer l'impact de l'influenza hautement pathogène (Tyndall et al. 2024). Chabot & Francis (2016) listent dans un tableau récapitulatif les articles qui mentionnent l'utilisation d'outils informatiques pour détecter ou dénombrer des oiseaux sur des images aériennes. Le procédé utilisé est plus ou moins complexe et nécessite d'être testé et validé en comparant les résultats avec un comptage visuel (Grenzdörffer 2013, Afán et al. 2018, Hodgson et al. 2018, Rush et al. 2018, Hong et al. 2019, Marchowski 2021). En cas de repérage automatisé, les mêmes problèmes d'erreurs se posent, comme dans le cadre du repérage visuel (Hayes et al. 2021, Weinstein et al. 2022, Tyndall et al. 2024).

La variation de la couleur des parties supérieures des oiseaux en fonction de l'ensoleillement peut compliquer l'automatisation des dénombrements car la signature spectrale de la cible doit être constante (Corregidor-Castro et al. 2021). Rush et al. (2018) et Corregidor-Castro et al. (2021) ont travaillé avec ArcGIS pour automatiser l'analyse des images, en identifiant des pixels correspondant aux différentes parties du corps (tête, dos, queue), qui permettent de constituer des polygones « de type goéland ». Corregidor-Castro et al. (2021) ont caractérisé pour les goélands argentés et pour les goélands bruns deux types de pixels pour le dos, à savoir en pleine lumière ou dans l'ombre. Leur étude a mis en évidence que l'automatisation de la reconnaissance des goélands bruns est plus compliquée que pour les goélands argentés, car les parties supérieures sont plus sombres et l'espèce affectionnent les zones avec une végétation plus dense, rendant plus difficile l'identification des pixels correspondants. La hauteur de vol et les caractéristiques des appareils photos ont un impact majeur sur la qualité des images et sur la précision des comptages automatisés (Corregidor-Castro et al. 2021).

Les modèles Deep Learning (apprentissage profond) sont utilisés pour traiter l'information visuelle et ils sont capables de détecter et localiser des éléments particuliers dans les images. Les réseaux de neurones convolutifs (*Convolutional Neural Network - CNN*) sont des algorithmes qui permettent la reconnaissance d'images (*Miele et al. 2021*). La phase initiale de développement nécessite d'entraîner et de tester le modèle à partir d'images sur lesquelles les éléments que l'on souhaite identifier de manière automatisée ont préalablement été identifiés et annotés manuellement (*Christin et al. 2019, Dujon et al. 2021, Hayes et al. 2021, Kellenberger et al. 2021, Marchowski 2021, Miele et al. 2021, Weinstein et al. 2022, Hentati-Sundberg et al. 2023, Tyndall et al. 2024*). L'utilisation de ces réseaux de neurones convolutifs a connu un développement très rapide dans le domaine de l'écologie ces dernières années (*Christin et al. 2019*). Il existe plusieurs modèles ayant chacun des architectures différentes, souvent créés avec le langage de programmation Python, par exemple RetinaNet, ResNet, Inception, MobileNet, Faster R-CNN (Region-based Convolutional Neural Network), R-FCN (Region-based Fully Convolutional Network), SSD (Single Shot MultiBox Detector), YOLO (You Only Look Once) (*Hong et al. 2019, Martin-Abadal et al. 2020, Hayes et al. 2021, Mirugwe et al. 2022, Tyndall et al. 2024*).

Notamment dans le cas de colonies denses, ou d'autres types d'agrégations (dortoirs, etc.), l'utilisation du Machine Learning (apprentissage automatique) permet d'estimer le nombre d'oiseaux présents bien plus rapidement que les méthodes traditionnelles de comptage (*Hayes et al. 2021, Kellenberger et al. 2021, Chen et al. 2023*).

Aucun retour d'expérience n'a été trouvé à l'échelle française concernant l'exploitation automatisée des images de suivi d'oiseaux coloniaux par drone.

## V. Conclusion

L'utilisation du drone est une nouvelle technologie qui peut faciliter le suivi des colonies de diverses espèces d'oiseaux marins, en procurant différents avantages par rapport aux méthodes classiques utilisées auparavant. Les intérêts de l'utilisation du drone sont principalement un temps de prospection sur le terrain généralement plus réduit que pour les méthodes classiques de prospection dans la colonie ou d'observation à distance, un dérangement des oiseaux bien moindre que lors d'une prospection dans la colonie, la possibilité d'explorer des sites de reproduction difficilement accessibles, une précision des comptages souvent similaire ou plus élevée, un archivage d'images géoréférencées permettant des analyses spatio-temporelles, et un coût global généralement plus réduit. Selon la typologie des colonies, et notamment le couvert végétal, les résultats des comptages par drone donnent des effectifs généralement supérieurs, parfois similaires ou inférieurs, aux comptages à distance ou par prospection dans la colonie. L'automatisation de l'exploitation des clichés obtenus par drone grâce à l'utilisation de modèles Deep Learning est à développer pour accroître le gain de temps et la précision des comptages. La possibilité d'utiliser un facteur de correction standard entre le nombre d'oiseaux présents et le nombre d'oiseaux en position apparente d'incubation doit aussi faire l'objet de nouvelles études, sur différentes espèces et sur différentes colonies.

Un protocole de suivi par drone doit être écrit de manière détaillée avant le survol (type de drone, distance de décollage par rapport à la colonie, hauteur de vol par rapport aux nids, vitesse de vol, nombre de vols réalisés et durée de chaque vol, type de prises de vue réalisées, photo ou vidéo ; cf. *Barnas et al. 2020, Cadiou 2020*, pour des préconisations détaillées), incluant la calibration avec les méthodes classiques de comptage et l'évaluation du dérangement (réponse comportementale des oiseaux avant, pendant et après le vol). Ce protocole de suivi peut être complété, si besoin, par d'autres éléments le jour du survol. Les modalités de traitement des images collectées durant le survol, photos ou vidéos, doivent également être renseignées (cf. *Barnas et al. 2020, Cadiou 2020*, pour des préconisations détaillées). La standardisation des protocoles de suivi par drone, garantissant le caractère utile et éthique de cette nouvelle pratique, est essentielle pour obtenir les autorisations de survol.

Dans un premier temps, le suivi doit être réalisé à la fois par drone et par la méthode précédemment utilisée sur la colonie ciblée, dans la mesure du possible le même jour ou à défaut à quelques jours d'intervalle, afin de permettre une comparaison des résultats. Le suivi par drone doit être effectué avant le suivi par prospection dans la colonie. Une fois la méthode de suivi par drone validée et calibrée, il n'est plus nécessaire de réaliser les comptages par prospection dans la colonie.

## VI. Remerciements

Merci à Antoine Arnaud, Antoine Chabrolle, Benoist Degonne, Philippe Della Valle, Yann Jacob, Franck Latraube, Nathan Legroux, Régis Morel, Christophe Pin, Rémi Tiné et Loïc Willm pour leurs retours d'expérience sur les suivis par drone et les expérimentations méthodologiques. Merci à Maxime Pineaux pour ses commentaires sur une première version du document.

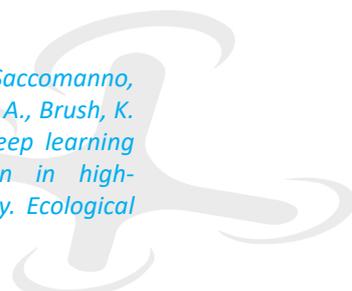
## VII. Bibliographie

- Afán, I., Máñez, M., & Díaz-Delgado, R. (2018). Drone monitoring of breeding waterbird populations: the case of the glossy ibis. *Drones*, 2, 42.
- Anderson, D. W., & Keith, J. O. (1980). The human influence on seabird nesting success: conservation implications. *Biological Conservation*, 18, 65-80.
- Babcock, M., Aitken, D., Kite, K., & Clarkson, K. (2016). *Flamborough and Filey Coast pSPA Seabird Monitoring Programme. 2016 Report. RSPB*, 41 p.
- Barnas, A., Chabot, D., Hodgson, A., Johnston, D. W., Bird, D. M., & Ellis-Felege, S. N. (2020). A standardized protocol for reporting methods when using drones for wildlife research. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 8, 89-98.
- Baudoint, M. (2021). *Analyse comparative de différents protocoles de comptage dans la colonie mixte de Goélands argentés, bruns et marins de l'île Vierge avec un focus sur l'avenir des suivis par drone. Rapport de stage de Master 1 Sciences pour l'Environnement, Parcours Gestion de l'Environnement et Écologie littorale, Université de La Rochelle, MNHN – Station marine de Concarneau*, 47 p.
- Beale, C.M., & Monaghan, P. (2004). Human disturbance: people as predation-free predators? *Journal of Applied Ecology*, 41, 335-343.
- Biotope. (2018). *Étude des populations d'oiseaux nicheurs de l'île du Loc'h. Rapport Biotope, Bolloré SA*, 33 p.
- Bishop, A. M., Brown, C. L., Christie, K. S., Kettle, A. B., Larsen, G. D., Renner, H. M., & Younkings, L. (2022). Surveying cliff-nesting seabirds with unoccupied aircraft systems in the Gulf of Alaska. *Polar Biology*, 45, 1703-1714.
- Blight, L. K., Bertram, D. F., & Kroc, E. (2019). Evaluating UAV-based techniques to census an urbanesting gull population on Canada's Pacific coast. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 7, 312324.
- Borrelle, S. B., & Fletcher, A. T. (2017). Will drones reduce investigator disturbance to surface-nesting seabirds? *Marine Ornithology*, 45, 89-94.
- Brisson-Curadeau, É., Bird, D., Burke, C., Fifield, D. A., Pace, P., Sherley, R. B., & Elliott, K. H. (2017). Seabird species vary in behavioural response to drone census. *Scientific Reports*, 7, 17884.
- Cadiou, B. (2020). *Utilisation du drone pour le recensement des colonies d'oiseaux marins. Rapport Gisom*, 20 p. [https://oiseaux-marins.org/upload/iedit/1/actualites/Info/ROMN20-22/A3\\_Utilisationdronerecensementcoloniesoiseauxmarins.pdf](https://oiseaux-marins.org/upload/iedit/1/actualites/Info/ROMN20-22/A3_Utilisationdronerecensementcoloniesoiseauxmarins.pdf)
- Cadiou, B., & Faurent, P. (2018). *Bilan du recensement des goélands nicheurs sur les toits de Lamballe (Côtes d'Armor) et de la campagne expérimentale de stérilisation des œufs à l'aide d'un drone en 2018. Rapport Bretagne Vivante, Civic Drone*, 9 p.
- Cadiou, B., Jorigné, B., & Degonne, B. (2019). *Bilan du recensement des goélands nicheurs sur les toits de l'agglomération de Fougères (Ille-et-Vilaine) en 2019. Rapport Bretagne Vivante, SkyRoad Production*, 14 p.
- Cadiou, B., Quéré, P. & Viain, A. (2021). *Bilan de la saison de reproduction des oiseaux marins au cap Fréhel en 2020. Rapport Bretagne Vivante, syndicat mixte grand site cap d'Erquy – cap Fréhel, Conseil régional de Bretagne*, 18 p.

- Cadiou, B., Jacob, Y., Le Guen, M., Diard-Combout, M., Guezennec, E., Chastenet, M., & Paillet, C. (2023). Recensement par drone de la colonie plurispécifique de sternes de l'île aux Moutons. *Rapport Bretagne Vivante-SEPNB*, 18 p.
- Chabot, D., & Bird, D. M. (2015). Wildlife research and management methods in the 21st century: Where do unmanned aircraft fit in? *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 3, 137-155.
- Chabot, D., & Francis, C. M. (2016). Computer-automated bird detection and counts in high-resolution aerial images: a review. *Journal of Field Ornithology*, 87, 343-359.
- Chabot, D., Craik, S. R., & Bird, D. M. (2015). Population census of a large common tern colony with a small unmanned aircraft. *PLoS One*, 10, e0122588.
- Chen, A., Jacob, M., Shoshani, G., & Charter, M. (2023). Using computer vision, image analysis and UAVs for the automatic recognition and counting of common cranes (*Grus grus*). *Journal of Environmental Management*, 328, 116948.
- Charbonneau, P. & Lemaître, J. (2021). *Revue des applications et de l'utilité des drones en conservation de la faune. Le Naturaliste canadien*, 145, 3-34.
- Christie, K. S., Gilbert, S. L., Brown, C. L., Hatfield, M., & Hanson, L. (2016). Unmanned aircraft systems in wildlife research: current and future applications of a transformative technology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 14, 241-251.
- Christin, S., Hervet, É., & Lecomte, N. (2019). Applications for deep learning in ecology. *Methods in Ecology and Evolution*, 10, 1632-1644.
- Corregidor-Castro, A., Holm, T.E., & Bregnballe, T. (2021). Counting breeding gulls with unmanned aerial vehicles: camera quality and flying height affects precision of a semi-automatic counting method. *Ornis Fennica*, 98, 33-45.
- Corregidor-Castro, A., & Valle, R.G. (2022). Semi-automated counts on drone imagery of breeding seabirds using free accessible software. *Ardea*, 110, 89-97.
- Corregidor-Castro, A., Riddervold, M., Holm, T. E., & Bregnballe, T. (2022). Monitoring colonies of large gulls using UAVs: from individuals to breeding pairs. *Micromachines*, 13, 1844.
- Deniau, A. (2022). *Faisabilité de recensement des colonies d'oiseaux marins par le drone sur la réserve naturelle nationale des Sept Îles. Année 2021. Rapport LPO*, 17 p.
- Dujon, A. M., & Schofield, G. (2019). Importance of machine learning for enhancing ecological studies using information-rich imagery. *Endangered Species Research*, 39, 91-104.
- Dujon, A. M., Ierodiaconou, D., Geeson, J. J., Arnould, J. P., Allan, B. M., Katselidis, K. A., & Schofield, G. (2021). Machine learning to detect marine animals in UAV imagery: effect of morphology, spacing, behaviour and habitat. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 7, 341-354.
- Dulava, S., Bean, W.T., & Richmond, O.M. (2015). Environmental reviews and case studies: applications of unmanned aircraft systems (UAS) for waterbird surveys. *Environmental Practice*, 17, 201-210.
- Edney, A., Hart, T., Jessopp, M., Banks, A., Clarke, L., Cugnière, L., Elliot, K.H., Juarez Martinez, I., Kilcoyne, A., Murphy, M., Nager, R.G., Ratcliffe, N., Thompson, D.L., Ward, R.M., & Wood, M. (2023). Best practices for using drones in seabird monitoring and research. *Marine Ornithology*, 51, 265-280.
- Elliott, K. C., Montgomery, R., Resnik, D. B., Goodwin, R., Mudumba, T., Booth, J., & Whyte, K. (2019). Drone use for environmental research. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 7, 106111.
- Février, Y. (coord.) (2020). *Mise en œuvre du suivi des colonies d'oiseaux nicheurs à proximité de la zone d'implantation (Mesure de Suivi 4). Présentation des résultats de la mesure S.4. Année 2020. Rapport Geoca, Ailes Marines*, 41 p.
- Fortin, M., Leicher, M., & Cadiou, B. (2013). Recensement des colonies de goélands urbains de l'agglomération lorientaise. *Communes de Lorient, Lanester & Caudan. Rapport Bretagne Vivante, Gisom, Séné*, 48 p.
- Geldart, E. A., Barnas, A. F., Semeniuk, C. A., Gilchrist, H. G., Harris, C. M., & Love, O. P. (2022). A colonial-nesting seabird shows no heart-rate response to drone-based population surveys. *Scientific Reports*, 12, 18804.
- Geraeds, M., van Emmerik, T., de Vries, R., & bin Ab Razak, M. S. (2019). Riverine plastic litter monitoring using unmanned aerial vehicles (UAVs). *Remote Sensing*, 11, 2045.
- Goebel, M. E., Perryman, W. L., Hinke, J. T., Krause, D. J., Hann, N. A., Gardner, S., & LeRoi, D. J. (2015). A small unmanned aerial system for estimating abundance and size of Antarctic predators. *Polar Biology*, 38, 619-630.
- Grenzdörffer, G. J. (2013). UAS-based automatic bird count of a common gull colony. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40-1/W2, 169-174.
- Hälterlein, B., Fleet, D.M., Henneberg, H.R., Menneböck, T., Rasmussen, L.M., Südbeck, P., Thorup, O., & Vogel, R. (1995). *Anleitung zur Brutbestandserfassung von Küstenvögeln im Wattenmeerbereich, Common Wadden Sea Secretariat, Trilateral Monitoring and Assessment Group, Joint Monitoring Program for Breeding Birds in the Wadden Sea: Wilhelmshaven, Germany, Volume 57*, 55 p.
- Harris, C. M., Herata, H., & Hertel, F. (2019). Environmental guidelines for operation of Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS): experience from Antarctica. *Biological Conservation*, 236, 521531.

