



HAL
open science

Intérêts et méthodes de suivi des populations d'oiseaux sauvages, application en épidémiologie et exemple du suivi de *Motacilla Alba* autour d'un élevage de canards gras pour étudier le risque d'influenza aviaire

Margaux Glesser

► To cite this version:

Margaux Glesser. Intérêts et méthodes de suivi des populations d'oiseaux sauvages, application en épidémiologie et exemple du suivi de *Motacilla Alba* autour d'un élevage de canards gras pour étudier le risque d'influenza aviaire. Médecine vétérinaire et santé animale. 2022. dumas-04041125

HAL Id: dumas-04041125

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04041125v1>

Submitted on 22 Mar 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

INTERETS ET METHODES DE SUIVI DES POPULATIONS D'OISEAUX SAUVAGES, APPLICATION EN EPIDEMIOLOGIE ET EXEMPLE DU SUIVI DE *MOTACILLA ALBA* AUTOUR D'UN ELEVAGE DE CANARDS GRAS POUR ETUDIER LE RISQUE D'INFLUENZA AVIAIRE

THESE D'EXERCICE

pour obtenir le titre de
DOCTEUR VETERINAIRE

DIPLOME D'ETAT

*présentée et soutenue publiquement
devant l'Université Paul-Sabatier de Toulouse*

par

**GLESSER Margaux, Louise,
Catherine**

Directeur de thèse : M. Guillaume LE LOC'H

JURY

PRESIDENT :
M. Christophe PASQUIER

Professeur à l'Université Paul Sabatier de TOULOUSE

ASSESEURS :
M. Guillaume LE LOC'H
M. Stéphane BERTAGNOLI

Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE
Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

MEMBRE INVITEE :
Mme Chloé LE GALL-LADEVEZE

Docteure Vétérinaire à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

**Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation
ÉCOLE NATIONALE VÉTÉRINAIRE DE TOULOUSE**

Liste des directeurs/assesseurs de thèse de doctorat vétérinaire

Directeur : Professeur Pierre SANS

PROFESSEURS CLASSE EXCEPTIONNELLE

- M. **BERTAGNOLI Stéphane**, *Pathologie infectieuse*
- M. **BOUSQUET-MELOU Alain**, *Pharmacologie, thérapeutique*
- M. **BRUGERE Hubert**, *Hygiène et industrie des aliments d'origine animale*
- Mme **CHASTANT-MAILLARD Sylvie**, *Pathologie de la reproduction*
- M. **CONCORDET Didier**, *Mathématiques, statistiques, modélisation*
- M. **DELVERDIER Maxence**, *Anatomie pathologique*
- M. **ENJALBERT Francis**, *Alimentation*
- Mme **GAYRARD-TROY Véronique**, *Physiologie de la reproduction, endocrinologie*
- Mme **HAGEN-PICARD Nicole**, *Pathologie de la reproduction*
- M. **MEYER Gilles**, *Pathologie des ruminants*
- M. **SCHELCHER François**, *Pathologie médicale du bétail et des animaux de basse-cour*
- Mme **TRUMEL Catherine**, *Biologie médicale animale et comparée*

PROFESSEURS 1^{ère} CLASSE

- M. **BAILLY Jean-Denis**, *Hygiène et industrie des aliments*
- Mme **BOURGES-ABELLA Nathalie**, *Histologie, anatomie pathologique*
- Mme **CADIERGUES Marie-Christine**, *Dermatologie vétérinaire*
- M. **DUCOS Alain**, *Zootéchnie*
- M. **FOUCRAS Gilles**, *Pathologie des ruminants*
- M. **GUERIN Jean-Luc**, *Aviculture et pathologie aviaire*
- M. **JACQUIET Philippe**, *Parasitologie et maladies parasitaires*
- Mme **LACROUX Caroline**, *Anatomie pathologique, animaux d'élevage*
- Mme **LETRON-RAYMOND Isabelle**, *Anatomie pathologique*
- M. **LEFEBVRE Hervé**, *Physiologie et thérapeutique*
- M. **MAILLARD Renaud**, *Pathologie des ruminants*

PROFESSEURS 2^{ème} CLASSE

- Mme **BOULLIER Séverine**, *Immunologie générale et médicale*
- M. **CORBIERE Fabien**, *Pathologie des ruminants*
- Mme **DIQUELOU Armelle**, *Pathologie médicale des équidés et des carnivores*
- M. **GUERRE Philippe**, *Pharmacie et toxicologie*
- Mme **MEYNADIER Annabelle**, *Alimentation animale*
- M. **MOGICATO Giovanni**, *Anatomie, imagerie médicale*
- Mme **PAUL Mathilde**, *Epidémiologie, gestion de la santé des élevages avicoles*
- M. **RABOISSON Didier**, *Médecine de population et économie de la santé animale*
- M. **VOLMER Romain**, *Microbiologie et infectiologie*