- Hassanalian, M., & Abdelkefi, A. (2017). *Aircraft Systems, Miami, FL: IEEE Xplore*, 1199-1207.
- Hayes, M.C., Gray, P.C., Harris, G., Sedgwick, W.C., Crawford, V. D., Chazal, N., Crofts, S., & Johnston, D.W. (2021). *Drones and deep learning produce accurate and efficient monitoring of large-scale seabird colonies. Ornithological Applications*, 123, 1-16.
- Hentati-Sundberg, J., Olin, A.B., Reddy, S., Berglund, P.A., Svensson, E., Reddy, M., Kasarareni, S., Carlsen, A.A., Hanes, M., Kad, S., & Olsson, O. (2023). *Seabird surveillance: combining CCTV and artificial intelligence for monitoring and research. Remote Sensing in Ecology and Conservation*.
- Hodgson, J.C., & Pin Koh, L. (2016). *Best practice for minimising unmanned aerial vehicle disturbance to wildlife in biological field research. Current Biology*, 26, R404-R405.
- Hodgson, J.C., Baylis, S. M., Mott, R., Herrod, A., & Clarke, R.H. (2016). *Precision wildlife monitoring using unmanned aerial vehicles. Scientific Reports*, 6, 22574.
- Hodgson, J.C., Mott, R., Baylis, S. M., Pham, T. T., Wotherspoon, S., Kilpatrick, A.D., Raja Segaran, R., Reid, I., Terauds, A., & Koh, L.P. (2018). *Drones count wildlife more accurately and precisely than humans. Methods in Ecology and Evolution*, 9, 1160-1167.
- Hong, S. J., Han, Y., Kim, S. Y., Lee, A. Y., & Kim, G. (2019). *Application of deep-learning methods to bird detection using unmanned aerial vehicle imagery. Sensors*, 19, 1651.
- Irigoin-Lovera, C., Luna, D. M., Acosta, D. A., & Zavalaga, C. B. (2019). *Response of colonial Peruvian guano birds to flying UAVs: effects and feasibility for implementing new population monitoring methods. PeerJ*, 7, e8129.
- Israel, M., & Reinhard, A. (2017). *Detecting nests of lapwing birds with the aid of a small unmanned aerial vehicle with thermal camera. In IEEE International Conference on Unmanned Aircraft Systems, Miami, FL: IEEE Xplore*, 1199-1207.
- Jiménez López, J., & Mulero-Pázmány, M. (2019). *Drones for conservation in protected areas: present and future. Drones*, 3, 10, 23 p.
- Johnston, D. W. (2019). *Unoccupied aircraft systems in marine science and conservation. Annual Review of Marine Science*, 11, 439-463.
- Kellenberger, B., Veen, T., Folmer, E., & Tuia, D. (2021). *21 000 birds in 4.5 h: efficient large-scale seabird detection with machine learning. Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 7, 445460.
- Lalach, L. A., Bradley, D. W., Bertram, D. F., & Blight, L. K. (2023). *Using drone imagery to obtain population data of colony-nesting seabirds to support Canada's transition to the global Key Biodiversity Areas program. Nature Conservation*, 51, 155-166.
- Lee, W. Y., Park, M., & Hyun, C. U. (2019). *Detection of two Arctic birds in Greenland and an endangered bird in Korea using RGB and thermal cameras with an unmanned aerial vehicle (UAV). PloS one*, 14, e0222088.
- Lyons, M. B., Brandis, K. J., Murray, N. J., Wilshire, J. H., McCann, J. A., Kingsford, R. T., & Callaghan, C. T. (2019). *Monitoring large and complex wildlife aggregations with drones. Methods in Ecology and Evolution*, 10, 1024-1035.
- Maes, W. H., & Steppe, K. (2019). *Perspectives for remote sensing with unmanned aerial vehicles in precision agriculture. Trends in Plant Science*, 24, 152-164.
- Magness, D. R., Eskelin, T., Laker, M., & Renner, H. M. (2019). *Evaluation of small unmanned aerial systems as a census tool for Aleutian Tern Onychoprion aleuticus colonies. Marine Ornithology*, 47, 11-16.
- Mapes, K.L., Pricope, N.G., Baxley, J.B., Schaale, L.E., & Danner, R.M. (2020). *Thermal Imaging of BeachNesting Bird Habitat with Unmanned Aerial Vehicles: Considerations for Reducing Disturbance and Enhanced Image Accuracy. Drones*, 4, 12.
- Marchowski, D. (2021). *Drones, automatic counting tools, and artificial neural networks in wildlife population censusing. Ecology and Evolution*, 11, 16214-16227.
- Martin-Abadal, M., Ruiz-Frau, A., Hinz, H., & Gonzalez-Cid, Y. (2020). *Jellytoring: real-time jellyfish monitoring based on deep learning object detection. Sensors*, 20, 1708.
- Mattern, T., Pütz, K., Mattern, H.L., Houston, D. M., Long, R., Keys, B.C., White, J.W., Ellenberg, U., & Garcia-Borboroglu, P. (2023). *Accurate abundance estimation of cliff-breeding Bounty Island shags using drone-based 2D and 3D photogrammetry. Avian Conservation and Ecology*, 18 (2), 6.
- McEvoy, J. F., Hall, G. P., & McDonald, P. G. (2016). *Evaluation of unmanned aerial vehicle shape, flight path and camera type for waterfowl surveys: disturbance effects and species recognition. PeerJ*, 4, e1831.
- Miele, V., Dray, S., & Gimenez, O. (2021). *Images, écologie et deep learning. Regards sur la biodiversité*, 1-15.
- Millner, N., Cunliffe, A., Mulero-Pázmány, M., Newport, B. Sandbrook, C., & Wich, S. (2023). *Exploring the opportunities and risks of aerial monitoring for biodiversity conservation. Global Social Challenges Journal*, 2, 2-23.
- Mirugwe, A., Nyirenda, J., & Dufourq, E. (2022). *Automating bird detection based on webcam captured images using deep learning. In Proceedings of 43rd Conference of the South African Institute of Computer Scientists and Information Technologists. EPIC Series in Computing*, 85, 62-76.
- Mulero-Pázmány, M., Stolper, R., Van Essen, L. D., Negro, J. J., & Sassen, T. (2014). *Remotely piloted aircraft systems as a rhinoceros anti-poaching tool in Africa. PloS One*, 9, e83873.

- Mulero-Pázmány, M., Jenni-Eiermann, S., Strebel, N., Sattler, T., Negro, J. J., & Tablado, Z. (2017). Unmanned aircraft systems as a new source of disturbance for wildlife: a systematic review. *PLoS One*, 12, e0178448.
- Mustafa, O., Barbosa, A., Krause, D. J., Peter, H. U., Vieira, G., & Rümmler, M. C. (2018). State of knowledge: Antarctic wildlife response to unmanned aerial systems. *Polar Biology*, 41, 23872398.
- Nowak, M. M., Dziób, K., & Bogawski, P. (2019). Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in environmental biology: a review. *European Journal of Ecology*, 4, 56-74.
- Oosthuizen, W. C., Krüger, L., Jouanneau, W., & Lowther, A. D. (2020). Unmanned aerial vehicle (UAV) survey of the Antarctic shag (*Leucocarbo bransfieldensis*) breeding colony at Harmony Point, Nelson Island, South Shetland Islands. *Polar Biology*, 43, 187-191.
- Piec, D. (2018). Trial drone survey of breeding terns on Lymington Marshes, Western Solent. LIFE14 NAT/UK/000394 Roseate Tern report, 7 p.
- Rebolo-Ifrán, N., Grilli, M. G., & Lambertucci, S. A. (2019). Drones as a threat to wildlife: YouTube complements science in providing evidence about their effect. *Environmental Conservation*, 46, 205-210.
- Rümmler, M. C., Mustafa, O., Maercker, J., Peter, H. U., & Esefeld, J. (2016). Measuring the influence of unmanned aerial vehicles on Adélie penguins. *Polar Biology*, 39, 1329-1334.
- Rush, G. P., Clarke, L. E., Stone, M., & Wood, M. J. (2018). Can drones count gulls? Minimal disturbance and semiautomated image processing with an unmanned aerial vehicle for colony-nesting seabirds. *Ecology and Evolution*, 8, 12322-12334.
- Sardà-Palomera, F., Bota, G., Viñolo, C., Pallarés, O., Sazatornil, V., Brotons, L., Gomáriz, S., & Sarda, F. (2012). Fine-scale bird monitoring from light unmanned aircraft systems. *Ibis*, 154, 177-183.
- Sardà-Palomera, F., Bota, G., Padilla, N., Brotons, L., & Sardà, F. (2017). Unmanned aircraft systems to unravel spatial and temporal factors affecting dynamics of colony formation and nesting success in birds. *Journal of Avian Biology*, 48, 1273-1280.
- Scarton, F., & Valle, R. (2020). Drone assessment of habitat selection and breeding success of Gullbilled Tern *Gelochelidon nilotica* nesting on low-accessibility sites: a case study. *Rivista Italiana di Ornitologia*, 90, 69-76.
- Scarton, F., & Valle, R. G. (2022). Comparison of drone vs. ground survey monitoring of hatching success in the black-headed gull (*Chroicocephalus ridibundus*). *Ornithology Research*, 30, 271280.
- Scher, O. (2015). Test de dérangement préliminaire au comptage d'oiseaux coloniaux nicheurs par multicoptère. 3ème rencontres naturalistes de l'Aude, 12 & 13 mars 2015. [https://rencontresnaturalistes.lpo11.fr/ressources/prestations/edition\\_2016/Suivis\\_oiseaux\\_par\\_drone.pdf](https://rencontresnaturalistes.lpo11.fr/ressources/prestations/edition_2016/Suivis_oiseaux_par_drone.pdf)
- Scher, O. (2019). L'Islande, terre de drones ? *Espaces naturels*, 65, 28.
- Shakhatreh, H., Sawalmeh, A. H., Al-Fuqaha, A., Dou, Z., Almaita, E., Khalil, I., Othman, N. S., Khreishah, A., & Guizani, M. (2019). Unmanned aerial vehicles (UAVs): a survey on civil applications and key research challenges. *IEEE Access*, 7, 48572-48634.
- Singh, K. K., & Frazier, A. E. (2018). A meta-analysis and review of unmanned aircraft system (UAS) imagery for terrestrial applications. *International Journal of Remote Sensing*, 39, 5078-5098.
- Slingsby, J., Scott B.E., Kregting L., McIlvenny J., Wilson J., Yanez M., Langlois S. & Williamson B.J. (2022). Using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) imagery to characterise pursuit-diving seabird association with tidal stream hydrodynamic habitat features. *Frontiers in Marine Science*, 9, 820722.
- Tyndall, A.A., Nichol, C.J., Wade, T., Pirrie, S., Harris, M.P., Wanless, S., & Burton, E. (2024). Quantifying the impact of avian influenza on the northern gannet colony of Bass Rock using ultra-high-resolution drone imagery and deep learning. *Drones*, 8, 40.
- Valle, R., & Scarton, F. (2018). Uso dei droni nel censimento degli uccelli acquatici nidificanti nel Nord Adriatico. *Bollettino del Museo di Storia Naturale di Venezia*, 69, 69-75.
- Valle, R.G., & Scarton, F. (2019). Effectiveness, efficiency, and safety of censusing Eurasian Oystercatchers *Haematopus ostralegus* by unmanned aircraft. *Marine Ornithology*, 47, 81-87.
- Valle, R.G., & Scarton, F. (2021a). Drone-conducted counts as a tool for the rapid assessment of productivity of Sandwich Terns (*Thalasseus sandvicensis*). *Journal of Ornithology*, 162, 621-628.
- Valle, R.G., & Scarton, F. (2021b). Monitoring the hatching success of gulls Laridae and terns Sternidae: a comparison of ground and drone methods. *Acta Ornithologica*, 56, 241-254.
- Vas, E., Lescroël, A., Duriez, O., Boguszewski, G., & Grémillet, D. (2015). Approaching birds with drones: first experiments and ethical guidelines. *Biology Letters*, 11, 20140754.
- Walsh, P.M., Halley, D.J., Harris, M.P., del Nevo, A., Sim, I.M.W., & Tasker, M.L. (1995). *Seabird monitoring handbook for Britain and Ireland*. JNCC / RSPB / ITE / Seabird Group, Peterborough.
- Weimerskirch, H., Prudor, A., & Schull, Q. (2018). Flights of drones over sub-Antarctic seabirds show species- and status-specific behavioural and physiological responses. *Polar Biology*, 41, 259-266.



Weinstein, B.G., Garner, L., Saccomanno, V.R., Steinkraus, A., Ortega, A., Brush, K. et al. (2022). A general deep learning model for bird detection in high-resolution airborne imagery. *Ecological Applications*, 32, e2694.

Yoon J., Yoon H-J., Go B-G., Joo E-J., & Park S-R. (2013). Tide associated incubation and foraging behaviour of Saunders's Gulls *Larus saundersi*. *Ardea*, 101, 99-104.



## Méthodes de recensement des oiseaux marins et côtiers en période de nidification sur le littoral français

G. Poirez<sup>1</sup>, Q. Van Hecke<sup>2</sup>, G. Williams<sup>1</sup>

Comité de relecture : B. Cadiou<sup>3</sup>, O. Scher<sup>3</sup>

### Résumé

Les colonies d'oiseaux marins et côtiers nichant sur le littoral français sont traditionnellement suivies et surveillées à l'aide d'un protocole standardisé de comptage des effectifs nicheurs. Ces suivis s'inscrivent dans différents cadres : période de recensement national, plans de gestion (exemple des RNN), observatoires régionaux... Ces suivis sont réalisés selon une méthodologie standardisée visant à recueillir des données aussi exhaustives que possible. Ces enquêtes permettent d'apprécier les effectifs des populations françaises, d'estimer des tendances démographiques et de mettre en évidence les éventuels changements au sein de la dynamique et de la répartition des colonies.

Dans le cadre de ce chapitre, nous nous focalisons sur douze espèces nicheuses représentatives de différents milieux occupés : le Cormoran huppé, le Grand Gravelot, le Goéland argenté, le Goéland brun, le Goéland marin, le Guillemot de Troïl, la Mouette tridactyle, la Mouette rieuse, la Mouette mélanocéphale, la Sterne caugek, le Pingouin torda, et la Sterne pierregarin.

Selon les localités, les comptages sont réalisés à pied dans les colonies, à distance ou dans certains contextes par des observations depuis des points hauts. L'unité de recensement des effectifs nicheurs varie selon les espèces et leur biologie. Il peut être le Nid Apparement Occupé (NAO), le Site Apparement Occupé (SAO), le Nid Actif (NA), le Site Actif (SA), le Couple Apparement Reproducteur, à l'exception des gravelots où chaque contact est noté avec son statut de nidification (Couple, Nid, Famille, Femelle isolée, Male isolé). De plus, pour l'évaluation du nombre de couples nicheurs, une différenciation entre les individus « couveurs » et « non couveurs » est réalisée afin d'éviter les surestimations.

Les suivis des couples nicheurs et des poussins se déroulent à partir du mois d'avril jusqu'au mois d'août. Le nombre de passages préconisés varie selon les espèces ciblées, les objectifs visés et les moyens financiers disponibles. Les poussins sont, quant à eux, comptés au cours d'un nombre de passages variables, et âgés de 3 à 7 classes d'âges selon les espèces. Une estimation de la production (PROD), correspondant au rapport entre le nombre de jeunes et le nombre de couples nicheurs. Lorsque cela est possible, le nombre de jeunes à l'envol est retenu pour estimer la production. Bien qu'essentiels pour évaluer la démographie des populations d'oiseaux marins nicheurs, ces protocoles de suivis ont leurs avantages et leurs limites.

1 Groupe Ornithologique et naturaliste agrément Hauts-de-France  
2 Écosphère  
3 Groupement d'intérêt scientifique des oiseaux marins

Si ces protocoles se montrent efficaces pour des colonies facilement accessibles ou spatialement restreintes, ils peuvent néanmoins devenir contraignants ou limités pour des espèces nichant dans des zones parfois inaccessibles à l'homme, peu visibles depuis le sol ou sur de vastes territoires. Ajoutons qu'aux conditions d'accès, les facteurs météorologiques (brume de chaleur au sol) peuvent parfois compliquer les comptages rapidement.

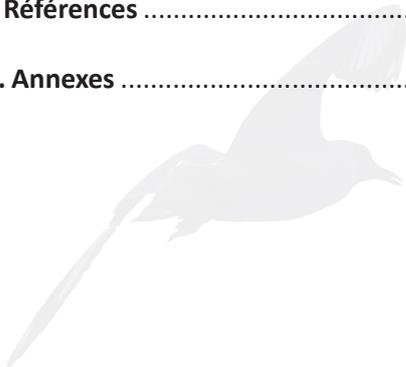
C'est pourquoi, il est intéressant de se poser la question de l'utilisation du drone pour compléter ou réaliser ces inventaires, afin de remédier à certaines incertitudes que rencontrent les méthodes de recensement classiques.



# SOMMAIRE CHAPITRE 4



<b>I. Introduction</b> .....	133
<b>II. Présentation des sites d'étude et des espèces étudiées</b> .....	134
A. Identification des sites d'étude .....	134
B. Présentation des habitats .....	135
1. Status, habitats et phénologies de nidification des espèces cibles.....	137
<b>III. Protocole d'inventaire des oiseaux marins et côtiers en période de reproduction</b> .....	139
A. Méthodologie .....	139
1. Comptages directs sur les colonies de reproduction .....	139
2. Méthodes photographiques .....	139
3. Inventaires par échantillonnage .....	140
B. Méthodologie(s) associée(s) à chaque espèce .....	140
C. Paramètres et données relevées .....	144
<b>IV. Avantages et limites des protocoles de suivis traditionnels</b> .....	149
<b>V. Conclusion et perspectives</b> .....	151
<b>VI. Références</b> .....	152
<b>VII. Annexes</b> .....	155





# I. Introduction

Les oiseaux marins constituent l'un des groupes d'oiseaux les plus menacés, en raison du déclin des populations de plusieurs espèces (Croxall et al., 2012). Ces oiseaux font face à de nombreuses pressions telles que la mortalité accidentelle lors des activités de pêches, la compétition et la disponibilité en proies, les maladies, le changement climatique et l'introduction d'espèces exotiques envahissantes au sein des sites de reproduction (Furness & Tasker, 2000 ; Tuck et al., 2003 ; Cury et al., 2011 ; Grémillet et al., 2018 ; Dias et al., 2019).

Ils sont aussi de très bons indicateurs de changements du milieu marin, de l'effet de polluants, et des variations des communautés piscicoles de l'écosystème marin (Furness & Camphuysen, 1997 ; Piatt et al., 2007 ; Raipar et al., 2018).

Pour ces raisons, ce groupe fait l'objet d'une surveillance accrue. Cette surveillance se traduit par des recensements réguliers les plus exhaustifs possibles. Le suivi de ces espèces est facilité par leur caractère colonial, et leur comptage peut être réalisé lors de la période de reproduction. Les résultats produits permettent à la fois d'évaluer l'état écologique des populations d'oiseaux marins, l'impact des pressions auxquelles elles sont soumises, mais aussi de dégager des tendances démographiques à long terme (GISOM, 2020).

Les oiseaux marins sont des organismes à longue durée de vie qui peuvent passer, en ce qui concerne les espèces pélagiques, la majeure partie de leur vie en mer mais ils reviennent à terre en période de reproduction. Ils nichent en colonies, parfois composées de plusieurs espèces. La reproduction est un moment critique pour les oiseaux marins. Les espèces nichant à terre sont notamment exposées à la prédation (Townes et al., 2011). Ce groupe est également sensible aux épizooties à cette période, en raison de la concentration d'individus et aux rassemblements sur les sites de reproduction (Pohlmann et al., 2023 ; Lane et al., 2024).

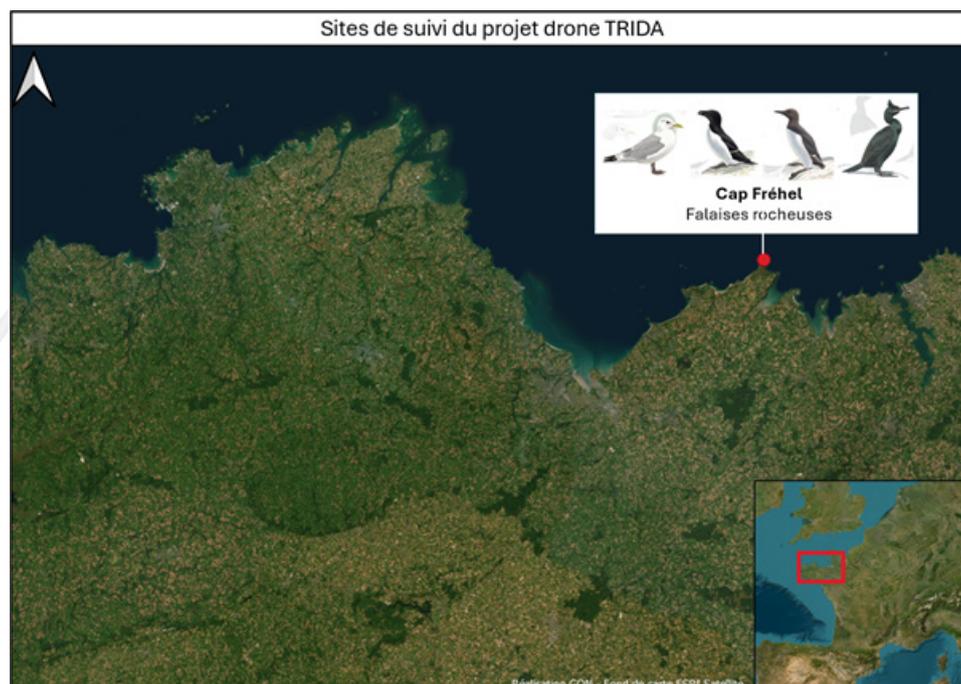
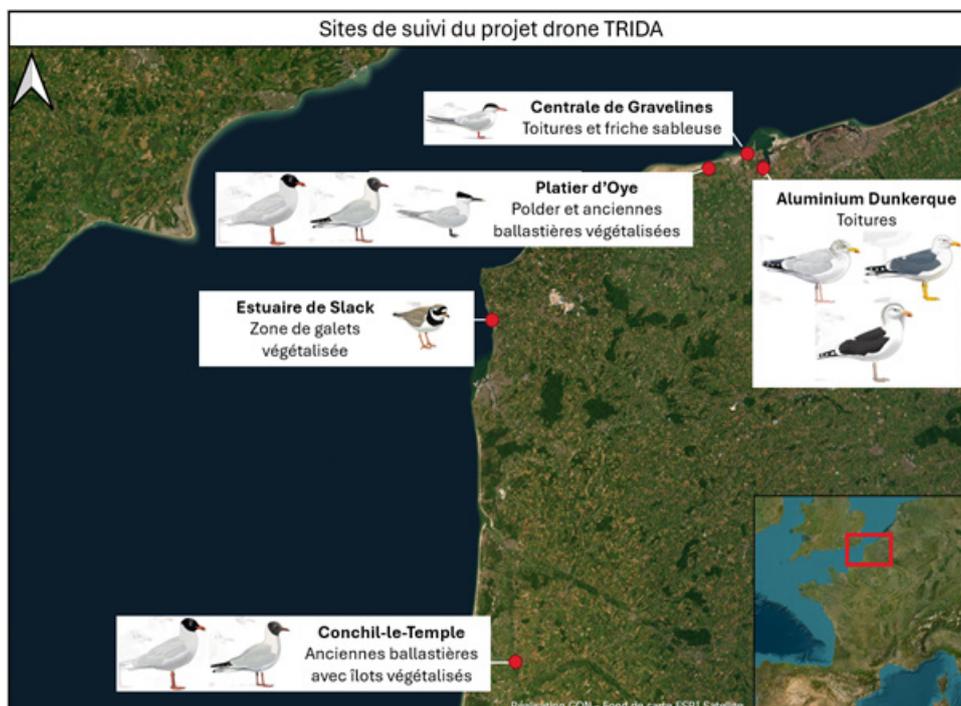
En France, les effectifs nicheurs de 28 espèces à reproduction régulière font l'objet d'un suivi régulier. Ce recensement national est coordonné par le GISOM (groupement d'intérêt scientifique oiseaux marins), depuis la fin des années 60 (Cadiou et al., 2014), et est réalisé en partenariat avec des structures locales de terrain (Établissements publics, associations naturalistes, voire structures privées en charge de la gestion ou/et du suivi de colonies d'oiseaux marins). Ces suivis visent à dresser un état des lieux des pressions qui peuvent s'exercer sur les colonies d'oiseaux marins nicheurs à « enjeu fort », à évaluer l'état écologique du milieu marin et à étudier l'évolution démographique et la répartition des colonies sur le territoire (GISOM, 2020). Cet inventaire se veut être homogène et standardisé, et le plus exhaustif possible. Il a vocation à inventorier les colonies littorales, mais également les colonies continentales, ainsi que les colonies urbaines.