MAITRES DE CONFERENCES HORS CLASSE

- M. **BERGONIER Dominique**, *Pathologie de la reproduction*
- Mme **BIBBAL Delphine**, *Hygiène et industrie des denrées alimentaires d'origine animale*
- Mme **CAMUS Christelle**, *Biologie cellulaire et moléculaire*
- M. **JAEG Jean-Philippe**, *Pharmacie et toxicologie*
- M. **LYAZRHI Faouzi**, *Statistiques biologiques et mathématiques*
- M. **MATHON Didier**, *Pathologie chirurgicale*
- Mme **PALIERNE Sophie**, *Chirurgie des animaux de compagnie*
- Mme **PRIYMENKO Nathalie**, *Alimentation*

MAITRES DE CONFERENCES CLASSE NORMALE

- M. **ASIMUS Erik**, *Pathologie chirurgicale*
- Mme **BRET Lydie**, *Physique et chimie biologiques et médicales*
- Mme **BOUHSIRA Emilie**, *Parasitologie, maladies parasitaires*
- M. **CARTIAUX Benjamin**, *Anatomie, imagerie médicale*
- M. **CONCHOU Fabrice**, *Imagerie médicale*
- Mme **DANIELS Hélène**, *Immunologie, bactériologie, pathologie infectieuse*
- Mme **DAVID Laure**, *Hygiène et industrie des aliments*
- M. **DIDIMO IMAZAKI Pedro**, *Hygiène et industrie des aliments*
- M. **DOUET Jean-Yves**, *Ophthalmologie vétérinaire et comparée*
- Mme **FERRAN Aude**, *Physiologie*
- Mme **GRANAT Fanny**, *Biologie médicale animale*
- Mme **JOURDAN Géraldine**, *Anesthésie, analgésie*
- M. **JOUSSERAND Nicolas**, *Médecine interne des animaux de compagnie*
- Mme **LALLEMAND Elodie**, *Chirurgie des équidés*
- Mme **LAVOUE Rachel**, *Médecine Interne*
- M. **LE LOC'H Guillaume**, *Médecine zoologique et santé de la faune sauvage*
- M. **LIENARD Emmanuel**, *Parasitologie et maladies parasitaires*
- Mme **MEYNAUD-COLLARD Patricia**, *Pathologie chirurgicale*
- Mme **MILA Hanna**, *Elevage des carnivores domestiques*
- M. **NOUVEL Laurent**, *Pathologie de la reproduction*
- M. **VERGNE Timothée**, *Santé publique vétérinaire, maladies animales règlementées*
- Mme **WARET-SZKUTA Agnès**, *Production et pathologie porcine*
- Mme **PALIERNE Sophie**, *Pathologie chirurgicale*
- M. **GAIDE Nicolas**, *Anatomie Pathologique*

INGENIEURS DE RECHERCHE

- M. **AUMANN Marcel**, *Urgences, soins intensifs*
- M. **AUVRAY Frédéric**, *Santé digestive, pathogénie et commensalisme des entérobactéries*
- M. **CASSARD Hervé**, *Pathologie des ruminants*
- M. **CROVILLE Guillaume**, *Virologie et génomique cliniques*
- Mme **DEBREUQUE Maud**, *Médecine interne des animaux de compagnie*
- Mme **DIDIER Caroline**, *Anesthésie, analgésie*
- Mme **DUPOUY GUIRAUTE Véronique**, *Innovations thérapeutiques et résistances*
- Mme **GAILLARD Elodie**, *Urgences, soins intensifs*
- Mme **GEFFRE Anne**, *Biologie médicale animale et comparée*
- Mme **GRISEZ Christelle**, *Parasitologie et maladies parasitaires*
- Mme **JEUNESSE Elisabeth**, *Bonnes pratiques de laboratoire*
- Mme **PRESSANTI Charline**, *Dermatologie vétérinaire*
- M. **RAMON PORTUGAL Félipe**, *Innovations thérapeutiques et résistances*
- M. **REYNOLDS Brice**, *Médecine interne des animaux de compagnie*
- Mme **ROUCH BUCK Pétra**, *Médecine préventive*
- M. **DELPONT Mattias**, *Clinique Aviaire*
- Mme **POUJADE Agnès**, *Anatomie pathologique Vétérinaire*
- Mme **LAYSSOL-LAMOUR Catherine**, *Imagerie Médicale*
- Mme **SAADA Chloé**, *Gestion intégrée de la santé des ruminants*

REMERCIEMENTS

A Monsieur le Professeur Christophe Pasquier,

Professeur des universités et praticien hospitalier à l'Université Paul Sabatier de Toulouse,

Service de virologie du CHU de Toulouse

Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider ce jury de thèse.

Hommages respectueux.

A Monsieur le Docteur Guillaume Le Loc'h,

Maître de conférences à l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse,

Médecine zoologique et santé de la faune sauvage

Qui m'a fait l'honneur d'accepter de diriger ma thèse et qui m'a guidée tout au long de la réalisation de ce travail.

Toute ma gratitude et mon estime.

A Monsieur le Professeur Stéphane Bertagnoli,

Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse,

Virologie et maladies infectieuses

Qui m'a fait l'honneur de participer à mon jury de thèse en tant qu'assesseur.

Sincère reconnaissance.

A Madame Chloé Le Gall-Ladevèze

Docteure vétérinaire, PhD

Qui m'a fait l'honneur de m'inclure à sa thèse universitaire et de participer à mon jury en tant que membre invité.

Sincères remerciements.