Ce chapitre vise à décrire les méthodologies d'inventaires dits « traditionnels » sur 12 espèces d'oiseaux marins présents sur les côtes des Hauts-de-France et de Bretagne, suivies au sol dans le cadre du recensement national et par drone dans le cadre du projet TRIDA, à savoir le Grand Gravelot, le Guillemot de Troil, le Pingouin torda, la Mouette tridactyle, le Cormoran huppé, la Mouette mélanocéphale, la Mouette rieuse, la Sterne pierregarin, la Sterne caugek, le Goéland argenté, le Goéland brun, et le Goéland marin. Ces espèces ont été choisies d'une part pour la diversité de milieux inventoriés, et d'autre part par leur niveau de menace sur la liste de l'UICN.

## II. Présentation des sites d'études et des espèces étudiées

### A. Identification des sites d'étude

Les cartes ci-dessous localisent les sites d'étude du projet TRIDA, les espèces cibles ainsi que les milieux associés.



La typologie des milieux utilisés par ces espèces pour nicher est variée, et peut être aussi bien composée d'un substrat rocheux, de falaises, d'îlots végétalisés ou des plages sableuses, et de structures artificielles, toitures, façades. Si certaines espèces favorisent un type de milieu, tel le Pingouin torda (*Alca torda*) qui niche principalement à flanc de falaises, certaines espèces sont plus opportunistes, telles la Sterne pierregarin (*Sterna hirundo*), qui niche aussi bien sur des bancs sableux, des îlots végétalisés, ou encore des structures flottantes (barges, bateaux, «radeaux nicheurs») ou des toitures.

## ➤ B. Présentation des habitats

Chaque site de nidification possède des caractéristiques particulières. Dans cette partie, nous présentons une sélection de sites suivis dans le cadre du projet TRIDA dans différents contextes et configurations.

### Estuaire de la Slack :



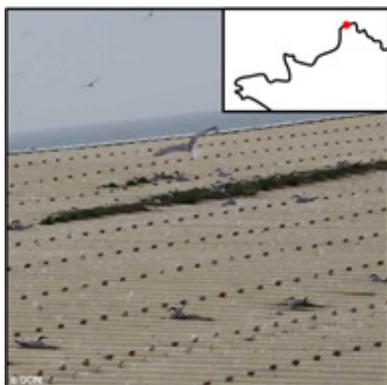
L'embouchure de la Slack (Ambleteuse, Pas-de-Calais) est un estuaire de type picard, présentant une mosaïque d'habitats estuariens, et abritant pratiquement toutes les communautés végétales halophiles sur un espace restreint de 72 hectares (CBNGI *et al.*, 2016). Le poulier, composé de sable, coquillages, galets et petits cailloux, constitue un habitat privilégié pour la reproduction du Grand Gravelot, avec près de 10% de la population nicheuse nationale (Potet *et al.*, 2022).

### Anciennes ballastières de Conchil-le-Temple :



Les anciennes ballastières de Conchil-le-Temple (Conchil-le-Temple et Waben, Pas-de-Calais) constituent un complexe humide, avec des plans d'eau issus de l'extraction de granulats associés à des prairies hygrophiles (CBNGI *et al.*, 2017). Les travaux de renaturation ont permis l'installation d'espèces d'oiseaux, avec notamment une colonie mixte nicheuse de Mouettes mélanocéphales – Mouettes rieuses.

### Toitures d'Aquanord :



Les toitures de la ferme aquacole Aquanord (Gravelines, Nord) ont représenté jusque l'année 2016 la plus importante colonie nicheuse de Sterne pierregarin française, avec un maximum de 1 423 couples en 2014. Après un effondrement de la colonie à la suite de travaux, il reste 24 couples sur le toit d'Aquanord, et au minimum 650 couples sur la dune aux sternes (zone compensatoire) (*comm. pers. Legroux, GON, 2023*).

### Platier d'Oye :



La réserve naturelle nationale du Platier d'Oye (Oye-Plage, Pas-de-Calais) est un polder issu du comblement de l'estuaire de l'Aa (RNF). Etape sur la voie principale de migration des oiseaux d'Europe du Nord, ses vasières et plans d'eau constituent une halte migratoire essentielle pour l'avifaune (*INPN, 2003*), ainsi qu'un site majeur pour la reproduction de nombreuses espèces (230 espèces d'oiseaux observées). Parmi les espèces utilisant le Platier d'Oye en période de reproduction, figure la Sterne caugek, avec un peu moins de 1 000 couples en 2020 (*Jacob, 2021*).

### Toitures de Dunkerque :



La ville de Dunkerque (Nord) abrite une colonie urbaine nicheuse de goélands, avec une majorité de Goélands argentés (plus de 40 % de la population du département), suivis par les Goélands bruns. La présence de Goélands marins est notée, mais très faible (*Biotope, 2023*). Malgré un programme de stérilisation, la population de goélands semble stable.

## Falaises du cap Fréhel :



Le cap Fréhel (Plévenon, Côtes-d'Armor) est constitué de falaises de grès rose de 70m de haut, situées entre la baie de Saint-Brieuc et celle de Saint-Malo. Le site accueille une des rares colonies d'alcidés nationales (INPN, 2017a). Des Mouettes tridactyles et Cormorans huppés nichent également dans ces falaises.

Il est important de souligner que le projet TRIDA permet d'étudier les méthodes de prospection sur un panel d'habitats variés permettant d'apporter des éléments de connaissance profitables à de nombreux sites aux caractéristiques similaires. Ainsi, les milieux à inventorier recouvrent différents écosystèmes, allant de la dune blanche à la falaise rocailleuse ou crayeuse, en passant par des îlots parfois inaccessibles hormis en bateau. Toutes ces spécificités nécessitent des méthodologies adaptées à chaque situation.

## 1. Status, habitats et phénologies de nidification des espèces cibles

Espèces nicheuses sur haut de plage, îlots et zones humides littorales :



Nom	Sterne caugek ( <i>Thalasseus sandvicensis</i> )
Statut de conservation	Quasi menacée (France)
Période de nidification	Avril - août
Biotope de nidification	Zones humides littorales

Espèces nicheuses de falaises :



Nom	Guillemot de Troil ( <i>Uria aalge</i> )
Statut de conservation	En danger (France)
Période de nidification	Avril - août
Biotope de nidification	Corniches / falaises



Nom	Pingouin torda ( <i>Alca torda</i> )
Statut de conservation	En danger critique (France)
Période de nidification	Avril - août
Biotope de nidification	Corniches / falaises



<b>Nom</b>	<b>Mouette tridactyle (<i>Rissa tridactyla</i>)</b>
Statut de conservation	<b>Vulnérable</b> (France)
Période de nidification	Avril - août
Biotope de nidification	Corniches / falaises / façades de bâtiments



<b>Nom</b>	<b>Cormoran huppé (<i>Phalacrocorax aristotelis</i>)</b>
Statut de conservation	<b>Préoccupation mineure</b> (France)
Période de nidification	Avril - août
Biotope de nidification	Côtes rocheuses / falaises

Espèces nicheuses de divers milieux et habitats urbains :



<b>Nom</b>	<b>Goéland argenté (<i>Larus argentatus</i>)</b>
Statut de conservation	<b>Quasi menacée</b> (France)
Période de nidification	Février - août
Biotope de nidification	Divers milieux, y compris urbains



<b>Nom</b>	<b>Goéland brun (<i>Larus fuscus</i>)</b>
Statut de conservation	<b>Préoccupation mineure</b> (France)
Période de nidification	Février - août
Biotope de nidification	Divers milieux, y compris urbains



<b>Nom</b>	<b>Goéland marin (<i>Larus marinus</i>)</b>
Statut de conservation	<b>Préoccupation mineure</b> (France)
Période de nidification	Février - août
Biotope de nidification	Divers milieux, y compris urbains



# III. Protocole d'inventaire des oiseaux marins et côtiers en période de reproduction

## ➤ A. Méthodologie

L'inventaire des oiseaux marins nicheurs en France métropolitaine repose sur plusieurs méthodes adaptées à la diversité des espèces, des habitats et des objectifs de suivi, dont les principales sont présentées ici.

### 1. Comptages directs sur les colonies de reproduction

#### **Observation à distance :**

Des observations sont réalisées à distance des colonies. Des jumelles ou des télescopes peuvent être utilisés. Cette méthode est utilisée partout en France. Les couveurs ou jeunes sont dénombrés lors de comptage global soit nid par nid.

#### **Visites de terrain :**

Des équipes de naturalistes se rendent directement sur les sites pour dénombrer les nids et estimer l'effectif nicheur (Scher et al., 2024). Cette méthode est largement pratiquée en Méditerranée, en Bretagne ainsi que dans les Hauts-de-France pour les gravelots. Dans le cadre des comptages à pied, l'observateur recense les nids actifs (présence d'œufs, apports de matériaux récents et coupe du nid bien nette mais vide). Pour les grandes colonies (goéland leucophaea), une marque (papier, pâte alimentaire...) peut être déposée dans les nids pour éviter les doubles comptages.

#### **Utilisation d'une cache :**

L'observateur se déplace au plus près des colonies dans une cache qui lui permet d'avoir une vue plus précise sur les oiseaux. Cette approche est particulièrement utilisée pour le comptage des poussins par classes d'âges (Scher et al., 2024).

### 2. Méthodes photographiques

#### **Prise de photo du site :**

Des photographies permettent de cartographier les colonies et de compter les individus ou les nids. Cette méthode est utilisée pour estimer le nombre de nids quand les effectifs sont importants, difficiles à estimer lors d'un comptage visuel (Mouette tridactyle au cap Blanc-Nez). Les photos sont ensuite traitées sur logiciel ou chaque couple est pointé pour obtenir une estimation fiable.

#### **Pose de piège photo :**

La pose de piège photo en fonction « time laps » permet de suivre l'évolution de la nichée tout au long de la saison de nidification et d'identifier les sources de dérangement et les causes d'échec. Cette méthode est notamment utilisée en Bretagne, Normandie et dans les hauts-de-France pour suivre les nids de gravelots.

#### **Utilisation de photos comme support :**

En falaise, le pointage et la numérotation des sites apparemment occupés/nids sur les photographies (papier/numérique) permet de suivre la nidification lors des différents passages et de contrôler la présence d'un éventuel poussin. Cette méthode, utilisée dans le Pas-de-Calais pour le Fulmar boréal ou pour les alcidés, Mouette tridactyle et Cormoran huppé en Bretagne permet un suivi nid par nid tout au long de la saison de nidification. La séquence de terrain commence par l'observation des oiseaux sur les corniches, puis une fois les nids ou les oiseaux en position apparente d'incubation identifiés, on recherche la présence d'œuf(s) ou de poussin(s).

### **3. Inventaires par échantillonnage**

L'objectif de cette méthode est d'estimer la densité de population sur de larges zones ou lors de conditions d'observation mauvaises (végétation trop importante).

#### **Distance sampling :**

Cette méthode consiste à parcourir un ou plusieurs transects. Les observateurs comptabilisent les couveurs/nids détectés en parcourant les(s) transect(s) et relèvent la distance perpendiculaire du transect aux nids (*Barbraud & Gélinaud, 2005*). La méthode de distance sampling vise à réduire le biais de détection par l'estimation de la densité des objets à recenser (NAO par exemple), en modélisant une probabilité de détection en fonction de la distance au point d'observation (*Buckland et al., 2001*). En connaissant la superficie de la zone d'étude, l'estimation des effectifs est dérivée à partir de l'estimation de la densité.

#### **Echantillonnage de la superficie de prospection :**

Un échantillonnage de la surface à prospector est réalisé afin de diminuer le temps de prospection. Cette méthode est notamment utilisée pour estimer la production des sites trop étendus (falaise). Le suivi des couples puis du nombre de jeunes est réalisé sur des pans de falaises sur plusieurs secteurs échantillons afin de donner des indications sur l'état de santé de la colonie.

Le protocole d'inventaire des espèces d'oiseaux marins est défini de façon à rendre compte de l'effectif reproducteur et de la production en jeunes. La période et la fréquence des passages sont définies selon les caractéristiques écologiques de l'espèce, et selon un compromis entre effort d'échantillonnage et limitation de la présence humaine sur le site (*Cadiou & Vives, 2006*).

## **➤ B. Méthodologie(s) associée(s) à chaque espèce**

Un protocole standardisé pour chaque espèce suivie a été déterminé par le GISOM et présenté dans un document intitulé « Méthodes de suivi des colonies d'oiseaux marins : dénombrement de l'effectif nicheur et suivi de la production de jeune » publié en 2020 sur le site internet [www.oiseaux-marins.org](http://www.oiseaux-marins.org).<sup>1</sup>

Ce document vise à apporter des préconisations à l'ensemble des structures en charge des relevés pour estimer les effectifs en intégrant une méthode similaire pour permettre les comparaisons inter-annuelles et inter-sites.

Concernant les gravelots, le protocole a été défini par un collège d'associations réalisant régulièrement des suivis. (*Potet et al., 2022*).

Le tableau suivant présente les méthodologies d'inventaires des 12 espèces marines nicheuses sur les sites étudiés dans le cadre de TRIDA. Les méthodes sont détaillées dans le chapitre précédent. L'évaluation des moyens humains est basée sur les sites décrits en partie 2 « Présentation des habitats ».

1 <https://oiseaux-marins.org/accueil/productions/documents/135-522/protocole--suivi-des-colonies-doiseaux-marins--denombrement-de-leffectif-nicheur-et-suivi-de-la-production-en-jeunes>

Espèce	Protocole	Méthode	Période	Détail	Moyens humains
Grand Gravelot	Recensement des couples nicheurs	Comptage direct sur les colonies de reproduction : visites de terrain	Mai et Juin	Un transect pédestre/mois	1 personne 4h / passage
	Recensement du nombre de jeunes		Avril à Août	2 relevés/ semaine dès la découverte du nid jusqu'à l'éclosion  Les nids sont géolocalisés, numérotés puis contrôlés à chaque visite	1 personne 4h / passage
Guillemot de Troïl/Pingouin torda	Recensement des couples nicheurs	Comptage direct sur les colonies de reproduction : observation à distance/ utilisation de photos comme support	Mai et Juin	5 à 10 relevés avec, ou pas (selon les falaises), numérotation des sites de reproduction	1 à 2 personnes 2 à 4 h/passage
	Recensement du nombre de jeunes		Avril à Juin	10-12 relevés hebdomadaires avec numérotation des sites, et avec notation des classes d'âge des poussins	1 à 2 personnes 2 à 4 h/passage
Cormoran huppé	Recensement des couples nicheurs	Comptage direct sur les colonies de reproduction : observation à distance/ utilisation de photos comme support	Mars à Mai	Un passage hebdomadaire quand les premiers nids élaborés sont observés	1 à 2 personnes 2 à 4 h/passage
	Recensement du nombre de jeunes		Mai à Juillet	Un passage hebdomadaire pour contrôler les nids élaborés et détecter la présence d'œufs/jeunes, avec notation des classes d'âge	1 à 2 personnes 2 à 4 h/passage

Espèce	Protocole	Méthode	Période	Détail	Moyens humains
Mouette tridactyle	Recensement des couples nicheurs	Comptage direct sur les colonies de reproduction : observation à distance/ utilisation de photos comme support	Mai et Juin	Un passage hebdomadaire quand les premiers nids élaborés sont observés	1 à 2 personnes / secteur 2 à 4 h / passage
	Recensement du nombre de jeunes		Juin à Août	Un passage hebdomadaire pour contrôler les nids élaborés et détecter la présence d'œufs/jeunes, avec notation des classes d'âge	1 à 2 personnes / secteur 2 à 4 h / passage
Mouette rieuse Mouette mélanocéphale	Recensement des couples nicheurs	Comptage direct sur les colonies de reproduction : observation à distance	Fin avril à Mai	Comptage global de la colonie. Deux relevés pour estimer le nombre maximum de couveurs	1 à 2 personnes 2 à 4 h/passage
	Recensement du nombre de jeunes		Juin à début Juillet	Comptage global de la colonie. Deux relevés pour estimer le nombre maximum de jeunes	1 à 2 personnes 2 à 4 h/passage
Sterne caugek	Recensement des couples nicheurs	Comptage direct sur les colonies de reproduction : observation à distance	Mai à Juin	Comptage global de la colonie : 1 passage hebdomadaire	1 à 2 personnes 2 à 4 h/passage
	Recensement du nombre de jeunes		Juillet à Août	1 passage hebdomadaire	1 à 2 personnes 2 à 4 h/passage

Espèce	Protocole	Méthode	Période	Détail	Moyens humains
Sterne pierregarin	Recensement des couples nicheurs	Comptage direct sur les colonies de reproduction : observation à distance	Fin avril à Mai	Comptage global de la colonie. Deux relevés pour estimer le nombre maximum de couveurs	1 personne/4 h par passage
	Recensement des couples nicheurs	Distance sampling		Uniquement sur la dune aux sternes : deux relevés pour mesurer la distance (télémètre) de chaque nid depuis un transect effectué en voiture sur une route située au centre de la colonie (absence de nidification sur la route)	2 personnes/4 h par passage
	Recensement du nombre de jeunes	Comptage direct sur les colonies de reproduction : observation à distance	Juin à Juillet	Un relevé 3 semaines après l'observation de la première éclosion puis tous les 15 jours. Distinction des classes d'âges de jeunes pour retenir les jeunes produits	1 personne/4 h par passage
Goéland argenté, brun, marin	Recensement des couples nicheurs	Comptage direct sur les colonies de reproduction : observation à distance depuis des points hauts/ utilisation de photos comme support	Mai	Les observations à distance se font au cours d'un relevé depuis des points hauts, et peuvent être complétées par des observations depuis la rue. Les nids sont géolocalisés, numérotés et codés (1 : visible 0 : peu visible)	3 jours/1 personne
	Recensement du nombre de jeunes		Juillet	Les nids au codes 1 sont contrôlés lors de 2 relevés pour estimer le nombre de jeunes	3 jours/1 personne

**Tableau 1** : Méthodologies d'inventaire des 12 espèces marines nicheuses dans les sites suivis

## ➤ C. Paramètres et données relevées

Au cours des passages sur les sites, les ornithologues relèvent certaines données leur permettant d'estimer les effectifs de la population nicheuse et le nombre de jeunes. Elles sont essentielles pour évaluer l'état de conservation de la population, l'efficacité des éventuelles mesures de protection ainsi qu'identifier les causes d'échec. Le [tableau 2](#) liste les données recueillies généralement pour l'ensemble des 12 espèces d'oiseaux marins étudiées dans le cadre du projet TRIDA. Les données recueillies permettent d'évaluer l'effectif reproducteur, la production (nombre moyen de jeunes à l'envol par couple) et le succès de la reproduction (% de couples ayant élevé au moins 1 jeune à l'envol). Pour les espèces avec une période de ponte très étalée, les effectifs nicheurs et la production en jeunes sont évalués en simultané tout au long du suivi (exemple du Cormoran huppé versus Fulmar boréal).

Il est à noter que selon les colonies et/ou les espèces le suivi des effectifs nicheurs peut être évalué par le décompte global des nids (effectif global à l'échelle de la colonie), ou via le suivi temporel et individuel du nid depuis sa construction jusqu'à l'envol des jeunes à l'aide d'une cartographie précise de l'emplacement de chaque nid.

-	Effectif reproducteur	Nombre de jeunes
<b>Données relevées</b>	Nombre de : - couples - nids - familles - individus isolés - individus non nicheurs  Indice de reproduction (position de l'oiseau, nid prêt à recevoir une ponte)  Individu présent sur un site propice à la nidification (cas des espèces sans construction de nid)	Taux de succès et productivité par nid : - statut du nid (réussite / échec / incertain) - causes d'échec si connues (œufs clairs, conditions météorologiques : intempéries ou fortes chaleurs, prédation, dérangement, etc.) - nombre d'œufs pondus - nombre de poussins éclos par nid - nombre de jeunes à l'envol (âge des poussins)
<b>Données générales</b>	Conditions de comptage (météo et dérangement) - département – commune – coordonnées GPS - présence / absence protection, type de protection – date – espèce - effets de pose d'enclos - présence d'individus bagués dans le couple	

**Tableau 2 :** Données relevées lors des inventaires.

La distinction des individus couveurs des non couveurs se fait lors de l'observation de l'adulte en position apparente d'incubation sur un nid élaboré. Les ébauches de nid ne sont pas incluses dans le bilan de l'effectif nicheur. Dans le cas des laridés et des sternes, les individus « couveurs » ont le corps partiellement masqué (car dans une dépression), l'allure aplatie. Ils ont queue pointée vers le haut, en position très anguleuse, le corps élargi et, principalement chez les sternes, aucun matériau n'est visible. A l'inverse, un oiseau au repos a généralement un corps plus visible et la queue généralement moins relevée. Quel que soit l'individu observé, la présence de substrats bosselés pourrait engendrer une mauvaise interprétation du comportement de couveur. Enfin, de manière générale, les observateurs doivent se munir d'une paire de jumelles et d'une longue-vue.

L'estimation de l'effectif des couples nicheurs et des jeunes à l'envol est ensuite produite à partir d'indices et d'estimateurs. Les [tableau 3](#) et [tableau 4](#) présentent et synthétisent les indicateurs et les indices utilisés pour les 12 espèces étudiées dans le projet TRIDA.

<b>Grand Gravelot</b>	<b>Nombre de couples (min-max)</b>	<b>Min</b> = Couple + Nid + Famille <b>Max</b> = Couple + Nid + Famille + Individus isolés
<b>Guillemot de Troïl, Pingouin torda</b>	<b>Site Apparement Occupé (SAO(min-max))</b>	<b>Min</b> = Somme des couples avec œuf ou poussin vu <b>Max</b> = Somme des couples avec œuf ou poussin vu + ceux pour lesquels il y a des doutes
	<b>Site Actif (SA)<sup>1</sup></b>	<b>SA</b> = a + b + c
<b>Cormoran huppé, Mouette tridactyle, Mouette rieuse, Mouette mélanocéphale, Goéland brun, Goéland argenté, Goéland marin</b>	<b>Nid Apparement Occupé (NAO)</b>	<b>NAO</b> = Somme des nids élaborés
<b>Mouette rieuse, Mouette mélanocéphale</b>		<b>NAO</b> = Somme des individus x 0,5 ou 0,7 (Yésou & Isenmann 2001, in GISOM 2010) ou somme des nids observés (méthode utilisée par EDEN 62)
<b>Mouette rieuse, Mouette mélanocéphale, Goéland brun, Goéland argenté, Goéland marin, Sterne caugek, Sterne pierregarin</b>	<b>Nid actif (NA)</b>	<b>NA</b> = Somme des nids avec indice de reproduction

**Tableau 3:** Estimateurs retenus pour évaluer l'effectif nicheur de chaque espèce (GISOM, 2022 ; Potet et al., 2022).

1 **a** = adulte(s) avec œuf ; **b** = adulte(s) avec poussin (ou, plus rarement, avec poussin laissé seul), **c** = adulte(s) en position apparente d'incubation (« couveurs »), **d** = couples sur un site jugé en mesure de recevoir un œuf ou **e** = individu seul, au repos ou observant les sites voisins.

Grand Gravelot, Mouette rieuse, Mouette mélanocéphale, Goéland brun, Goéland argenté, Goéland marin	<b>NBJ</b>	<b>NBJ</b> = Nombre de jeunes effectivement volants + Nombre de poussins potentiellement produits	-
Pour les 12 espèces (hors Grand Gravelot)	<b>PROD</b>	<b>PROD</b> = NBJ / NBC	<b>NBJ</b> = Nombre de jeunes à l'envol  <b>NBC</b> = Nombre de couples = <b>NAO, SAO, NA</b>
Guillemot de Troïl, Pingouin torda	<b>PROD (min-max)</b>	<b>PROD (min-max)</b> = PRODmin ; PRODmax *  (avec : PRODmin = NBJmin / NBCmax et PRODmax = NBJmax / NBCmin )	NBJmin = P3 ;  NBJmax = P3 + certains P2-P1 ;  NBCmin = a + b + c ;  NBCmax = a + b + c + d
Cormoran huppé			NBJmin = G+F ;  NBJmax = G+F+E+D+C+B+A ;  NBCmin = NAOmin ;  NBCmax = NAOmax
Mouette tridactyle			NBJmin = F+E ;  NBJmax = F+E+D+C+B+A ;  NBCmin = NAOmin ;  NBCmax = NAOmax
Mouette rieuse, Mouette mélanocéphale, Goéland brun, Goéland argenté, Goéland marin, Sterne caugek, Sterne pierregarin			NBJmin = JV+GP ;  NBJmax = JV+GP+PM+PP ;  NBCmin = NAOmin ;  NBCmax = NAOmax

**Tableau 4:** Estimateurs retenus pour évaluer la production en jeunes de chaque espèce. Les critères pour estimer l'âge des poussins sont précisés dans le Tableau 5 (GISOM, 2022 ; Potet et al., 2022).

Pour certains estimateurs, le nombre de poussins pour chaque classe d'âge est nécessaire pour le calcul. Le [tableau 5](#) présente les critères qui permettent de classer les poussins dans chaque catégorie.

Guillemot de Troïl, Pingouin torda	Cormoran huppé	Mouette tridactyle	Mouette rieuse et mélanocéphale	Goéland brun, argenté et marin <sup>1</sup>	Sternes caugek, et pierregarin <sup>2</sup>
<p><b>PP :</b> (1 à 7 jours) Petit poussin en duvet, d'abord couvé sous la plaque incubatrice, puis sous l'aile du parent. Le premier duvet donne au poussin un aspect caractéristique de plumage en brosse.</p> <p><b>PM :</b> (8 à 15 jours), Apparition progressive des plumes (8 à 15 jours), excepté sur la tête et le cou. Le masque noir et blanc au niveau de l'œil commence à être visible.</p>	<p><b>Z (stade 0) :</b> (Moins d'un jour) À l'éclosion</p> <p><b>A (stade 1) :</b> (quelques jours), poussin nu pas de duvet</p> <p><b>B (stade 2) :</b> (2 à 7 jours) Apparition du duvet, couverture non uniforme sur le corps</p> <p><b>C (stade 3) :</b> (7 à 15 jours) Duvet court sur le corps, aile en moignon et tête nue</p> <p><b>D (stade 4) :</b> (16 à 22 jours) Duvet gris sur l'ensemble du corps, tête comprise, les fourreaux des rémiges primaires sont apparents</p>	<p><b>A :</b> (1 à 7 jours) Boule de duvet, poussin généralement couvé par l'adulte</p> <p><b>B :</b> (7 à 14 jours) poussin en duvet, avec fourreaux des couvertures alaires et des rémiges primaires plus ou moins ouverts, donnant un aspect ponctué de noir</p> <p><b>C :</b> (14 à 21 jours) aspect propre des ailes, avec net contraste entre plumes grises et noires et un peu de duvet, mais pointe des rémiges primaires ne dépassant pas les rémiges secondaires, aile pliée</p>	<p><b>PP :</b> (1-3 jours) poussin en duvet avec diamant</p> <p>(4-6 jours) poussin en duvet sans diamant</p> <p><b>PM :</b> (7-8 jours) poussin en duvet commençant sa mue sur le ventre</p> <p>(9-14 jours) poussin avec le ventre totalement emplumé (ventre blanc)</p> <p><b>GP :</b> (15-21 jours) poussin avec développement des plumes brunes sur la tête</p> <p><b>JV :</b> (&gt; 21 jours) Poussin presque totalement en plumes</p>	<p><b>PP :</b> (1 à 12 jours) Tout en duvet (environ 1 à 10<sup>ne</sup> jours) – le poussin reste dans le nid moins d'une semaine puis devient plus mobile</p> <p>– le diamant sur le bec disparaît vers 6 jours</p> <p><b>PM :</b> (12 à 18 jours) Avec premières plumes visibles (environ 10<sup>ne</sup> à 20<sup>ne</sup> jours) – les fourreaux des rémiges primaires commencent à être plus ou moins visibles à distance vers 11-12 jours et s'ouvrent vers 18 jours puis les rémiges mesurent 1 à 3 cm vers 20 jours</p>	<p><b>PP :</b> (1 à 9 jours) 1 (0-1 jour) = fraîchement éclos, pattes courtes et grosses, diamant présent sur le bec, menton noir</p> <p>2A (2-5 jours) = diamant disparu, pattes plus longues, plus fines entre le pied et l'articulation, pas de fourreau alaire</p> <p>2B (6-9 jours) = fourreaux alaires visibles mais encore fermés, menton noir pratiquement disparu</p> <p><b>PM :</b> (8 à 15 jours) 3A (8-12 jours) = ouverture des fourreaux alaires</p> <p>3B (12-15 jours) = apparition des rectrices, mais moins de 6 mm de long (pas de blanc visible), pas de plumes noires visibles sur la nuque</p>

1 Une représentation chronologique des critères permettant de catégoriser les poussins selon leur âge est présenté dans l'Annexe 1

2 Une représentation chronologique des critères permettant de catégoriser les poussins selon leur âge est présenté dans l'Annexe 2

Guillemot de Troïl, Pingouin torda	Cormoran huppé	Mouette tridactyle	Mouette rieuse et mélanocéphale	Goéland brun, argenté et marin	Sternes caugek, et pierregarin
<p><b>GP :</b> (Plus de 15 jours), Jeune bien emplumé, proche de l'envol (plus de 15 jours), avec plumage noir et blanc bien contrasté et masque noir bien net au niveau de l'œil.</p>	<p><b>E (stade 5) :</b> (23 à 31 jours) Duvet dense, les rémiges commencent à sortir des fourreaux, les fourreaux des rectrices sortent <b>F (stade 6) :</b> (32 à 38 jours) rémiges bien visibles, les rectrices sortent. L'oiseau atteint sa taille adulte <b>G (stade 7) :</b> (38 à 50 jours) Les plumes de vols (rémiges, rectrices) sont en fin de pousse, les plumes de contours remplacent le duvet, l'oiseau apprend à voler.</p>	<p><b>D :</b> (21 à 28 jours) Plumes bien développées et duvet sur la tête et le ventre <b>E :</b> (28 à 35 jours) Aspect propre de la tête, encore du duvet sur le ventre, la pointe de l'aile atteint approximativement l'extrémité de la queue <b>F :</b> (35 à 42 jours) Grand jeune, potentiellement ou effectivement volant, généralement plus aucune touffe de duvet, la pointe de l'aile dépasse l'extrémité de la queue d'au moins 1-2 cm environ</p>		<p><b>GP :</b> (19 à 35 jours) Avec des ailes encore trop courtes pour voler (environ 20ne à 35 jours) – la croissance du tarse est achevée vers 3 semaines (donc même hauteur sur pattes que les adultes) – les rectrices émergent du duvet qui masque les fourreaux vers 24-25 jours – les plumes apparaissent sur la tête vers 30 jours <b>JV :</b> (&gt;35 jours) potentiellement ou effectivement volant (supérieur à 35 jours) – la tête est entièrement emplumée vers 35 jours, puis la perte du duvet sur le sommet du crâne (et les flancs) est progressive – la pointe des ailes dépasse l'extrémité de la queue – l'envol se produit généralement vers 6 à 8 semaines</p>	<p><b>GP :</b> (15 à 23 jours) 4A (15-18 jours) = rectrices &gt;6 mm (blanc visible), mais toujours avec le duvet au bout, quelques mouchetures noires visibles dans le duvet de la nuque (poussin en main) 4B (17-23 jours) = plus de duvet à l'extrémité des rectrices, mais toujours présent sur les sus-caudales, le noir apparaît sur la nuque, les plumes du manteau apparaissent, avec quelques extrémités toujours en duvet <b>JV :</b> (21 à 24 jours) 5A (21-25 jours) = nuque noire mouchetée, plus de duvet sur le dos, mais partiellement présent sur les sus-caudales, les plus âgés s'envolent s'ils sont effrayés 5B (³ 24 jours) = jeune bien plumé et volant. duvet présent uniquement sur le frontle front</p>

Tableau 5 : Synthèse des critères observés pour définir l'âge des poussins d'après GISOM (2020).

## IV. Avantages et limites des protocoles de suivis traditionnels

Bien qu'essentiels pour la définition des statuts de conservation et le suivi des populations des oiseaux marins en période de reproduction, ces protocoles et ces estimateurs ont leur propres avantages et inconvénients. Le [tableau 6](#) présente, d'un point de vue général, ces éléments pour chaque période étudiée. Il est cependant à noter que chaque colonie a ses spécificités, et que si un indicateur est difficile voire impossible à quantifier sur un site, il sera potentiellement quantifiable sur un autre site ou pour une autre espèce. Par exemple, il est difficile de réaliser un suivi individuel des jeunes pour le Grand Gravelot à l'estuaire de la Slack, mais cela sera possible pour les nids des cormorans sp., ou encore de certains alcidés. En revanche, la possibilité de suivre ce critère pour les goélands dépendra de la visibilité que les observateurs auront sur les nids selon s'ils se situent sur les bordures du toit ou dans la végétation.

Enfin, une limite largement identifiée dans la littérature est le dérangement que peut occasionner le suivi, même lorsque toutes les précautions sont prises. La sensibilité au dérangement peut varier selon les espèces et les colonies. Par exemple à Sangatte, le Grand Gravelot niche littéralement au milieu des baigneurs sur la plage, tandis qu'aux Hemmes de Marck les ornithologues observent des distances de fuite de plusieurs centaines de mètres ([comm. pers. Poiriez, GON, 2024](#)). Le dérangement amène rarement à des abandons de nids pour cette espèce, contrairement à des espèces plus sensibles : les fulmars boréaux par exemple ont subi des échecs de reproduction à la suite de dérangements par des parapentes au cap Blanc-Nez ([Gallien, 2019](#)) ; les sternes sont sensibles lors de l'installation, et peuvent abandonner le nid ou la colonie pour certains individus ([GISOM, 2022](#)).

Ajoutons aussi que la croissance de la végétation dans les colonies peut vite rendre les comptages problématiques. Par exemple, les colonies mixtes de petits laridés peuvent s'installer sur des îlots végétalisés où il est plus difficile d'obtenir une bonne précision des effectifs.

Les suivis traditionnels à distance, comme en drone par ailleurs, peuvent aussi être rapidement stoppés lorsque la brume de chaleur complique tout comptage, et tout protocole nécessite de choisir des créneaux optimaux de suivi (aube).

D'autres limites peuvent exister, dans le cas de colonies multi-spécifiques avec des poussins qui se ressemblent ou avec des espèces ayant des périodes d'incubation différentes.

Enfin, certains sites présentent des aspects topographiques complexes (anfractuosités, éboulis, etc.) qui cachent véritablement l'observation des oiseaux. Ajoutons à cela la non-accessibilité à certains sites côtiers où il est impossible de réaliser des inventaires (y compris certaines toitures de communes littorales).

Les suivis traditionnels demandent une logistique sur le plan matériel, humain et financier. En réalité, ils sont souvent chronophages et peuvent nécessiter de mobiliser un nombre important de bénévoles pour collecter les données. Parallèlement, ils permettent de sensibiliser et impliquer les différents acteurs dans la conservation des sites et des espèces associées.

Le tableau ci-dessous présente une liste non exhaustive et non circonstanciée d'un large panel de limites et d'avantages que représentent les protocoles d'inventaires terrestres. Pour plus de précision, nous invitons le lecteur à lire le document du GISOM ([GISOM, 2020](#)).

-	Période de ponte et d'incubation	Période d'élevage et d'émancipation des jeunes
<b>Avantages</b>	Connaissance fine de la vie des oiseaux pendant l'incubation si le suivi est quotidien voire quasi quotidien. Souplesse sur la date des passages et peu de contrainte administrative pour les organiser.	Connaissance fine de la vie des oiseaux pendant l'élevage et l'émancipation si le suivi est quotidien voire quasi quotidien
	Possibilité de limiter les dérangements dans le cas de colonies mixtes	
	Surveillance des pressions (prédation, dérangements)	Surveillance des pressions (prédation, dérangements)
<b>Limites</b>	<p>Chronophage</p> <p>Difficulté d'accès ou manque de visibilité (végétation) et dans certains cas attentes des marées à fort coefficient</p> <p>Utilisation de moyens parfois onéreux (bateau ou aéronef), cas des colonies insulaires</p> <p>Les longues présences engendrent parfois un dérangement des colonies selon protocoles et espèces suivies (ex : distance sampling au milieu des colonies de Goélands)</p> <p>Difficulté de recensement dans le cas de colonie plurispécifique où les espèces se ressemblent ou ne nichent pas à la même période</p>	<p>Grande difficulté de réaliser un suivi individuel des nids pour les espèces ayant des poussins nidifuges, comme pour le Grand Gravelot. Bien que difficile, le suivi est cependant possible pour certaines espèces comme la Mouette tridactyle, les cormorans, les alcidés voire les goélands.</p>

**Tableau 6 : Avantages et limites des protocoles**

## V. Conclusion et perspectives

Les suivis coordonnés par le GISOM, les structures associatives et publiques, les gestionnaires d'espaces protégés, permettent de connaître l'évolution des populations d'oiseaux marins et côtiers. Elles délivrent des informations précieuses pour la définition du statut de conservation des espèces de ce groupe.