A Monsieur Benjamin Vollot, pour son aide précieuse dans la réalisation des captures et de l'équipement des bergeronnettes grises, sans qui cette étude n'aurait pas pu avoir lieu. Ma sincère gratitude.

A la ferme de la Patte d'Oie et à la famille Pérès pour leur accueil chaleureux, leur bienveillance et leur compréhension lors de nos nombreuses visites avec notre matériel encombrant et nos manipulations étranges.

A tous les étudiants et volontaires ayant aidé aux suivis télémétriques : un grand merci pour votre aide précieuse.

TABLE DES MATIERES

Table des matieres	7
Tables des illustrations	10
Figures	10
Tableaux	13
Liste des abréviations	14
Introduction.....	17
I) Les différentes méthodes de suivi des oiseaux, les avantages et les inconvénients de leur utilisation, et application dans le cadre d'études épidémiologiques	19
A) Objectifs du suivi d'oiseaux sauvages	19
1) Inventaire et étude de la dynamique des populations.....	19
2) Etude des déplacements	23
3) Etude épidémiologique	24
B) Méthodes de suivi de type observation.....	27
1) Observation simple.....	27
2) Pièges photographiques.....	30
3) Radars météorologiques	34
4) Enregistrements acoustiques	36
C) Méthodes de suivi de type marque visuelle : baguage et autres marquages corporels	37
1) Bagues métalliques	37
2) Marquages colorés.....	41
a) Bagues colorées simples et DARVIC.....	41
b) Colliers	42
c) Disques nasaux et selles nasales	43
d) Marques alaires.....	43
e) Ruban coloré.....	45
f) Colorations et décolorations du plumage	45

g)	Lecture du code de ces marques visuelles	45
h)	Applications en épidémiologie	47
D)	Méthodes de suivi de type télémétrie	49
1)	Radio repérage haute fréquence (Radio-tracking VHF)	50
2)	Télémétrie satellite	55
a)	Argos.....	55
b)	Système de positionnement global GPS (Global Positioning System)	58
c)	GPS transmission à distance et couplage de systèmes.....	61
<input type="checkbox"/>	Les systèmes hybrides combinant plusieurs techniques : GPS-Argos, GPS-Argos-pinpoint tags.....	61
<input type="checkbox"/>	Téléchargement des données par ondes ou sans fil.....	62
<input type="checkbox"/>	ICARUS	64
3)	Système de géolocalisation GLS (Geo Localization System).....	64
E)	Autres méthodes de suivi.....	65
1)	Biologgers	65
a)	Baromètre - Altimètre	65
b)	Magnétomètre	66
c)	Accéléromètre	66
2)	Technique des isotopes stables	66
3)	Méthode ADNe et metabarcoding	67
4)	Radio Frequency Identification (RFID)	68
F)	Mise en œuvre.....	72
G)	Quelle méthode choisir et combien d'animaux équiper ?	77
1)	Un choix adapté à l'animal (masse, volume, bien-être, résistance).....	77
2)	Précision spatiale et temporelle des données	80
3)	Temps et moyens humains nécessaires	81
4)	Durée du suivi.....	82

5) Autorisations réglementaires	83
6) Choix final.....	83
II) Exemple du suivi télémétrique de <i>Motacilla Alba</i> autour d'un élevage de canards gras dans le Gers	86
A) Matériel et méthode	88
B) Résultats et discussions	92
Conclusion.....	102
Références bibliographiques	104

Tables des illustrations

Figures

Figure 1 : Principaux éléments intervenant dans la dynamique du système population-environnement (Barbault, Lebreton 2022)	20
Figure 2 : Pyramide des âges de la population de mésanges charbonnières (<i>Parus Major</i>) étudiée avec les effectifs de la première année d'observation (Peycru et al. 2014)	22
Figure 3 : Représentation schématique des principaux types de pyramides des âges (Peycru et al. 2014)	22
Figure 4 : Comparaison des moyennes de richesse en nématodes entre oiseaux migrateurs ou non migrateurs, selon leur appartenance à la famille des Ansériformes, des Accipitriformes ou des Turdidés (Koprivnikar, Leung 2015).....	25
Figure 5 : Les phénomènes de « migratory culling » et de « migratory escape » (McCoy, LPO 2021).....	26
Figure 6 : Initiatives de sciences participatives organisées par Faune France (Faune France 2022a).	28
Figure 7 : Photographies de cas de variole aviaire chez des mésanges charbonnières (<i>Parus Major</i>), utilisées comme référence par les observateurs participant à l'enquête. (Oniris, CVFSE 2014).....	30
Figure 8 : Photographie d'une chouette effraie (<i>Tito Alba</i>) prise par un piège photographique dans le cadre du programme SPOL Effraie (Mezier, Vollot 2018) ..	33
Figure 9 : Diagramme des programmes de recherche du PNRO (CRBPO 2021b) ..	40
Figure 10 : Geai à gorge blanche (<i>Aphelocoma coerulescens</i>) avec bagues colorées (Bird Banding Laboratory 2019).....	42
Figure 11 : Huîtrier d'Amérique (<i>Haematopus palliatus</i>) avec deux bagues colorées Darvic et une bague métallique (Bird Banding Laboratory 2019)	42
Figure 12 : Bernache du Canada (<i>Branta canadensis</i>) avec collier coloré Darvic au cou (Bird Banding Laboratory 2019).....	43
Figure 13 : Sarcelle d'hiver (<i>Anas crecca</i>) avec selle nasale (CRBPO 2022b).....	43
Figure 14 : Vautour de Rüppel (<i>Gyps rueppelli</i>) avec marques alaires (GREPOM 2020).	44