Les sites et habitats de nidification sont nombreux et hétérogènes. Si certaines espèces se retrouvent spécifiquement dans certains biotopes comme les guillemots, pingouins et fulmars sur les falaises rocheuses, d'autres en revanche sont plus opportunistes, comme le Grand Gravelot et la Sterne pierregarin. Pour ces raisons, les protocoles de suivis ont été pensés en fonction de l'écologie de l'espèce, et sont adaptés aux spécificités des contextes locaux.

Selon les espèces, l'effectif des couples nicheurs (NBC) est estimé à partir d'une unité de recensement variable selon les espèces, SAO, NAO, SA, NA (GISOM, 2020). Dès les premières éclosions, un suivi précis des colonies est nécessaire pour comptabiliser les jeunes (NBJ). A l'issue des suivis, le rapport entre le nombre de jeunes (NBJ) et le nombre de couples (NBC) permet d'obtenir la production (PROD). (GISOM, 2020).

Les protocoles traditionnellement utilisés pour le suivi des populations d'oiseaux marins et côtiers en période de reproduction comportent de nombreux avantages. En effet, ils permettent l'acquisition d'une connaissance fine des espèces et des milieux dans lesquels elles évoluent (GISOM, 2022). Au-delà des données concernant la présence et la reproduction des oiseaux suivis, de nombreuses informations sont collectées lors de ces passages. On peut citer par exemple le dérangement, la prédation (Townes et al., 2011), les conditions météorologiques (Dunnet et al., 1990), ou encore la présence d'autres espèces. Cet apport de connaissance est précieux dans le cadre de suivis dont l'objectif principal est la conservation des espèces.

Cependant, même avec toute la rigueur dont font preuve les experts mobilisés, il peut arriver que l'estimation des couples nicheurs ou des poussins soit sous-estimée ou surestimée selon le protocole, à cause de différents facteurs : le manque de visibilité du aux affleurements de falaises irréguliers ou à la végétation trop couvrante, les difficultés d'accès des sites suivis, le comportement nidifuge des poussins qui augmente les erreurs d'estimation. Les experts peuvent rencontrer d'autres limites n'influant pas sur l'estimation des couples, tels que, le temps important que prennent ces suivis ou l'utilisation de matériels parfois onéreux (bateau pour les comptages sur les colonies insulaires). Enfin, il peut arriver, même avec toutes précautions nécessaires, que ces inventaires occasionnent un dérangement et stressent la colonie recensée (Chabot et al., 2015 ; Rush et al., 2018).

C'est pourquoi, des méthodes complémentaires sont étudiées depuis quelques années comme l'outil drone, utilisé dans certains contextes pour réaliser le suivi de colonies. La question peut alors se poser de l'efficacité réelle de l'apport du drone dans le comptage et le suivi de colonies, par rapport aux comptages réalisés selon les contextes et les espèces.

Des premiers éléments de réponse à cette question sont discutés dans le chapitre 3 du présent corpus. Les résultats des tests réalisés dans le cadre du projet TRIDA donneront lieu, quant à eux, à un guide pour une utilisation efficace et éthique de cette technologie.

## VI. Références

- Blackmer, A. L., Ackerman, J. T., & Nevitt, G. A. (2004). Effects of investigator disturbance on hatching success and nest-site fidelity in a long-lived seabird, Leach's storm-petrel. *Biological Conservation*, 116(1), 141-148.
- Biotope, (2023). Suivi des goélands nicheurs en milieu urbain dans la Ville de Dunkerque en 2023. Ville de Dunkerque, 66 p.
- Buckland, S.T., D.R. Anderson, K.P. Burnham, J.L. Laake, D.L. Borchers & L. Thimas. 2001. *Introduction to Distance Sampling: Estimating Abundance of Biological Populations*. Oxford University Press. Oxford.
- Cadiou B. & Vives G. (2006). Concevoir un planning opérationnel pour optimiser un suivi ornithologique... *Espaces Naturels*, 16, 16-17.
- Cadiou B. et les coordinateurs régionaux, coordinateurs départementaux et coordinateurs espèce. (2014). Cinquième recensement national des oiseaux marins nicheurs en France métropolitaine : bilan final 2009-2012. Rapport Gisom & AAMP, Brest, 75 p.
- Cadiou B. & Mahéo H. (2016). Recueil méthodologique des suivis ornithologiques réalisés sur la Réserve Naturelle Nationale d'Iroise. Rapport Bretagne Vivante, RNN Iroise, PNMI, 47 p.
- Cadiou B., Jacob Y., Provost P., Quénot F. & Février Y. (2023). Bilan de la saison de reproduction des oiseaux marins en Bretagne en 2022. Rapport de l'Observatoire régional de l'avifaune de Bretagne, Brest, 47 p.
- CBNBL, GON, CEN NPDC, (2016). 310007284, Estuaire de la Slack. - INPN, SPN-MNHN Paris, 20P. <https://inpn.mnhn.fr/zone/znieff/310007284.pdf>
- CBNBL, GON, CEN NPDC, (2017) 310013302, Anciennes ballastières de Conchil-le-temple. INPN, SPN-MNHN Paris, 17P. <https://inpn.mnhn.fr/zone/znieff/310013302.pdf>
- Acherar, M, Franck Cazin, F., Lepart J., Romani M., Rufay X. (2009). Gestion et restauration des zones humides littorales - Les feuilles thématiques du Conservatoire des Espaces Naturels Languedoc-Roussillon du Languedoc - Roussillon - CEN LR, 12 p.
- Barbraud C. & Gélinaud G. (2005). Estimating the size of large gull colonies taking into account nest detection probability. *Waterbirds*, 28, 53-60.
- Chabot, D., & Bird, D. M. (2015). Wildlife research and management methods in the 21st century: Where do unmanned aircraft fit in?. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 3(4), 137-155.
- Coulson, J. C. (2016). A review of philopatry in seabirds and comparisons with other waterbird species. *Waterbirds*, 39(3), 229-240.
- Croxall, J. P., Butchart, S. H., Lascelles, B. E. N., Stattersfield, A. J., Sullivan, B. E. N., Symes, A., & Taylor, P. H. I. L. (2012). Seabird conservation status, threats and priority actions: a global assessment. *Bird Conservation International*, 22(1), 1-34.
- Cury, P. M., Boyd, I. L., Bonhommeau, S., Anker-Nilssen, T., Crawford, R. J., Furness, R. W., ... & Sydeman, W. J. (2011). Global seabird response to forage fish depletion—one-third for the birds. *Science*, 334(6063), 1703-1706.
- Debout, G. (2013). Liste Rouge des oiseaux de Haute-Normandie. Caen, 51 p.
- Dias, M. P., Martin, R., Pearmain, E. J., Burfield, I. J., Small, C., Phillips, R. A., ... & Croxall, J. P. (2019). Threats to seabirds: a global assessment. *Biological Conservation*, 237, 525-537.
- DREAL Bretagne. (2023). Réserve Naturelle Nationale des Sept-Îles une aire protégée résolument marine. Dunnet, G. M., & Heubeck, M. (1995). The monitoring of breeding seabirds and eiders. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh, Section B: Biological Sciences*, 103, 137-164.
- Février, Y (2020). Recensement National des Oiseaux Marins Nicheurs de France Métropolitaine - Bilan 2020 en Côtes-d'Armor. Rapport GEOCA, 9 p.
- Furness, R. W., & Tasker, M. L. (2000). Seabird-fishery interactions: quantifying the sensitivity of seabirds to reductions in sandeel abundance, and identification of key areas for sensitive seabirds in the North Sea. *Marine Ecology Progress Series*, 202, 253-264.
- Furness, R. W., & Camphuysen, K. (1997). Seabirds as monitors of the marine environment. *ICES Journal of Marine Science*, 54(4), 726-737.
- Gallien, F. (2016). Suivi de la mouette tridactyle en période de reproduction sur des colonies témoins de la sous-région marine Manche Mer du Nord. Rapport GONm, 10 p.
- Gallien, F. (2019). Suivi du fulmar boréal en période de reproduction sur des sites témoins des sous-régions marines Manche - Mer du Nord et mers celtiques. Rapport GONm, 9 p.
- Gélinaud, G., Beauflis, M., Créau, Y., David, J., Durier, M., Février, Y., Maout, J. (2023). Liste rouge 2021 des oiseaux nicheurs menacés en Bretagne et responsabilité biologique régionale. Rapport Observatoire Régional de l'Avifaune, Bretagne Vivante, GEOCA, 30 p.
- GISOM (2023). Recensement national des oiseaux marins nicheurs en France hexagonale-Enquête 2020-2022- Présentation générale et méthodologie. Rapport, 151 p.
- GISOM (2022). Méthodes de suivi des colonies d'oiseaux marins : dénombrement de l'effectif nicheur et suivi de la production en jeunes. Rapport, 107 p. Coordination B. Cadiou.

- GONm, (2012). Liste des oiseaux de Basse-Normandie comprenant la liste, rouge des espèces menacées.
- Grémillet, D., Ponchon, A., Paleczny, M., Palomares, M. L. D., Karpouzi, V., & Pauly, D. (2018). Persisting worldwide seabird-fishery competition despite seabird community decline. *Current Biology*, 28(24), 4009-4013.
- Hameau, O. & Roy, C. (2020). Liste rouge régionale des oiseaux nicheurs, de passage et hivernants de Provence-Alpes-Côte d'Azur.
- INPN (2003). FR3110039 - Platier d'Oye - INPN, SPN-MNHN Paris, 11p. <https://inpn.mnhn.fr/docs/natura2000/fdsdpdf/FR3110039.pdf>
- INPN, (2003). FR3110039 - Platier d'Oye, - INPN-MNHN, 11p. <https://inpn.mnhn.fr/docs/natura2000/fdsdpdf/FR3110039.pdf>
- INPN, (2015). FR5412020 - Marais et estuaire de la Seudre, île d'Oléron, INPN-MNHN, 11p. <https://inpn.mnhn.fr/docs/natura2000/fdsdpdf/FR5412020.pdf>
- INPN, (2017a). FR5310095 - Cap d'Erquy-Cap Fréhel, INPN-MNHN, 11p. <https://inpn.mnhn.fr/docs/natura2000/fdsdpdf/FR5310095.pdf>
- INPN, (2017b). FR5300023 - Archipel des Glénan, INPN-MNHN, 14p. <https://inpn.mnhn.fr/docs/natura2000/fdsdpdf/FR5300023.pdf>
- INPN, (2017c). FR5400425 - Ile de Ré : dunes et forêts littorales, INPN-MNHN, 8p. <https://inpn.mnhn.fr/docs/natura2000/fdsdpdf/FR5400425.pdf>
- INPN, (2019). FR5412020 - Marais et estuaire de la Seudre, île d'Oléron, - INPN-MNHN, 11p. <https://inpn.mnhn.fr/docs/natura2000/fdsdpdf/FR5412020.pdf>
- Jacob Y. (Coord.) 2021. Sternes nicheuses 2020 du littoral Manche-Atlantique. Rapport de l'observatoire oiseaux marins et côtiers de l'office français de la biodiversité et de l'observatoire régional de l'avifaune de Bretagne. Brest, 63 p.
- Jacob Y. (Coord.) 2023. Sternes nicheuses 2022 du littoral Manche-Atlantique. Rapport de l'observatoire oiseaux marins et côtiers de l'office français de la biodiversité et de l'observatoire régional de l'avifaune en Bretagne. Bretagne Vivante, Brest, 58 p.
- Jacob Y., Delmaire A. & Arnau A. (2024). Schéma régional de conservation et de restauration des sites de nidification des sternes en Bretagne. Appel à initiative « biodiversité marine » 2020 de l'Agence de l'eau Lorie Bretagne. Bretagne Vivante, Brest, 125 p.
- Lane J.V., Jeglinski J.W., Avery-Gomm S., Ballstaedt E., Banyard A.C., Barychka T., Brown I.H., Brugger B., Burt T.V., Careen N., Castenschiold J.H.F., Christensen-Dalsgaard S., Clifford S., Collins S.M., Cunningham E., Danielsen J., Daunt F., D'Entremont K.J.N., Doiron P., Duffy S., English M.D., Falchieri M., Giacinti J., Gjerset B., Granstad S., Grémillet D., Guillemette M., Hallgrímsson G.T., Hamer K.C., Hammer S., Harrison K., Hart J.D., Hatsell C., Humpidge R., James J., Jenkinson A., Jessopp M., Jones M.E.B., Lair S., Lewis T., Malinowska A.A., McCluskie A., McPhail G., Moe B., Montevecchi W.A., Morgan G., Nichol C., Nisbet C., Olsen B., Provencher J., Provost P., Purdie A., Rail J.-F., Robertson G., Seyer Y., Sheddan M., Soos C., Stephens N., Strøm H., Svansson V., Tierney T.D., Tyler G., Wade T., Wanless S., Ward C.R.E., Wilhelm S.I., Wischnewski S., Wright L.J., Zonfrillo B., Matthiopoulos J. & Votier S.C. 2024. High pathogenicity avian influenza (H5N1) in Northern Gannets: Global spread, clinical signs, and demographic consequences. *Ibis*, 166, 633-650.
- Le Pommelet, E (Coord.) 2022. Document d'objectifs des sites Natura 2000 « Etang de Mauguio » (Hérault) - ZSC FR 9101408 et ZPS FR 9112017 – Fiches actions.
- LPO PACA (2019), ZPS Salines de l'Étang de Berre FR9312005, 5p.
- OFB & Ifremer (2020). DCSMM. Disponible sur <https://dcsmm.milieumarinfrance.fr/A-propos>. Consulté en mai 2024.
- Piatt, J. F., Sydeman, W. J., Sydeman, W. J., Piatt, J. F., & Browman, H. I. (2007). Seabirds as indicators of marine ecosystems. *Marine ecology-progress series*, 352, 199-204.
- PNR de la Narbonnaise en Méditerranée. (2010). DOCOB vol 1 Etangs du Narbonnaise, 31p.
- Potet E, Balaguer J.-L. & Poisblaud S. (2021). Stratégie d'actions limicoles nicheurs des hauts de plages. Façade Manche – Mer du Nord ; bilan de l'année 2021 – GONm/GON – CRN, FEADER, AESN – 77 p.
- Potet E, Balaguer J.-L. & Poisblaud S. (2022). Stratégie d'action Limicoles nicheurs des hauts de plages 2021 – 2022- Façade Manche Est – Mer du Nord. Bilan de l'année 2021 – GONm/GON – CRN, FEADER, AESN – 97 p.
- Poitou-Charentes Nature, (2018). Liste rouge du Poitou-Charentes : chapitre Oiseaux nicheurs. Fontaine-le-Comte.
- Pohlmann, A., Stejskal, O., King, J., Bouwhuis, S., Packmor, F., Ballstaedt, E., ... & Harder, T. (2023). Mass mortality among colony-breeding seabirds in the German Wadden Sea in 2022 due to distinct genotypes of HPAIV H5N1 clade 2.3. 4.4 b. *Journal of General Virology*, 104(4), 001834.
- Provost, P. (2015). Plan de gestion de la Réserve Naturelle Nationale des Sept-Iles 2015 – 2024. Rochefort, 256 p.
- Rajpar, M. N., Ozdemir, I., Zakaria, M., Sheryar, S., & Rab, A. (2018). Seabirds as bioindicators of marine ecosystems. In Mikkola H. (Ed.), *Seabirds*, 47-65.
- Rush, G. P., Clarke, L. E., Stone, M., & Wood, M. J. (2018). Can drones count gulls? Minimal disturbance and semiautomated image processing with an unmanned aerial vehicle for colony-nesting seabirds. *Ecology and evolution*, 8(24), 12322-12334.

Scher O., Béchet A., Pin C., Blanchon T., Miller E., Escot F., Tiné R., Jullian R., Olivier F., Clément D., Audevard A., Perrot K., Cramm P., Sadoul N., 2024. Dynamique très positive pour les larolimicoles coloniaux méditerranéens de 2011 à 2021. *Ornithos*, 31 (3) : 113-127.

SEPANSO (2021). *Projet de Rapport d'activités de la RNN du Banc d'Arguin. Réserve Naturelle Banc d'Arguin*, 34 p.

Towns, D. R., Byrd, G. V., Jones, H. P., Rauzon, M. J., Russell, J. C., & Wilcox, C. (2011). Impacts of introduced predators on seabirds. *Seabird islands: ecology, invasion, and restoration*, 56-90.

Tuck, G. N., Polacheck, T., & Bulman, C. M. (2003). Spatio-temporal trends of longline fishing effort in the Southern Ocean and implications for seabird bycatch. *Biological Conservation*, 114(1), 1-27.

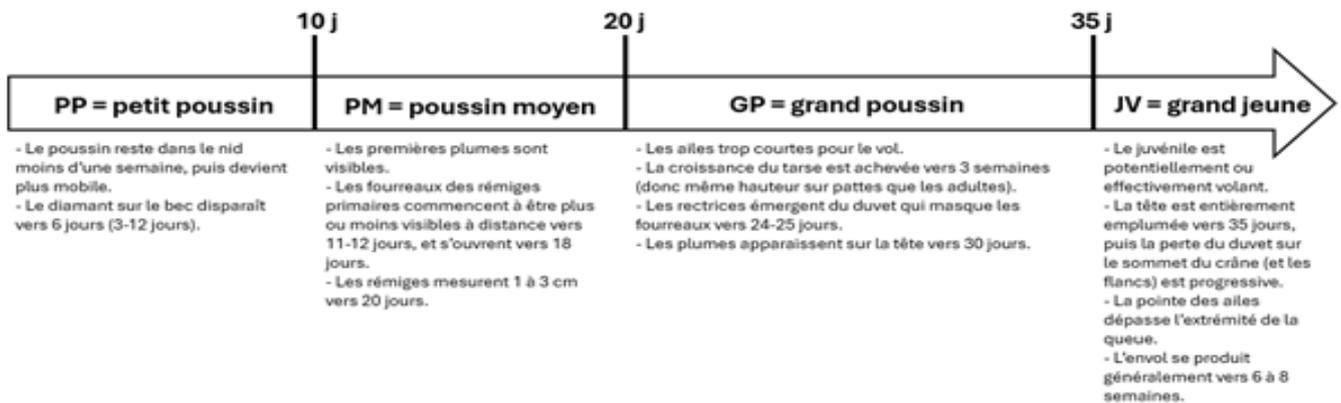
Yésou, P., Mahéo H., Moal G. & Lefeuvre C. (2015) Le Grand Gravelot, nicheur emblématique de l'archipel de Molène (Finistère). *Ornithos* 22-1 : 2-13.

Walsh, P. M., Halley, D. J., Harris, M. P., Del Nevo, A., Sim, I. M. W., & Tasker, M. L. (1995). *Seabird monitoring handbook for Britain and Ireland: a compilation of methods for survey and monitoring of breeding seabirds*. JNCC/RSPB/ITE/Seabird Group.