Figure 15 : Limicole avec bagues et banderoles colorées au tibia et au tarse et codification selon le système du British Trust for Ornithology (Faune France 2022b).	46
Figure 16 : Exemples de fixations possibles pour maintenir l'émetteur sur l'oiseau. (Duriez 2021).....	49
Figure 17 : Balise radio fréquence VHF (photo personnelle) et fonctionnement de la réception du signal radio par l'antenne Yagi (Duriez 2021)	50
Figure 18 : Les difficultés rencontrées par les oiseaux côtiers canadiens lors de leur migration. Exemple d'application du suivi des oiseaux par radio-tracking VHF (Munro, Monastersky, Krzysztofiak 2017).....	53
Figure 19 : Faucon pèlerin (<i>Falco peregrinus</i>) équipé d'une balise Argos (argos-system 2022)	56
Figure 20 : Bernaches du Canada (<i>Branta canadensis</i>) équipées de GPS (Kölzsch et al. 2016).....	60
Figure 21 : Paramètres d'alimentation des cygnes de Bewick (<i>Cygnus columbianus bewickii</i>) équipés de colliers GPS selon leur statut infectieux (Van Gils et al. 2007)	63
Figure 22 : Tourterelle des bois (<i>Streptopelia turtur</i>) équipée d'un harnais avec un capteur GLS (Boutin et al. 2011)	64
Figure 23 : Exemple de transpondeur électronique RFID utilisé chez des manchots Adélie (<i>Pygoscelis adeliae</i>) (Kremer 2017).....	68
Figure 24 : Suivi de l'activité d'un même mâle manchot Adélie (<i>Pygoscelis adeliae</i>) sur deux saisons de reproduction différentes. Suivi réalisé par des lecteurs RFID enregistrant les entrées et sorties de la colonie (Kremer 2017).....	70
Figure 25 : Filet japonais et filet plat (type tente) (Gast 2022)	74
Figure 26 : Fonctionnement d'un corral (FAO 2009)	74
Figure 27 : Schéma du fonctionnement d'un piège bal-chatri (Hull, Bloom 2001)	75
Figure 28 : Exemple de piège bal-chatri utilisé pour un projet de conservation du faucon crécerelle (<i>Falco tinnunculus</i>) (Michler et al. 2016).....	75
Figure 29 : Filet Dho-gaza (Hutchings Museum Institute 2017; Hull, Bloom 2001)...	76
Figure 30 : Séquence d'action d'une capture à l'aide d'un piège rabattable (Hull, Bloom 2001)	76
Figure 31 : Impact de la méthode de marquage sur le comportement de bernaches du Canada (<i>Branta canadensis</i>) captives (Kölzsch et al. 2016)	79

Figure 32 : Equipements possibles à utiliser selon la masse de l’oiseau ou l’intervalle souhaité entre deux positions	84
Figure 33 : Quelques exemples de suivis évoqués dans cette thèse, classés selon leur durée.	85
Figure 34 : Bergeronnette grise (<i>Motacilla Alba</i>) (photo personnelle).....	86
Figure 35 : Site d’étude de la Ferme de la Patte d’Oie, élevage de canards gras de plein air, dans le Gers (Google Maps).	87
Figure 36 : Description du matériel et de la méthode d’équipement des bergeronnettes grises	89
Figure 37 : Méthode de suivi télémétrique des bergeronnettes grises	90
Figure 38 : Fiche de suivi utilisée sur le terrain lors de la réalisation des transects routiers.....	91
Figure 39 : Récapitulatif des balises posées en février et mars 2021 sur des bergeronnettes capturées sur l’élevage d’étude.	93
Figure 40 : Jours de présence sur le site de la ferme entre le 20 février 2021 et le 20 mai 2021 pour les 8 bergeronnettes équipées lors de la première session.	94
Figure 41 : Répartition des détections des différents individus en fonction de l’heure de la journée.....	95
Figure 42 : Cartographie des transects réalisés et des points de détection des émetteurs VHF de bergeronnettes grises par l’antenne mobile du 15 mars au 20 mai 2021 (Le Gall Ladevèze 2022)	96
Figure 43 : Détections des émetteurs VHF de bergeronnettes grises par le récepteur fixe sur l’élevage et le récepteur mobile hors de l’élevage entre le 20 février et le 20 mai 2021 (Le Gall Ladevèze 2022).....	98

Tableaux

Tableau 1 : Composition d'une population de mésanges charbonnières (<i>Parus Major</i>) (Peycru et al. 2014)	21
Tableau 2 : Les techniques courantes de marquage des oiseaux sauvages (FAO 2009)	47
Tableau 3 : Avantages et inconvénients du radio tracking VHF	52
Tableau 4 : Avantages et inconvénients du système Argos	56
Tableau 5 : Avantages et inconvénients du système GPS	60
Tableau 6 : Comparaison des caractéristiques des émetteurs VHF, Argos et GPS (FAO 2009).....	84

Liste des abréviations

ADN : Acide DésoxiriboNucléique

ADNe : Acide DésoxiriboNucléique environnemental

ANSES : Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'alimentation , de l'environnement et du travail

ATLAS : Advanced Tracking and Localization of Animals in real life Systems, soit en français : systèmes de suivi avancé et de localisation d'animaux dans la vie réelle

CEBC : Centre d'Etudes Biologiques de Chizé

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

CRBPO : Centre de Recherches sur la Biologie des Populations d'Oiseaux

CVFSE : Centre Vétérinaire de la Faune Sauvage et des Ecosystèmes

DEL : Diode ElectroLuminescente

ELISA : Enzyme-Linked Immunosorbent Assay, soit en français : technique de dosage d'immunoabsorption par enzyme liée

ENVT : Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse

EURING : European Union for Bird Ringing, soit en français : union européenne du baguage ornithologique

FAO : Food and Agriculture Organisation, soit en français : organisation pour l'alimentation et l'agriculture

GLS : Geo Localization System, soit en français : système de géolocalisation

GPRS : General Packet Radio Service, soit en français : service de communication sans fil par paquets

GPS : Global Positioning System, soit en français : système de localisation mondial (par satellite)

GPX : Global Positioning eXchange, soit en français : échange de localisation mondiale

GREPOM : Groupe de Recherche pour la Protection des Oiseaux au Maroc

GSM : Global System for Mobile Communication, soit en français : système global pour les communications mobiles

IAHP : Influenza Aviaire Hautement Pathogène

ICARUS : International Cooperation for Animal Research Using Space, soit en français : coopération internationale pour la recherche animale utilisant le spatial

ISS : International Space Station, soit en français : station spatiale internationale

LPO : Ligue pour la Protection des oiseaux

MNHN : Muséum National d'Histoire Naturelle

OFB : Office Français de la Biodiversité

ONCFS : Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage

PIT : Passive Integrated Transponder, soit en français : transpondeur passif intégré

PNRO : Programme National de Recherches sur les Oiseaux

PTT : Platform Transmitter Terminal, soit en français : terminal de l'émetteur de la plateforme

RFID : Radio Frequency Identification, soit en français : identification par transpondeur électronique radiofréquence

SMS : Short Message Service, soit en français : système de message succinct

SPOL : Suivi des Populations d'Oiseaux Locaux

STOC : Suivi Temporel des Oiseaux Communs

USGS : United States Geological Survey, soit en français : institut d'études géologiques des Etats-Unis

VHF : Very High Frequency, soit en français : très haute fréquence

VIA : Virus Influenza Aviaire

VIAFP : Virus Influenza Aviaire Faiblement Pathogène

VIAHP : Virus Influenza Aviaire Hautement Pathogène

TDOA : Time Difference Of Arrival, soit en français : différence de délai d'arrivée (d'un signal)

Introduction

Les oiseaux sauvages sont des animaux particulièrement farouches et difficiles à approcher. Par ailleurs, les individus se ressemblent fortement et les différencier n'est pas toujours chose aisée. Les oiseaux se déplacent en effet trop vite, trop haut, trop loin et en trop grand nombre. Il est ainsi compliqué de réaliser des suivis individualisés sur le long terme des oiseaux avec pour simples outils sa vue et des jumelles.

De tels suivis sont pourtant nécessaires, et notamment pour une meilleure compréhension de la biologie des espèces, de leurs modes et lieux de vie. Ces informations sont primordiales dans de nombreux domaines, tels que la préservation d'espèces en danger, ou dans un contexte One Health, les oiseaux étant souvent impliqués dans les cycles épidémiologiques de nombreux agents pathogènes, parfois zoonotiques. Un bon suivi permet donc d'étudier de nombreux sujets, tels que l'impact de certaines modifications de l'environnement (réchauffement climatique, constructions humaines par exemple) sur les habitudes des oiseaux, ou la prévision de dispersion d'agents pathogènes aviaires. De nombreuses méthodes ont ainsi été développées pour réaliser des suivis rapprochés des oiseaux, mais chacune de ces méthodes n'est pas adaptée dans toutes les circonstances, selon le type d'informations à collecter mais aussi à cause de l'espèce elle-même et de son milieu de vie.

Dans ce travail nous nous sommes tout d'abord intéressés aux différentes méthodes de suivi de l'avifaune sauvage et nous avons tenté d'exposer leurs avantages et leurs inconvénients selon la question de recherche, afin de permettre aux chercheurs de choisir au mieux l'équipement adapté à leurs travaux. Nous avons également cherché à illustrer chacune de ces méthodes avec des applications pratiques en épidémiologie. Nous nous sommes intéressés uniquement aux suivis d'oiseaux vivants, mais il existe bien entendu des réseaux de surveillances et d'analyses des cadavres d'oiseaux morts.

Dans une seconde partie, nous avons tenté d'illustrer l'utilisation de ces méthodes avec un cas particulier de suivi télémétrique : celui de la Bergeronnette grise (*Motacilla Alba*) autour d'un élevage de canards gras du Gers et de ses déplacements

entre différents élevages avicoles. Cette étude s'est inscrite dans le travail de doctorat du Dr Chloé Le Gall-Ladevèze qui a notamment permis de montrer que l'avifaune commensale ne jouait *a priori* pas un rôle épidémiologique aussi important que ce qui aurait pu être imaginé (Le Gall Ladevèze 2022).