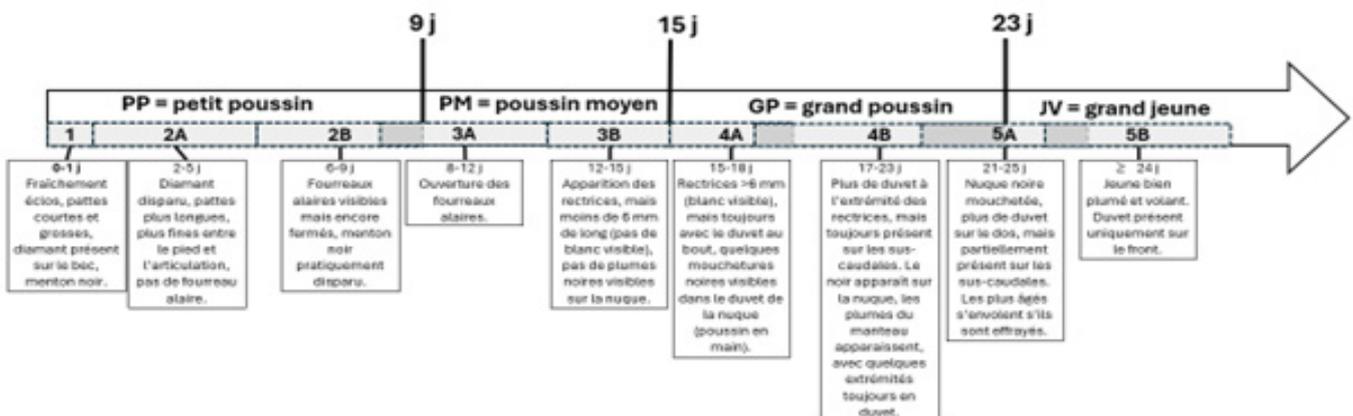


## VII. Annexes

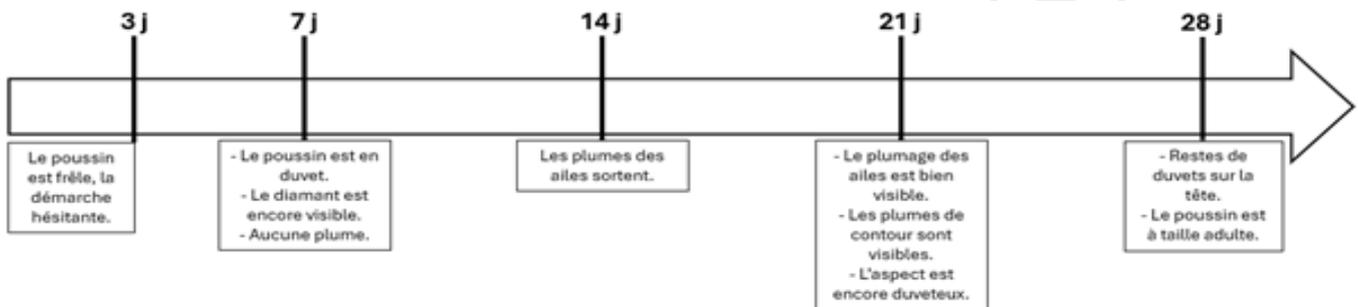
### ➤ Annexe 1 : Estimateurs et critères de classification des poussins des goélands



### ➤ Annexe 2 : Estimateurs et critères de classification des poussins des sternes



## ➤ Annexe 3 : Critères chronologiques de classification des poussins du Grand gravelot



# Intelligence Artificielle pour le Traitement Automatique des Images d'Oiseaux par Drones

S. Ouaidar, G. Bourguin, A. Lewandowski & M. Bouneffa

### Résumé

---

Le suivi par drone du vivant produit un grand nombre de photos analysées généralement de manière manuelle ou semi-automatique. Le caractère fastidieux et chronophage de ces analyses, est une des limites les plus évoquées par les spécialistes de l'environnement.

Grâce à l'émergence d'IA basées sur l'apprentissage automatique profond (« deep learning ») et l'apparition des réseaux de neurones convolutionnels (« Convolutional Neural Network »), nous pouvons aujourd'hui envisager d'automatiser le dénombrement des individus et la reconnaissance des espèces photographiées.

Le dénombrement et la détermination de colonies d'oiseaux présentent cependant un défi, en raison de la densité des regroupements, une taille réduite, et une ressemblance parfois importante entre les espèces.

S'il existe diverses implémentations des architectures standards pour la détection des objets (Object Detection-OD), ces dernières sont en revanche pré-entraînées sur des datasets "généraux". De plus, la détection et le comptage d'oiseaux dans des colonies par des images issues de drones posent des problématiques spécifiques dans le cadre de l'OD. Ces problématiques sont principalement liées au nombre important d'oiseaux par image, et à la résolution et à la taille des images. En conséquence, ces architectures ont besoin d'être adaptées et entraînées sur un dataset spécifique, pour que la détection/ classification des oiseaux suivis par drone soit précise et de qualité.

Le nombre d'images annotées nécessaire à l'entraînement de l'algorithme ne fait pas consensus dans la littérature. Celui-ci est en réalité, fort dépendant du nombre d'espèces considérées, de leur similarité, ou encore de la complexité des environnements dans lesquels les oiseaux évoluent. Les premiers tests réalisés sur la base de dataset « oiseaux » existants, démontrent l'importance de considérer à la fois les critères morphologiques et la classe d'âge des individus, et qu'une des difficultés est que les caractères visibles dépendent de la position de l'oiseau sur la photo. L'ensemble de ces facteurs laisse à penser qu'un dataset comprenant un grand nombre de photos différentes sera nécessaire pour classifier les images, à l'aide d'une analyse d'images à grain fin.

L'analyse d'images à grain fin (Fine Grain Image Analysis, FGIA) vise à créer des modèles capables de reconnaître les parties sémantiques distinctives des oiseaux pour les utiliser dans le processus de classification. La taille minimale de l'oiseau sur une image d'après les 3 datasets étudiés, est d'environ 257 x 232 px, et la taille minimale de l'image est d'environ 468 x 386 px, pour permettre sa classification en utilisant une FGIA.

L'approche envisagée pourrait consister à développer un modèle d'IA hybride basé sur les concepts (Concept-Based Model) et utilisant l'identification des parties. Une ontologie liée aux images annotées sera utilisée pour définir et entraîner un détecteur de concepts basé sur le Deep Learning. De plus, cette ontologie contiendra un ensemble de règles permettant la classification automatique selon un raisonnement logique et explicable du point de vue des ornithologues.

# SOMMAIRE CHAPITRE 5



<b>I. Introduction</b> .....	158
<b>II. Détection et Comptage d'Oiseaux par Drone</b> .....	158
A. Contexte .....	158
B. Systèmes de Détection d'Objets .....	159
1. Architectures .....	160
2. Données et Méthodologie .....	160
3. Problèmes récurrents .....	162
C. Approche TRIDA .....	162
<b>III. Classification d'oiseaux à Grain Fin : FGIC</b> .....	162
A. Approche en DL .....	164
B. Jeux de données existants .....	164
1. Résolutions moyennes .....	165
2. Espèces TRIDA .....	165
3. Variations intra espèce .....	167
4. Annotation des sous-parties .....	168
5. Approche TRIDA .....	169
C. Modèles d'IA existants pour la FGIC .....	169
1. Approches par identification des parties .....	169
2. Approches hybrides .....	170
3. Approche TRIDA .....	170
D. Explicabilité des IA .....	171
<b>IV. Références</b> .....	172



# I. Introduction

Peu de temps après l'introduction des drones pour effectuer des études écologiques, les chercheurs se sont intéressés aux solutions qui permettent le traitement automatisé des images résultantes.

Depuis l'émergence des modèles d'IA basés sur le Deep Learning (Apprentissage profond, DL), et avec l'apparition des Convolutional Neural Networks (Réseaux de neurones convolutionnels, CNN), la recherche en Computer Vision (Vision par ordinateur, CV) a en particulier produit 2 types de travaux traitant de la faune aviaire utiles au projet TRIDA et que nous considérons comme complémentaires.

Le premier type de travaux qui nous intéresse traite de la détection et du comptage d'oiseaux dans des images aériennes, en particulier celles produites par des drones. Dans ces travaux, la problématique principale est de détecter et classifier (reconnaissance de l'espèce) chaque oiseau dans des images qui peuvent en contenir des milliers. L'état de l'art lié à cette problématique sera traité dans la première partie.

Le second type de travaux focalise principalement sur la classification des oiseaux. Dans ces travaux, chaque image ne contient qu'un seul oiseau dont il faut précisément déterminer l'espèce. L'état de l'art lié à cette problématique sera traité dans la seconde partie.

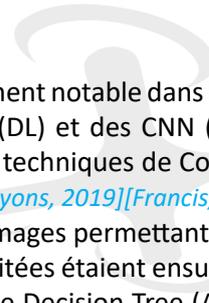
## II. Détection et Comptage d'oiseaux par Drone

Cette section s'intéresse aux solutions informatiques dédiées à la détection et au comptage d'oiseaux dans les images aériennes produites par drone.

### A. Contexte

La littérature contient des travaux traitant des images produites par des avions et des drones. Le projet TRIDA focalise sur les images produites par drones, mais il est à noter que certaines techniques dans le traitement d'images produites par des avions (donc à plus haute altitude) peuvent partiellement aussi inspirer la méthode à développer au sein de TRIDA.

Divers travaux se sont intéressés à la détection et au comptage d'individus correspondants à différentes espèces animales qui ne sont pas des oiseaux. Des travaux se sont par exemple focalisés sur les tortues, les phoques, les dauphins, les ours, les baleines, les antilopes, etc. Si les techniques mises en œuvre peuvent elles aussi inspirer le projet TRIDA, il faut souligner des différences majeures avec la problématique du dénombrement de la faune aviaire. En effet, les autres espèces étudiées ont des individus dont la taille est plus grande que celle des oiseaux. De plus, les oiseaux en colonies ont la particularité de présenter une densité très forte par rapport aux groupements d'autres espèces [Hayes, 2021]. Enfin, il existe une forte ressemblance entre certains individus qui pourtant appartiennent à des espèces d'oiseaux différentes. L'ensemble de ces éléments augmente la complexité du traitement automatisé. C'est pourquoi nous nous focaliserons ici principalement sur les travaux qui se sont intéressés à la détection et au comptage d'oiseaux au sein de colonies.



Enfin, comme il est expliqué par [Hong, 2019], il est à souligner qu'un changement notable dans les approches dédiées à cette problématique est apparu suite à l'avènement du Deep Learning (DL) et des CNN (Convolutional Neural Networks) [Sermanet, 2013]. Les travaux antérieurs mettaient en œuvre des techniques de Computer Vision basées sur la sélection "manuelle" de propriétés caractéristiques dans les images [Lyons, 2019][Francis, 2020]. Ces propriétés étaient extraites grâce à des outils libres ou payants de prétraitement des images permettant d'en filtrer les parties selon les couleurs, la luminosité, les types de formes, etc. Ces images prétraitées étaient ensuite envoyées dans des algorithmes de Machine Learning (Apprentissage automatique, ML) du type Decision Tree (Arbre de décision, DT) ou Random Forest (Forêt aléatoire) pour obtenir une classification.

Grâce au DL et les CNN, les modèles d'IA actuels sont capables d'identifier et extraire automatiquement des caractéristiques beaucoup plus complexes dans les images, ce qui permet de traiter automatiquement des images plus complexes et plus diversifiées tout en obtenant de meilleurs résultats. En conséquence, les travaux les plus récents sont basés sur des techniques utilisant le DL, en particulier la Détection d'Objets (Object Detection, OD) et nous avons concentré notre étude sur ces approches.

## ➤ B. Systèmes de Détection d'Objets

La problématique qui nous intéresse dans cette partie est la détection des oiseaux et le comptage des individus par espèce considérée.

La détection d'un oiseau dans une image est généralement représentée par une bounding box, c'est-à-dire une boîte englobante définie par une position dans l'image et une taille (largeur, hauteur, ou encore 2 coins déterminant les limites de la boîte). Certaines techniques peuvent aussi définir un masque (sémantique) plus précis qu'une bounding box en soulignant la forme exacte de l'oiseau.

Le comptage des oiseaux est dépendant du nombre d'espèces impliquées. Lorsqu'il est connu qu'une seule espèce d'oiseau est présente dans l'image, le dénombrement peut se limiter à compter les bounding boxes. Cependant, lorsque l'étude implique le suivi de plusieurs espèces, chaque oiseau détecté doit être classifié c'est-à-dire qu'il faut identifier l'espèce de l'oiseau présent dans chaque bounding box. Il est ensuite possible de comptabiliser chaque bounding box selon l'espèce contenue pour dénombrer les individus de chaque espèce.

La problématique de la détection et de la classification d'objets dans une image correspond au sous-domaine de recherche en Computer Vision (CV) nommé Object Detection (OD). L'OD a depuis plusieurs années été appliquée dans de nombreux domaines (ingénierie, transports, agriculture, conduite autonome, etc.) [Chen, 2023]. La plupart des travaux récents dédiés aux études de la faune aviaire à partir d'images par drones sont eux-mêmes basés sur l'OD [Kassim, 2020][Hayes, 2021][Kabra, 2022].

Il existe aujourd'hui plusieurs architectures de réseaux pour l'OD devenus des standards. Ces solutions ont été pré-entraînées et évaluées sur des datasets (jeux de données) qui font référence comme COCO [Lin, 2014] et PASCAL-VOC [Everingham, 2010]. Cependant, ces datasets contiennent des exemples avec de nombreuses et diverses classes qui n'ont rien à voir avec les oiseaux (ballon, avion, voiture, etc.). Ainsi, s'il est bien possible de les utiliser pour détecter des oiseaux, il est impossible de différencier les différentes espèces d'oiseaux entre elles. De ce fait, les architectures existantes pour l'OD sont la plupart du temps réutilisées pour effectuer des détections et comptage d'oiseaux, mais elles doivent être adaptées et ré-entraînées avec de nouveaux datasets dédiés à l'application créée.



## 1. Architectures

Les travaux en IA sur l'OD ont produit diverses architectures et implémentations. Sans entrer dans les détails, on peut considérer 2 grandes catégories d'architectures.

Les 2-stages detectors correspondent à des pipelines dont la 1ere partie est nommée region proposal et dont la tâche est de suggérer des zones de l'images susceptibles de contenir des objets cibles (ici les oiseaux), et la 2nde partie est un classifieur (à gros grain) qui a pour tâche d'estimer une classification pour les régions proposées. Les implémentations qui ont été utilisées dans des contextes aux problématiques similaires à TRIDA sont majoritairement Faster R-CNN [Kabra, 2022][Luz-Ricca, 2022][Shanliang, 2022][Hong, 2019], R-CNN [Hong, 2019], R-FCN [Hong, 2019], et Mask-R-CNN [Kassim, 2020].

Les 1-stage detectors sont caractérisés par la mise en œuvre d'une seule passe sur l'image qui suggère en même temps les bounding box et la classification correspondante. Les implémentations qui ont été utilisées dans des contextes aux problématiques similaires à TRIDA sont majoritairement YOLO (v2 & v3) [Hong, 2019], SSD [Shanliang, 2022][Hong, 2019] et Retinanet [Kabra, 2022][Shanliang, 2022][Hayes, 2021][Weinstein, 2021][Hong, 2019].

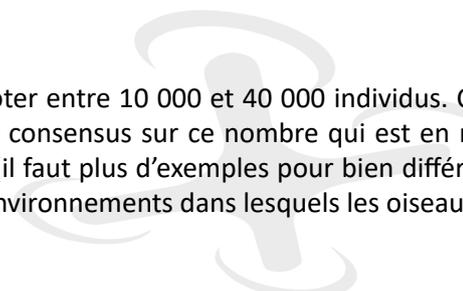
D'une manière générale, les travaux cités ci-avant soulignent que les architectures 2-stages sont plus précises dans leurs détections que les architectures 1-stage. Elles sont cependant aussi plus lentes. L'ensemble des travaux s'accordent sur le fait qu'il est donc nécessaire d'envisager un compromis entre vitesse et précision et que le choix doit être guidé par l'application spécifique en cours de développement (post traitement des images acquises ? systèmes temps réel ? etc).

Il est à noter que les implémentations d'OD mettent en œuvre un (sous-)réseau de neurones pré-entraîné nommé backbone généralement issu des travaux en CV sur la "simple" classification à gros grain (classifier une image dans sa globalité sans OD) et qui sert de feature extractor (extraction automatique de propriétés complexes de l'image). Les architectures pour l'OD citées ci-avant peuvent généralement être mises en œuvre en intégrant des backbones différents (menant à des extractions de features différentes) qui influencent les résultats obtenus par le détecteur. Comme pour l'architecture globale du réseau d'OD, il faut définir un compromis entre vitesse et précision du backbone selon les besoins de l'application. La grande majorité des travaux cités ci-avant ont utilisé avec succès un backbone basé sur Resnet-50. On peut aussi souligner des implémentations avec Inception V2 et Resnet-101 [Hong, 2019].

## 2. Données et Méthodologie

Comme nous l'avons souligné précédemment, il existe aujourd'hui diverses implémentations des architectures standards pour l'OD, mais elles sont pré-entraînées sur des datasets "généraux". Les applications qui nous intéressent sont donc amenées à adapter les implémentations existantes en les réentraînant sur des datasets contenant spécifiquement les espèces d'oiseaux visées par les projets. Il n'existe à notre connaissance pas de dataset standard adapté à n'importe quel projet et le nombre d'espèces d'oiseaux possibles est tellement grand que l'ensemble des travaux existants sont amenés à créer eux-mêmes des datasets spécifiques à leurs besoins (combinant les bonnes espèces visées).

Si les chercheurs ont pu montrer l'intérêt des architectures d'OD pour la détection et le comptage des oiseaux, il faut rappeler qu'entraîner une solution basée sur le DL nécessite la création d'un dataset contenant de très nombreux exemples annotés (des images dans lesquels chaque oiseau présent a été manuellement entouré de sa bounding box et associé à son espèce spécifique). A titre d'exemple, dans [Hong, 2019] les auteurs ont créé un système de détection et de comptage d'oiseaux dans des images issues de drones en considérant 3 classes/espèces différentes : leur solution a utilisé un dataset contenant 113 466 oiseaux annotés.



[Weinstein, 2021] souligne quant à lui qu'il faut en moyenne annoter entre 10 000 et 40 000 individus. Comme on peut le constater, il ne semble pas exister dans l'état de l'art de consensus sur ce nombre qui est en réalité fort dépendant du nombre d'espèces considérées, de leur similarité (il faut plus d'exemples pour bien différencier des espèces visuellement proches), ou encore de la complexité des environnements dans lesquels les oiseaux évoluent (mer, canopée, conditions météorologiques...).

Un autre point à souligner est qu'un dataset dédié à la détection et au comptage d'oiseaux dans des colonies par des images issues de drones pose des problématiques spécifiques dans le cadre de l'OD. En effet, chaque image produite contient généralement beaucoup plus d'objets/oiseaux que dans l'OD "classique". La taille des images est aussi plus conséquente (afin d'avoir une résolution qui permet d'identifier chaque oiseau). De fait, ce type d'images n'est pas adapté aux architectures d'OD existantes et elles ne peuvent en conséquence pas être directement envoyées dans le réseau correspondant. La solution généralement adoptée consiste alors à découper les images produites par les drones en (sous-)tuiles qui correspondent à une sorte de zoom sur les parties de l'image : chaque tuile contient moins d'oiseaux et possède une taille qui permet son traitement efficace dans l'architecture d'OD choisie. Lors du découpage en tuiles, certains oiseaux peuvent être eux-mêmes découpés, et ils se retrouvent alors en 2 sous-parties sur 2 tuiles différentes. Pour pallier ce problème, une technique consiste à créer un chevauchement entre tuiles (overlap), la taille de ce chevauchement étant lié à la taille maximale des oiseaux dans l'image de manière à ce que tout oiseau soit présent en entier dans au moins une des tuiles générées. A titre d'exemple, on peut citer [Kabra, 2022] (tuiles de 640x640px, overlap de 140px), [Hayes, 2021] (tuiles de 500x500 pixels, overlap non indiqué), [Hong, 2019] (tuiles de 600x600px, overlap de 40px). Il est à noter que pour le comptage, les images globales doivent être reconstituées : les positions des bounding box dans chaque tuile doivent être transposées dans le système de coordonnées de l'image globale, et il est nécessaire de supprimer les détections d'oiseaux qui peuvent avoir été détectés en doublon dans l'overlap.