I) Les différentes méthodes de suivi des oiseaux, les avantages et les inconvénients de leur utilisation, et application dans le cadre d'études épidémiologiques

A) Objectifs du suivi d'oiseaux sauvages

1) Inventaire et étude de la dynamique des populations

Le premier objectif de ce type d'étude est de réaliser un bilan des espèces présentes sur un site pour en décrire, entre autres, l'écosystème, c'est-à-dire recenser les populations animales et végétales présentes. De manière générale, une population se définit comme étant un regroupement d'individus d'une même espèce dans un espace précis et à un moment donné, évoluant ensemble et pouvant se reproduire entre eux (Peycru et al. 2014). Cette définition n'est pas si évidente, et de nombreux scientifiques proposent des définitions différentes selon le type de recherche menée (Debouzie 1999). Par ailleurs, cette définition considère un système globalement isolé, alors qu'en réalité il y a un réseau d'interactions avec les autres êtres vivants, les conditions climatiques et l'environnement physico-chimique (figure 1). Ces approximations sont faites afin de simplifier les modélisations démographiques (Barbault, Lebreton 2022). En effet, une population est décrite entre autres par son effectif (nombre d'individus), sa densité (nombre d'individus par unité de surface ou par unité de volume) ou encore sa distribution spatiale et sa structure d'âge (figure 1).

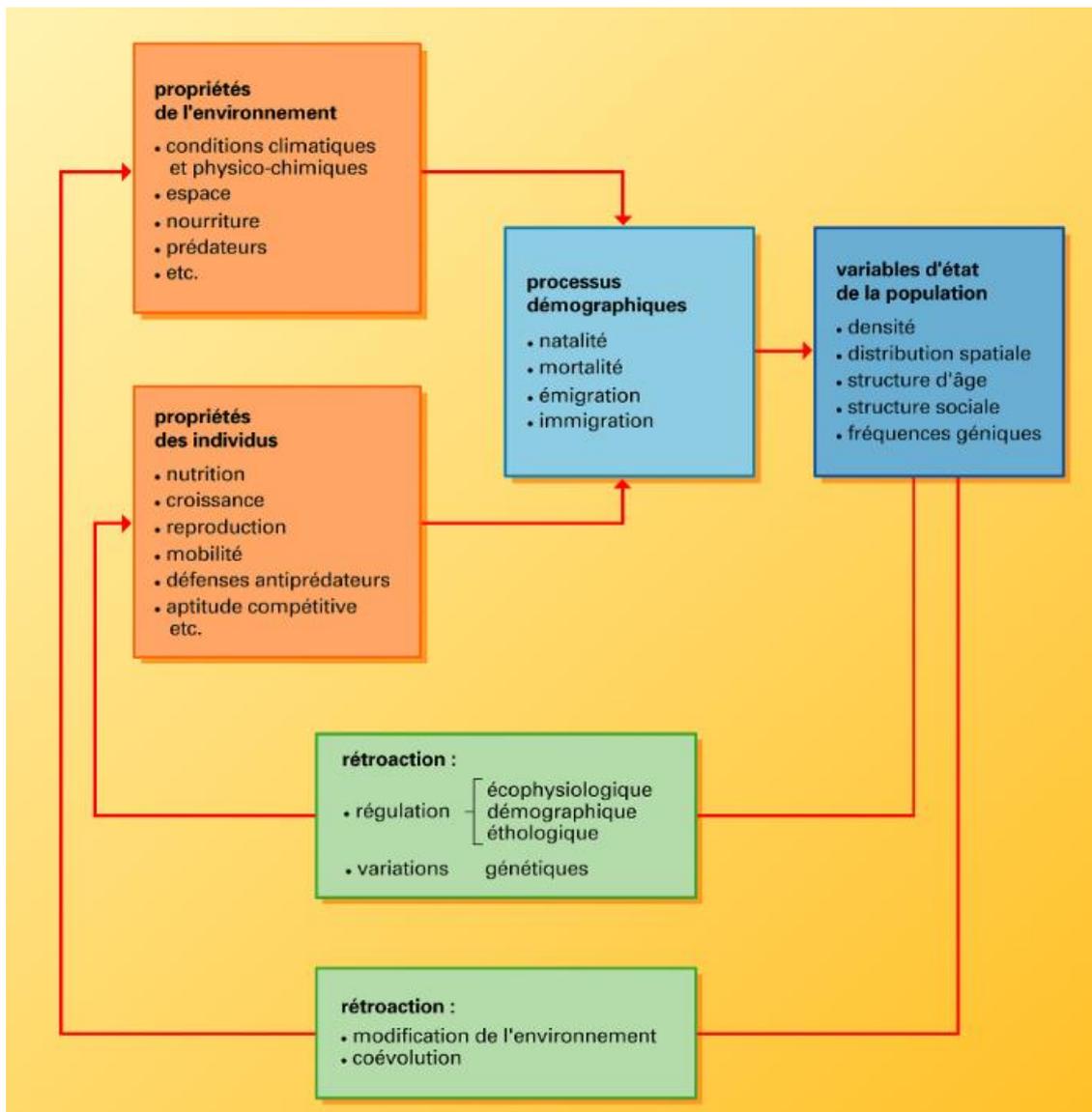


Figure 1 : Principaux éléments intervenant dans la dynamique du système population-environnement (Barbault, Lebreton 2022)

L'écosystème quant à lui se définit comme un ensemble vivant formé par un groupement de différentes populations en interrelations (nutrition, prédation, coopération), mais aussi en interaction avec leur environnement (Aufroy, Rovillé 2022).