L'ensemble des solutions de l'état de l'art insiste sur l'importance de la taille minimale (en pixels) des oiseaux dans l'image : un oiseau trop petit est difficilement détectable. Cette taille minimale n'est pas toujours précisée mais elle peut être parfois déduite de l'overlap utilisé. La taille d'un oiseau (en pixels) dans l'image est en lien direct avec la résolution des caméras équipées sur le drone et l'altitude/distance à laquelle les images ont été produites. [Kabra, 2022] utilise une taille minimale d'oiseaux de 140px, [Miao, 2022] : 52x56px (images de 2018) et 90x106px (images de 2019) et [Hong, 2019] : 40x40px. On peut souligner que dans cette dernière étude qui compare différentes architectures d'OD, les auteurs indiquent que 40x40px est une taille minimale pour que le système fonctionne, mais qu'il serait préférable d'utiliser une taille plus grande pour une meilleure détection/classification. Enfin, comme nous l'exposerons dans la partie suivante, il est important de noter que dans le projet TRIDA, nous souhaitons être capables d'effectuer une classification dite à « grain fin » (Fine Grain Image Classification, FGIC) de chaque oiseau, ce qui suppose d'utiliser des images dans lesquelles chaque oiseau doit être beaucoup plus détaillé que dans les travaux que nous venons de citer.

Nous pouvons enfin mentionner des travaux particuliers qui s'intéressent à cette même problématique mais en utilisant l'imagerie thermique. La particularité dans cette configuration est que le système ne s'intéresse généralement qu'à la détection et au comptage mais pas à la classification. Dans ces études, le postulat est que les objets/oiseaux détectés sont regroupés (par exemple pour la nuit dans la canopée) uniquement entre individus d'une même espèce connue à l'avance. N'ayant pas besoin de faire une classification, et les images thermiques ne fournissant pas assez de détails pour la faire, les images considérées présentent une résolution plus faible avec par exemple des tuiles de 480x720px pour [Kassim, 2020], ou encore de 200x200px avec une taille d'oiseau moyenne de 29x29px pour [Luz-Ricca, 2022].



### 3. Problèmes récurrents

La plupart des travaux existants soulignent une liste de problèmes récurrents dans la tâche d'OD qui nous intéresse. Ces problèmes auxquels il nous faudra être vigilants sont la complexité de l'environnement dans lequel les oiseaux évoluent et qui peut fausser la détection, voire même l'annotation manuelle du dataset avant entraînement : par exemple les feuilles des arbres, les pierres, les ombres des oiseaux, etc. Les différentes études soulignent aussi les problèmes d'occlusion avec des oiseaux qui peuvent se recouvrir les uns les autres, qui peuvent cacher certaines parties permettant de les identifier (tête sous les ailes, etc.). Se pose aussi le problème des oiseaux volants qui peuvent apparaître dans plusieurs images et donc être comptés plusieurs fois.

Un autre problème majeur bien connu (et non résolu) en IA est celui du déséquilibre dans les données d'entraînement (data imbalance). En effet, dans la plupart des études certaines espèces d'oiseaux sont sous représentées, ce qui a un fort impact sur les performances de l'IA.

Dans les 2 cas, un début de solution consiste à augmenter les données en générant de nouvelles images par transformations, en mixant des images issues de divers datasets existants quand cela est possible, voire en créant de toute pièce des images synthétiques permettant d'étoffer le dataset.

## ➤ C. Approche TRIDA

Pour conclure sur cette partie, nous pouvons dire que si les méthodes mises en œuvre dans l'état de l'art peuvent nous inspirer, aucun des travaux existants ne traite des espèces d'oiseaux visées par TRIDA, ce qui n'est pas surprenant sachant qu'il existe plus de 14 000 espèces d'oiseaux différentes dans le monde. Il n'y a donc pas de modèle d'IA pré-entraîné directement utilisable dans notre contexte. Nous n'avons pas non plus trouvé de jeu de données préexistant directement utilisable pour entraîner un nouveau modèle spécifique à TRIDA. Nous serons donc amenés à créer un nouveau dataset et à tester les différentes architectures ci-avant tout en utilisant les méthodes et techniques que nous avons évoquées. Enfin, on peut souligner que cet état de l'art doit surtout nous inspirer pour la tâche de détection des oiseaux (bounding boxes) : en effet, nous souhaitons dans TRIDA mettre en œuvre une classification inspirée de la FGIC (cf. partie suivante). Le processus envisagé sera donc d'utiliser les architectures d'OD pour détecter les oiseaux de manière "générique", à l'image des travaux de [\[Weinstein, 2021\]](#), puis d'extraire chaque oiseau détecté afin de l'envoyer non pas dans un "simple" classifieur à gros grain, mais dans une IA plus complexe dédiée à la FGIC.

## III. Classification d'oiseaux à Grain Fin : FGIC

L'analyse d'images à grain fin (Fine Grain Image Analysis, FGIA) s'intéresse à des images contenant des objets/individus appartenant à plusieurs sous-catégories/sous-classes d'une même super-catégorie/super-classe. Elle est utilisée dans diverses applications du monde réel, tant dans l'industrie que dans la recherche, et constitue un domaine de recherche actif en CV. [\[Wei, 2019\]](#) et [\[Wei, 2021\]](#) divisent les techniques FGIA avec DL en trois catégories principales : la reconnaissance d'images à grain fin, la récupération d'images à grain fin, et la génération d'images à grain fin. Dans le cadre de TRIDA, nous nous concentrerons sur la reconnaissance d'images à grain fin (Fine Grain Image Classification, FGIC), et les sous-classes considérées sont différentes espèces d'oiseaux.

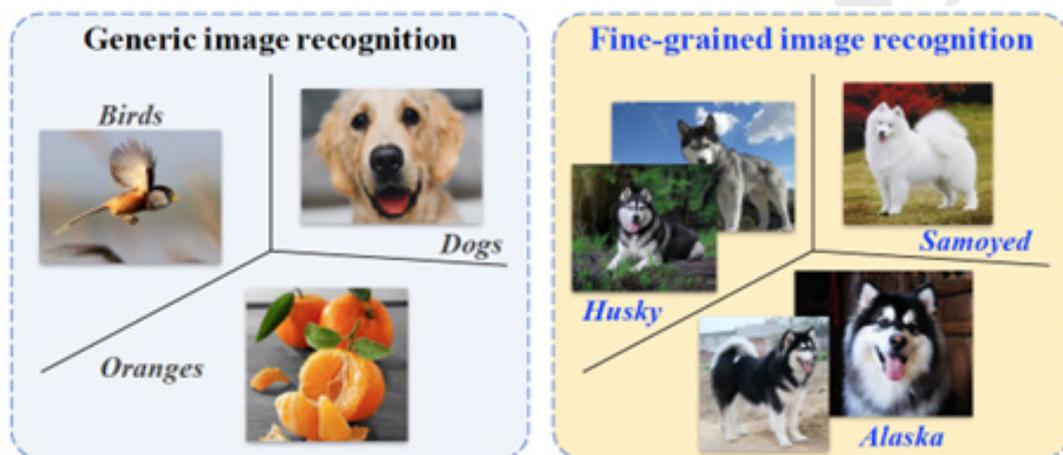


Figure 1. Reconnaissance d'images à "gros grain" versus reconnaissance d'images à "grain fin" [Wei, 2021]

Il faut tout d'abord noter que la FGIC ne s'intéresse que peu à la détection d'objets. Les images traitées en FGIC ne contiennent généralement qu'un seul objet. Si un calcul de bounding box peut être fait, la difficulté majeure est de classifier l'objet avec précision. Cette difficulté est d'autant plus grande du fait que les classes d'objets considérées présentent des caractéristiques visuelles proches. Pour comprendre ce que signifie la FGIC, on peut la distinguer de la reconnaissance d'images à gros grain, également connue sous le nom de reconnaissance d'images générique ou traditionnelle. Comme le montre la Figure 1, dans la reconnaissance d'images à gros grains, l'objectif est de classifier des objets visuellement différents comme des oiseaux, des chiens ou des oranges. Dans la reconnaissance d'images à grain fin, les objets semblent similaires. Par exemple, Husky, Alaska et Samoyed sont des sous-classes d'une même méta-classe : le Chien. En FGIC, et comme l'illustre la Figure 2, les variations visuelles inter-classes sont très faibles, mais les variations intra-classes (au sein même de chaque sous-classe) sont elles-mêmes importantes en raison des poses, des échelles et des rotations, ce qui rend la classification extrêmement difficile.



Figure 2. Variations inter-classes et variations intra-classes [Wei, 2019].

## ➤ A. Approches en DL

Le système visuel humain est capable de reconnaître une espèce d'oiseau en se concentrant sur ses différentes parties (tête, bec, ailes, queue, etc.). L'approche majeure utilisée par les chercheurs en FGIC s'inspire de ce fonctionnement : il s'agit de créer des modèles capables de reconnaître les parties sémantiques distinctives des oiseaux pour les utiliser dans le processus de classification. Pour ce faire, l'approche générale consiste à créer des IA contenant un sous-réseau de localisation capable de d'identifier les sous-parties des oiseaux, d'extraire les vecteurs de caractéristiques pertinents correspondants, puis de les fusionner avec des caractéristiques plus globales de l'image afin d'en déduire une classification de l'individu. En conséquence, l'entraînement de ces IA basée sur le DL nécessite des datasets contenant des images d'oiseaux correspondants aux espèces visées et dont les sous-parties sont à la fois bien visibles (résolution suffisante) et identifiées.

Il existe aussi une seconde approche que l'on nomme "hybride" pour créer des modèles d'IA dédiés à la FGIC. L'approche hybride consiste à utiliser en plus des images des données décrivant les individus à classer sous une autre forme. Cette autre forme peut par exemple être un texte descriptif, auquel cas l'approche intègre à la fois la CV et le NLP (Natural Language Processing), ou encore un graphe de connaissance, auquel cas l'approche hybride la CV à des réseaux de type GNN (Graph Neural Networks). L'existence des approches hybrides explique pourquoi les datasets intègrent parfois, en plus des images annotées, des descripteurs supplémentaires sous différentes formes.

## ➤ B. Jeux de données existants

Il existe plusieurs datasets de référence pour la FGIC dans de nombreuses méta-catégories tels que les fleurs, les chiens, les voitures, les avions, etc. Nous nous concentrons ici sur les datasets qui font référence pour la FGIC dédiée aux espèces d'oiseaux.

Le dataset Caltech UCSD Birds 200-2011 (CUB-200-2011) [[Wah, 2011](#)] est le jeu de données FGIC pour les oiseaux le plus populaire. Il contient 11 788 images de 200 espèces d'oiseaux. Chaque image est annotée avec une bounding box, 15 emplacements de sous-parties (bec, pattes, ailes, etc.) et 312 étiquettes d'attributs binaires. L'annotation a été réalisée par une équipe d'experts à l'aide d'une taxonomie détaillée des espèces d'oiseaux. Une extension récente [[Reed, 2016](#)] comprend également du texte (5 phrases pour chacune des images), fournissant une description textuelle détaillée de l'oiseau présent sur l'image. Ces phrases visent à être utilisées dans la création de modèles d'IA hybrides mêlant CV et NLP, approche qui n'est a priori pas envisagée dans TRIDA. CUB-200-2011 représente une contribution significative au domaine de la CV et est devenu un jeu de données de référence largement utilisé pour évaluer et comparer les performances des algorithmes de FGIC.

Le jeu de données Birdsnap [[Berg, 2014](#)] contient 49 829 images représentant 500 des principales espèces d'oiseaux d'Amérique du Nord. Le nombre d'images par espèce varie de 69 à 100, la majorité ayant 100 images chacune. Chaque image est annotée d'une bounding box et des coordonnées de 17 points spécifiques. En outre, certaines images sont marquées avec des informations sur le sexe de l'oiseau (mâle/femelle), son âge (immature/adulte) et l'état de son plumage (reproducteur/non reproducteur). Le jeu de données Birdsnap est similaire dans sa structure à CUB-200-2011, mais présente trois avantages importants. Tout d'abord, il contient deux fois et demie plus d'espèces d'oiseaux et quatre fois plus d'images. Deuxièmement, il couvre toutes les espèces d'oiseaux les plus couramment observées aux États-Unis. Troisièmement, le jeu de données reflète mieux la variation d'apparence au sein de nombreuses espèces.

Le jeu de données NABirds [[Horn, 2015](#)] contient 48 562 images d'oiseaux d'Amérique du Nord avec 555 catégories. Chaque image est annotée d'une bounding box et de 11 emplacements de sous-parties. La taxonomie de ce jeu de données contient 1011 nœuds, et les catégories couvrent les oiseaux les plus communs d'Amérique du Nord.

## 1. Résolutions moyennes

L'étude des datasets de référence dans le [Tableau 1](#) permet d'identifier les dimensions qui caractérisent les images utilisées pour la FGIC, ce qui nous informe sur la taille des images qui pourront être utilisées dans TRIDA : on peut en particulier remarquer que la définition de chaque oiseau dans ces dataset est bien supérieure à celle utilisée dans l'OD.

	CUB	Birdsnap	NABirds
Taille moyenne des images	468 x 386 px	2125 x 1655 px	898 x 712 px
Taille moyenne d'un oiseau	257 x 232 px	891 x 808 px	454 x 406 px

*Tableau 1. Tailles moyennes dans les datasets de référence.*

## 2. Espèces TRIDA

Le [Tableau 2](#) met en correspondance les espèces étudiées dans le cadre de TRIDA et leur présence dans les datasets de référence existants. On peut remarquer que seules 7 des 13 espèces considérées sont présentes. De fait, il y a 6 espèces TRIDA pour lesquelles nous n'avons aujourd'hui aucune image.

	CUB-200-2011	Birdsnap	NABirds
Mediterranean Gull			
Black-headed Gull			
Black-legged Kittiwake		✓	✓
Sandwich Tern		✓	
Common Tern	✓	✓	✓
Least Tern	✓	✓	
Common Ringed Plover			
Kentish Plover			
Herring Gull	✓	✓	✓
Yellow-legged Gull			
Great Black-backed Gull		✓	✓
Lesser Black-backed Gull			
Northern Fulmar	✓		

*Tableau 2. Correspondance des espèces TRIDA dans les datasets de référence pour la FGIC.*

Le [Tableau 3](#) focalise sur les espèces TRIDA présentes dans les datasets de référence : on peut constater que les tailles des images et celles des oiseaux qu'elles contiennent ne sont pas uniformes. On peut aussi y noter le nombre d'images disponibles par espèce d'oiseaux. Enfin, le tableau présente des exemples d'images dans chaque dataset : il est important de remarquer que ces images ne correspondent pas à des prises de vue aériennes réalisées par drones, ce qui questionne sur la pertinence de leur utilisation au sein de TRIDA.

	<b>CUB-200-2011</b> Moyenne images : 468x386 Moyenne oiseaux : 257x232	<b>Birdsnap</b> Moyenne image : 2125x1655 Moyenne oiseaux : 891x808	<b>NABirds</b> Moyenne images : 898x712 Moyenne oiseaux : 454x406
<b>Black-legged Kittiwake</b>		Total : 100 images Exemples : 	Total : 107 images (53 adultes, 54 immatures) Exemples : 
<b>Sandwich Tern</b>		Total : 100 images Exemples : 	
<b>Common Tern</b>	Total : 60 images. Exemples : 	Total : 100 images. Exemples : 	Total : 120 images. Exemples : 
<b>Least Tern</b>	Total : 60 images. Exemples : 	Total : 100 images. Exemples : 	
<b>Herring Gull</b>	Total : 60 images. Exemples : 	Total : 60 images. Exemples : 	Total : 218 images. (117 adultes, 101 immatures) Exemples : 



	<b>CUB-200-2011</b> Moyenne images : 468x386 Moyenne oiseaux : 257x232	<b>Birdsnap</b> Moyenne image : 2125x1655 Moyenne oiseaux : 891x808	<b>NABirds</b> Moyenne images : 898x712 Moyenne oiseaux : 454x406
<b>Great Black-backed Gull</b>		Total : 100 images. Exemples : 	Total : 147 images (84 adultes, 63 immatures) Exemples : 
<b>Northern Fulmar</b>	Total : 60 images. Exemples : 		

Tableau 3. Détail des espèces TRIDA au sein des datasets de référence (tailles moyennes en pixels).

### 3. Variations intra espèce

L'étude des datasets de référence permet aussi de constater que pour plusieurs espèces, certaines caractéristiques observables diffèrent énormément d'un jeune individu à un individu adulte. Par exemple, la [Figure 3](#) montre deux photos de Goéland argenté qui illustrent cette différence : la couleur du plumage et la couleur du bec présentent des différences majeures entre deux individus appartenant pourtant à la même espèce. On comprend facilement qu'un algorithme aura beaucoup de mal à reconnaître les caractéristiques d'une espèce si on lui montre des individus tantôt jeunes, tantôt adultes, qui ne se "ressemblent" pas. Il apparaît donc nécessaire, dans le cas de différences importantes de ce genre, de séparer les exemples en plusieurs catégories (par exemple, Herring Gull Adult, et Herring Gull Immature). Il est à noter que les datasets CUB-200-2011 et BirdSnap ne font pas cette différenciation. Seul le dataset NABirds pose une étiquette différente sur les individus selon qu'ils sont jeunes ou adultes. Le dataset Birdsnap contient une information complémentaire (un attribut) indiquant si l'individu est jeune ou adulte. Le dataset CUB-200-2011 ne contient aucune information à ce sujet.



Figure 3. Deux individus de la même espèce (Herring Gull). À gauche, un jeune individu. À droite, un individu adulte.

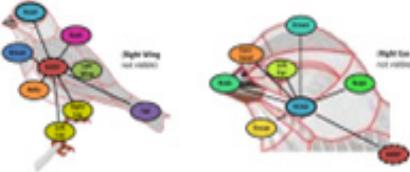
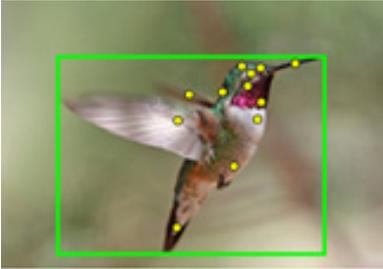
Un autre défi important relatif aux différences intra-classes apparaît selon l'angle de la prise de vue, la pose de l'oiseau, etc. Les sous-parties visuellement observables ne sont pas toujours les mêmes (on voit parfois les pattes, le bout des ailes, etc., ou pas ...). C'est ce qu'illustre la figure [Figure 4](#) avec 3 photos de Sterne pierregarin. Selon l'angle de la prise de vue, et la pose de l'oiseau, on ne distingue pas toujours les mêmes caractéristiques. Ce type de problème permet de comprendre qu'il est nécessaire d'obtenir un très grand nombre d'exemples différents pour espérer être capable d'obtenir de bons résultats de classification.



**Figure 4.** Individus de la même espèce (Common Tern), dans des positions différentes.

## 4. Annotation des sous-parties

Comme indiqué précédemment, et comme nous le verrons dans la partie suivante, un grand nombre des techniques de FGIC récentes focalise sur des parties de l'animal (le bec, les ailes, la queue, etc.). Ainsi, les différents datasets proposent, en plus d'une boîte englobante autour de l'oiseau, des points de référence (part annotations, ou key point locations), c'est-à-dire la localisations de certaines parties de l'animal. Le tableau 4 montre les points de référence dans les 3 datasets examinés. On remarque que les datasets n'ont pas tous le même nombre de points de référence (11, 15, et 17). De plus CUB-200-2011 et Birdsnap complètent cette description avec des attributs textuels supplémentaires sur chaque image (comme le sexe, la tranche d'âge, la forme, la couleur de patte, etc.). La représentation n'est donc pas uniforme.

CUB_200_2011	Birdsnap	NABirds
 <p>Images annotées avec 15 part locations.</p>	 <p>Images annotées avec 17 part locations.</p>	 <p>Images annotées avec 11 part locations.</p>

**Tableau 4.** Points de références annotés sur les images des différents datasets [[Wah, 2011](#)][[Berg, 2014](#)][[Horn, 2015](#)]

## 5. Approche TRIDA

L'étude des datasets de référence existants démontre qu'il n'existe pas de dataset directement utilisable dans le cadre de TRIDA. Il sera de fait nécessaire de créer un nouveau dataset spécifique avec les espèces considérées dans le projet. Pour cela, un travail d'extraction des individus disponibles dans les datasets existants sera à conduire. Ce travail nécessitera une phase de consolidation pour tenir compte des différences entre datasets, ceci afin de les uniformiser et de les adapter à l'approche qui sera mise en œuvre au sein du projet. Enfin, une forte augmentation de ces datasets (nouvelles photos annotées) sera nécessaire, non seulement pour ajouter les espèces non présentes, mais aussi pour étoffer la représentation de celles déjà disponibles avec des images en prises de vue par drones et annotées uniformément par les ornithologues impliqués dans le projet.

### ➤ C. Modèles d'IA existants pour la FGIC

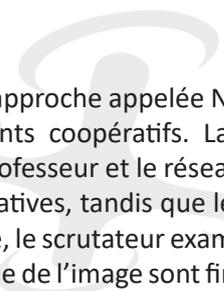
Il existe de nombreuses études antérieures qui ont exploré différentes approches en IA dédiées à la FGIC. [\[Wei, 2021\]](#) recense et compare une soixantaine de travaux qui se sont intéressés à cette problématique en l'appliquant aux oiseaux. Nous citons ci-après celles qui nous ont semblé les plus pertinentes du fait de leur bons résultats sur les datasets de référence.

#### 1. Approches par identification des parties

[\[Zhang, 2014\]](#) propose une méthode R-CNN basée sur les parties. La méthode proposée utilise une recherche sélective pour générer des propositions de région à partir d'une image d'entrée contenant un oiseau. Deux R-CNN distincts sont ensuite utilisés pour la détection d'objets et des parties. Les caractéristiques résultantes alimentent ensuite un perceptron multicouche (MLP) pour prédire la classe de l'oiseau. La méthode impose des contraintes géométriques apprises entre les objets et les parties et utilise une représentation normalisée de la pose.

[\[Zhang, 2016\]](#) propose une nouvelle architecture CNN qui intègre la détection et l'abstraction sémantique des parties pour une reconnaissance à grain fin grâce au SPDA-CNN. L'architecture SPDA-CNN proposée comprend deux sous-réseaux : un sous-réseau de détection et un sous-réseau de reconnaissance. Le sous-réseau de détection utilise une méthode de proposition descendante unique pour générer de petites parties sémantiques candidates à la détection. Ce réseau de détection des parties applique la méthode Fast RCNN pour obtenir des boîtes englobantes des parties beaucoup plus précises. D'autre part, le sous-réseau de reconnaissance introduit des couches qui extraient des caractéristiques des parties détectées par le sous-réseau de détection, puis les combinent pour la reconnaissance.

[\[Wei, 2016\]](#) utilise un réseau entièrement convolutionnel pour générer des masques d'objets/de parties afin de les localiser et d'en extraire des descripteurs profonds. En se basant sur ces masques, un "M-CNN" à quatre flux (qui correspondent à l'image entière, à la tête, au torse et aux images/patches d'objets) est construit pour un entraînement conjoint et pour capturer à la fois des informations sur les oiseaux et leurs parties. Le modèle n'utilise pas de couches entièrement connectées, ce qui le rend plus efficace et plus performant. Par rapport aux techniques de détection, la segmentation peut offrir une localisation de partie plus précise puisqu'elle focalise sur chaque pixel des parties de l'oiseau, mais elle nécessite un travail d'annotation conséquent.



[Yang, 2018] présente une approche appelée NTS-NET (Navigator-Teacher-Scrutinizer Network) à l'aide d'un système d'apprentissage multi-agents coopératifs. La méthode proposée se compose de trois réseaux : le réseau du navigateur, le réseau de professeur et le réseau de scrutateur. Le navigateur guide le modèle pour se concentrer sur les régions les plus informatives, tandis que le professeur évalue les régions proposées par le navigateur et fournit des commentaires. Ensuite, le scrutateur examine de près ces régions pour faire des prédictions. Les caractéristiques des régions et de l'ensemble de l'image sont finalement traitées conjointement pour établir des prédictions globales.

Deep LAC [Lin, 2015] est un système qui intègre des sous-réseaux de localisation, d'alignement et de classification. Le processus commence par la soumission de l'image d'entrée au sous-réseau de localisation qui renvoie un ensemble de bounding boxes pour localiser les parties de l'oiseau qui sont pertinentes pour la classification. Ces bounding boxes sont ensuite transmises au sous-réseau d'alignement qui aligne chaque partie à une pose canonique. Enfin, les parties alignées sont envoyées au sous-réseau de classification, qui classe chaque partie et combine les prédictions obtenues pour faire une prédiction finale pour l'ensemble de l'objet.

## 2. Approches hybrides

[Nawaz, 2019] se base sur des descriptions en langage naturel pour obtenir des informations sur les parties discriminantes des objets. Les auteurs ont proposé un réseau à deux branches (TBN) basé sur des réseaux neuronaux profonds combinant la vision et le langage naturel pour l'apprentissage de la représentation conjointe. La première branche (branche vision) est un réseau Navigator-Teach-Scrutinize Network (NTS-Net), qui localise les régions intéressantes et discriminantes. La deuxième branche (Branche Langage) est un modèle BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers). Les représentations sont fusionnées puis passent par un MLP (Multi-Layer Perception) pour obtenir la classification.

[Chen, 2018] propose un modèle hybride appelé cadre d'apprentissage de représentation intégré aux connaissances (Knowledge-Embedded Representation Learning - KERL), qui concatène un CNN pour la représentation d'image et un modèle de réseau neuronal graphique à portes (Gated Graph Neural Network - GGNN) qui utilise un graphe de connaissances.

[Xu, 2018] développe un nouveau modèle de régression CNN à deux niveaux qui exploite des informations visuelles et sémantiques. Le CNN est divisé en deux parties : la première utilise un cadre R-CNN pour déterminer l'emplacement de l'objet ou de ses composants distinctifs, tandis que la deuxième extrait les caractéristiques visuelles des parties identifiées ou de l'objet lui-même.

[Wang, 2015] propose une méthode qui hybride CNN et un arbre ontologique. L'approche met en œuvre des classificateurs basés sur des CNN spécialisés à différents niveaux de granularité.

## 3. Approche TRIDA

Comme on peut le constater, l'état de l'art dédié à la FGIC est déjà bien fourni. Néanmoins, aucune des solutions existantes ne peut être directement ré-utilisée au sein de TRIDA, en particulier du fait que ces modèles ont été entraînés sur les données fournies par les datasets de référence, et nous avons montré dans la partie précédente que ces datasets ne correspondent pas aux besoins de TRIDA. Ces architectures pourront cependant bien entendu nous inspirer pour créer notre propre modèle d'IA. L'approche que nous envisageons est une approche par identification des parties. Les raisons sont multiples : l'état de l'art permet de constater que ces approches sont particulièrement efficaces. De plus, elles entrent en résonance avec l'approche développée au sein du LISIC dans le but de créer des modèles d'IA explicables.

## ➤ D. Explicabilité des IA

Si les travaux récents en matière de détection d'objets et de FGIC présentent des avancées significatives, la question de l'explicabilité de ces algorithmes reste une question majeure. En effet, de nombreux travaux soulignent que si la décision d'un algorithme d'intelligence artificielle est importante, le rationnel ayant mené à cette décision l'est tout autant [Hendricks, 2016][Bodria, 2021]. Nous avons vu que les architectures actuelles reposent sur le DL qui produit des modèles dits "boîtes noires", c'est-à-dire des modèles mathématiques manipulant des millions de variables, et dont le fonctionnement est très difficilement explicable.

De nombreux travaux abordent ce problème en essayant d'interpréter a posteriori les décisions des algorithmes de classification [Selvaraju, 2016][Ribeiro, 2016] [Wagner, 2019][Li, 2021]. Une technique largement utilisée consiste à identifier quelles parties de l'image ont le plus contribué à la décision finale, grâce notamment à des cartes de saillance. Toutefois, des travaux ont montré que ces techniques, si elles permettent à des experts en IA d'appréhender le fonctionnement des modèles sous-jacents, n'apportent pas d'explication réellement satisfaisante aux experts du domaine visé par le modèle, voire s'avèrent contre-productives dans certains cas [Akula, 2022][Lai, 2019]. Une autre technique présente dans la littérature consiste à entraîner un surrogate model [Blanco-Justicia, 2019][Zhu, 2022], c.à.d. un second modèle plus simple et explicable qui "copie" les décisions du modèle complexe principal pour en fournir des explications. Cette approche est aujourd'hui critiquée et des chercheurs militent pour la création directe de modèles intrinsèquement explicables [Rudin, 2018], c'est-à-dire qui incorporent dès la conception les informations nécessaires à leur explication.

Nous nous situons dans cette mouvance et les fondements de notre approche pour des IA explicables ont été présentés dans [Bourguin, 2021]. La méthode que nous envisageons vise à créer des IA intrinsèquement explicables en intégrant des connaissances expertes directement dans le pipeline de classification. Ces connaissances sont capturées sous la forme d'ontologies qui formalisent la connaissance des experts. Au sein de TRIDA, il s'agira de la connaissance concernant les espèces étudiées fournie par les ornithologues impliqués dans le projet. En cohérence avec l'étude des solutions pour la FGIC et des datasets de référence présentés ci-avant, cette connaissance décrira entre autres les différentes sous-parties des individus de chaque espèce. La différence majeure dans l'approche envisagée est que l'ontologie qui sera liée aux images annotées, et qui sera utilisée pour entraîner le modèle d'IA, contiendra un ensemble de règles permettant de baser la classification automatique non seulement sur le DL, mais aussi sur un raisonnement logique explicable du point de vue des ornithologues.



## IV. Références

- Akula, A.R., & Zhu, S. (2022). Attention cannot be an Explanation. *ArXiv*, abs/2201.11194.
- Berg, T., Liu, J., Lee, S.W., Alexander, M.L., Jacobs, D.W., & Belhumeur, P.N. (2014). Birdsnap: Large-Scale Fine-Grained Visual Categorization of Birds. 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2019-2026.
- Blanco-Justicia, A., & Domingo-Ferrer, J. (2019). Machine Learning Explainability Through Comprehensible Decision Trees. *International Cross-Domain Conference on Machine Learning and Knowledge Extraction*.
- Bodria, F., Giannotti, F., Guidotti, R., Naretto, F., Pedreschi, D., & Rinzivillo, S. (2021). Benchmarking and Survey of Explanation Methods for Black Box Models. *ArXiv*, abs/2102.13076.
- Bourguin, G., Lewandowski, A., Bouneffa, M., & Ahmad, A. (2021). Towards Ontologically Explainable Classifiers. *International Conference on Artificial Neural Networks*.
- Chen, C., Zheng, Z., Xu, T., Guo, S., Feng, S., Yao, W., & Lan, Y. (2023). YOLO-Based UAV Technology: A Review of the Research and Its Applications. *Drones*.
- Chen, T., Lin, L., Chen, R., Wu, Y., & Luo, X. (2018). Knowledge-Embedded Representation Learning for Fine-Grained Image Recognition. *International Joint Conference on Artificial Intelligence*.
- Everingham, M., Gool, L.V., Williams, C.K., Winn, J.M., & Zisserman, A. (2010). The Pascal Visual Object Classes (VOC) Challenge. *International Journal of Computer Vision*, 88, 303-338.
- Francis, R.J., Lyons, M.B., Kingsford, R.T., & Brandis, K.J. (2020). Counting Mixed Breeding Aggregations of Animal Species Using Drones: Lessons from Waterbirds on Semi-Automation. *Remote. Sens.*, 12, 1185.
- Hayes, M.C., Gray, P.C., Harris, G., Sedgwick, W.C., Crawford, V.D., Chazal, N., Crofts, S., & Johnston, D.W. (2021). Drones and deep learning produce accurate and efficient monitoring of large-scale seabird colonies. *Ornithological Applications*, 123, 1 - 16.
- Hendricks, L.A., Akata, Z., Rohrbach, M., Donahue, J., Schiele, B., & Darrell, T. (2016). Generating Visual Explanations. *European Conference on Computer Vision*.
- Hong, S., Han, Y., Kim, S., Lee, A., & Kim, G. (2019). Application of Deep-Learning Methods to Bird Detection Using Unmanned Aerial Vehicle Imagery. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 19.
- Horn, G.V., Branson, S., Farrell, R., Haber, S., Barry, J., Ipeirotis, P.G., Perona, P., & Belongie, S.J. (2015). Building a bird recognition app and large scale dataset with citizen scientists: The fine print in fine-grained dataset collection. 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 595-604.
- Kabra, K., Xiong, A., Li, W., Luo, M., Lu, W., Garcia, R., Vijay, D., Yu, J., Tang, M., Yu, T., Arnold, H., Vallery, A.C., Gibbons, R.E., & Barman, A. (2022). Deep object detection for waterbird monitoring using aerial imagery. 2022 21st IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA), 455-460.
- Kassim, Y.M., Byrne, M.E., Burch, C.G., Mote, K., Hardin, J.B., Larsen, D.R., & Palaniappan, K. (2020). Small Object Bird Detection in Infrared Drone Videos Using Mask R-CNN Deep Learning. *electronic imaging*, 2020, 85-1-85-8.
- Lai, Q., Wang, W., Khan, S.H., Shen, J., Sun, H., & Shao, L. (2019). Human vs Machine Attention in Neural Networks: A Comparative Study. *ArXiv*, abs/1906.08764.
- Li, X., Xiong, H., Li, X., Wu, X., Zhang, X., Liu, J., Bian, J., & Dou, D. (2021). Interpretable deep learning: interpretation, interpretability, trustworthiness, and beyond. *Knowledge and Information Systems*, 64, 3197 - 3234.
- Lin, D., Shen, X., Lu, C., & Jia, J. (2015). Deep LAC: Deep localization, alignment and classification for fine-grained recognition. 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 1666-1674.
- Lin, T., Maire, M., Belongie, S.J., Hays, J., Perona, P., Ramanan, D., Dollár, P., & Zitnick, C.L. (2014). Microsoft COCO: Common Objects in Context. *European Conference on Computer Vision*.
- Luz-Ricca, E., Landolt, K.L., Pickens, B.A., & Koneff, M.D. (2022). Automating sandhill crane counts from nocturnal thermal aerial imagery using deep learning. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 9.
- Lyons, M.B., Brandis, K.J., Murray, N.J., Wilshire, J.H., McCann, J., Kingsford, R.T., & Callaghan, C.T. (2019). Monitoring large and complex wildlife aggregations with drones. *Methods in Ecology and Evolution*, 10, 1024 - 1035.
- Miao, Z., Yu, S.X., Landolt, K.L., Koneff, M.D., White, T.P., Fara, L.J., Hlavacek, E., Pickens, B.A., Harrison, T.J., & Getz, W.M. (2022). Challenges and solutions for automated avian recognition in aerial 1 imagery.
- Nawaz, S., Calefati, A., Caraffini, M., Landro, N., & Gallo, I. (2019). Are These Birds Similar: Learning Branched Networks for Fine-grained Representations. 2019 International Conference on Image and Vision Computing New Zealand (IVCNZ), 1-5.

- Reed, S.E., Akata, Z., Lee, H., & Schiele, B. (2016). Learning Deep Representations of Fine-Grained Visual Descriptions. 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 49-58.
- Ribeiro, M., Singh, S., & Guestrin, C. (2016). "Why Should I Trust You?": Explaining the Predictions of Any Classifier. Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining.
- Rudin, C. (2018). Stop explaining black box machine learning models for high stakes decisions and use interpretable models instead. *Nature Machine Intelligence*, 1, 206-215.
- Selvaraju, R.R., Das, A., Vedantam, R., Cogswell, M., Parikh, D., & Batra, D. (2016). Grad-CAM: Visual Explanations from Deep Networks via Gradient-Based Localization. *International Journal of Computer Vision*, 128, 336-359.
- Sermanet, P., Eigen, D., Zhang, X., Mathieu, M., Fergus, R., & LeCun, Y. (2013). OverFeat: Integrated Recognition, Localization and Detection using Convolutional Networks. CoRR, abs/1312.6229.
- Shanliang, L., Yunlong, L., Jingyi, Q., & Renbiao, W. (2022). Airport UAV and birds detection based on deformable DETR. *Journal of Physics: Conference Series*, 2253.
- Wagner, J., Köhler, J.M., Gindele, T., Hetzel, L., Wiedemer, J.T., & Behnke, S. (2019). Interpretable and Fine-Grained Visual Explanations for Convolutional Neural Networks. 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 9089-9099.
- Wah, C., Branson, S., Welinder, P., Perona, P., & Belongie, S.J. (2011). The Caltech-UCSD Birds-200-2011 Dataset.
- Wang, D., Shen, Z., Shao, J., Zhang, W., Xue, X., & Zhang, Z. (2015). Multiple Granularity Descriptors for Fine-Grained Categorization. 2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2399-2406.
- Wei, X., Song, Y., Mac Aodha, O., Wu, J., Peng, Y., Tang, J., Yang, J., & Belongie, S.J. (2021). Fine-Grained Image Analysis With Deep Learning: A Survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 44, 8927-8948.
- Wei, X., Wu, J., & Cui, Q. (2019). Deep Learning for Fine-Grained Image Analysis: A Survey. ArXiv, abs/1907.03069.
- Wei, X., Xie, C., & Wu, J. (2016). Mask-CNN: Localizing Parts and Selecting Descriptors for Fine-Grained Image Recognition. ArXiv, abs/1605.06878.
- Weinstein, B.G., Garner, L.V., Saccomanno, V.R., Steinkraus, A., Ortega, A., Brush, K., Yenni, G.M., McKellar, A.E., Converse, R.L., Lippitt, C.D., Wegmann, A., Holmes, N.D., Edney, A.J., Hart, T., Jessopp, M.J., Clarke, R.H., Marchowski, D., Senyondo, H., Dotson, R., White, E.P., Frederick, P.C., & Morgan Ernest, S.K. (2021). A general deep learning model for bird detection in high resolution airborne imagery. bioRxiv.
- Xu, H., Qi, G., Li, J., Wang, M., Xu, K., & Gao, H. (2018). Fine-grained Image Classification by Visual-Semantic Embedding. *International Joint Conference on Artificial Intelligence*.
- Yang, Z., Luo, T., Wang, D., Hu, Z., Gao, J., & Wang, L. (2018). Learning to Navigate for Fine-grained Classification. ArXiv, abs/1809.00287.
- Zhang, H., Xu, T., Elhoseiny, M., Huang, X., Zhang, S., Elgammal, A., & Metaxas, D.N. (2016). SPDA-CNN: Unifying Semantic Part Detection and Abstraction for Fine-Grained Recognition. 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 1143-1152.
- Zhang, N., Donahue, J., Girshick, R.B., & Darrell, T. (2014). Part-Based R-CNNs for Fine-Grained Category Detection. ArXiv, abs/1407.3867.