Le comptage des individus d'une même espèce vivant dans un même écosystème permet selon certaines conditions d'estimer la taille de la population présente sur le lieu étudié et d'estimer le succès de reproduction. En effet, le succès de reproduction est fortement lié à la densité et en dessous d'une certaine densité, appelée densité minimale, le succès reproducteur est affecté de façon majeure. La

réalisation d'un inventaire au sein d'une population peut avoir plusieurs intérêts : connaître la richesse spécifique d'un milieu, évaluer les chances de reproduction, évaluer les risques de compétition pour l'utilisation de ressources communes intra mais aussi inter-espèce, ou encore évaluer les risques de transmission d'agents pathogènes (Peycru et al. 2014). En effet, le nombre d'individus dans une population va déterminer en partie sa viabilité et un nombre élevé ne sera pas nécessairement gage de survie. De fait, les individus interagissent : ils peuvent coopérer mais aussi se nuire.

Il est également important de s'intéresser à la répartition des individus dans le temps et dans l'espace. Il existe trois types de distribution spatiale des individus constituant une population : uniforme, aléatoire et agrégative. Cela correspond au comportement de chaque espèce : espèces territoriales, coloniales, grégaires etc (Peycru et al. 2014).

La population est composée de mâles et de femelles tout comme d'individus jeunes et âgés. L'estimation du nombre d'individus dans chaque catégorie fait partie de la description de la population et permet d'évaluer les chances de reproduction si on corrèle ces informations à la période de reproduction. De plus, le nombre de naissances prévisibles se calcule en fonction du nombre de femelles et du nombre de petits par portée.

Par exemple, une étude a été menée sur une population de 471 mésanges charbonnières (*Parus Major*) dont la composition est détaillée dans le tableau 1 (Peycru et al. 2014).

Tableau 1 : Composition d'une population de mésanges charbonnières (*Parus Major*) (Peycru et al. 2014)

Âge (an)	Effectif	Mâles	Femelles	Œufs pondus	Nombre d'œufs par femelle
0 – 1	241	124	117	0	0
1 – 2	128	63	65	455	7
2 – 3	67	36	31	279	9
3 – 4	30	13	17	102	6
4 – 5	5	2	3	9	3
Total	471	238	233	845	—

Les mésanges commencent à se reproduire à l'âge de deux ans et pendant les deux premières années de ponte, elles pondent en moyenne dix œufs par an. Le nombre d'œufs diminue ensuite au fil des années, jusqu'à leur mort. A partir des données du tableau 1, une pyramide des âges de la population de mésanges charbonnières a par exemple pu être réalisée (figure 2).

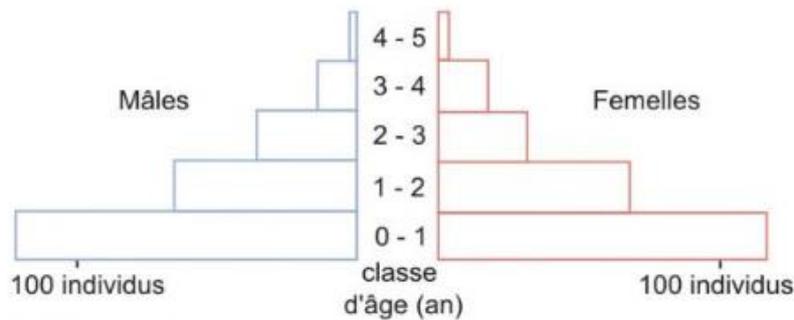


Figure 2 : Pyramide des âges de la population de mésanges charbonnières (*Parus Major*) étudiée avec les effectifs de la première année d'observation (Peycru et al. 2014)

La pyramide des âges de la figure 2 montre une structure des classes d'âge correspondant à une population en expansion. Il existe trois types de structures, mettant en évidence une population en expansion, stable, ou déclinante (figure 3).

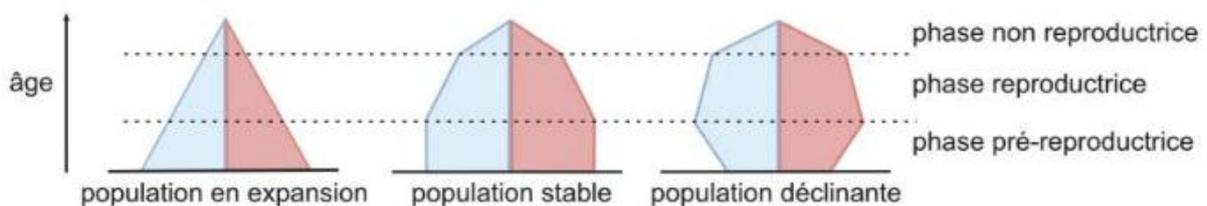


Figure 3 : Représentation schématique des principaux types de pyramides des âges (Peycru et al. 2014)

L'exemple précédent montre qu'un inventaire peut donc permettre de déterminer le modèle démographique d'une population, mais il permet également de tirer de nombreuses autres informations, comme par exemple la variation de la structure d'une population au cours des saisons. En effet, lors de la période de reproduction, des couples reproducteurs peuvent se former et rester ensemble dans un périmètre restreint autour du nid, alors que le reste de l'année tous les individus vivent ensemble. Par ailleurs, chez les oiseaux migrateurs, la population n'est présente que certains mois de l'année dans un lieu donné.

Une étude de population complète comprend donc de nombreux éléments à recenser. Il faut connaître l'effectif et la structure, c'est à dire la densité, le sexe-ratio, les classes d'âges, la distribution spatiale et temporelle et bien entendu il faut aussi avoir une bonne connaissance de l'espèce étudiée (période de reproduction, fécondité, comportement etc). Ces paramètres évoluent dans le temps et dans l'espace, c'est ce qui définit la dynamique des populations (Barbault, Lebreton 2022; Peycru et al. 2014).

La structure et l'effectif d'une population sont dépendants de facteurs de l'environnement (disponibilité en aliment par exemple), de facteurs de stress et des interactions interspécifiques (compétition, coopération, prédation, parasitisme). C'est pourquoi l'étude d'une espèce en particulier ne se fait pas sans prendre en compte ces éléments (Barbault, Lebreton 2022).

2) Etude des déplacements

Les oiseaux et en particulier les oiseaux migrateurs, peuvent parcourir des centaines voire des milliers de kilomètres par an. Ce phénomène fascine depuis longtemps les hommes, qui ont voulu savoir où les oiseaux allaient l'autre partie de l'année, en combien de temps, quelles routes ils empruntaient et comment ils survivaient à ce long périple.

Un oiseau migrateur est un oiseau qui passe sa saison de reproduction et sa saison hivernale dans des lieux distincts et qui effectue des déplacements périodiques entre ces deux zones au cours de l'année. La migration se fait souvent en groupe d'individus de la même espèce. Au contraire un oiseau sédentaire reste toute l'année sur le même territoire. La plupart des oiseaux d'Europe sont migrateurs ou au moins une partie de leur population effectue une migration, ce qui explique l'intérêt porté à ce sujet (LPO 2022a).

De nombreuses études s'intéressent au chemin parcouru par les oiseaux, aux haltes migratoires, aux sites de nidification et d'hivernage, à la préparation des oiseaux avant la migration ou encore à leur survie durant celle-ci. Cela permet notamment d'identifier les zones devant faire l'objet de mesures de protection suivant les périodes

de l'année ou les sites sur lesquels des regroupements importants d'oiseaux peuvent se produire, ce qui a un intérêt épidémiologique notamment.

L'étude des déplacements peut aussi s'appliquer à des espèces sédentaires lorsqu'il s'agit par exemple de cartographier leur environnement et de connaître leurs lieux de nourrissage, de nidification ou leurs dortoirs.

3) Etude épidémiologique

Le suivi des oiseaux sauvages peut également avoir pour but de suivre les agents pathogènes qu'ils transportent et peuvent transmettre à d'autres oiseaux, sauvages ou d'élevage, voire à d'autres espèces dont l'Homme. Afin de pouvoir prédire la distribution de ces agents pathogènes, il apparaît nécessaire d'améliorer nos connaissances en ce qui concerne leur dissémination via les mouvements des oiseaux sauvages. Par exemple les virus influenza aviaire hautement pathogènes (VIAHP) ont décimé des milliards d'oiseaux dans le monde, et le sous-type H5N1 a été retrouvé chez plus de 160 espèces d'oiseaux sauvages (USGS 2010). D'autres agents pathogènes peuvent faire l'objet de suivis épidémiologiques via le suivi des oiseaux, comme par exemple le virus du Nil occidental (West Nile Virus), ou encore l'agent de la borréliose de Lyme. Les oiseaux peuvent être de simple vecteurs (par exemple pour les tiques), porteurs sains (par exemple certains passereaux pour le virus du Nil Occidental) ou symptomatiques de la maladie (corvidés pour le virus du Nil Occidental).

En ce qui concerne les VIAHP, les études cherchent à montrer si les oiseaux sauvages peuvent être à l'origine des épizooties, s'ils peuvent être un relai entre les oiseaux d'élevage et sauvages et s'ils peuvent disséminer le virus le long de leur voie de migration. Pour cela les chercheurs peuvent par exemple regarder s'il y a une concordance entre les lieux et les dates d'apparition d'une épidémie d'IAHP et les localisations des oiseaux sauvages suivis (Takekawa et al. 2010).

A titre d'exemple, il est important de suivre les oiseaux migrateurs en raison de leur potentiel de dispersion à longue distance des agents pathogènes mais aussi car

concernant certains agents pathogènes, les oiseaux migrateurs en transportent plus que les oiseaux sédentaires (figure 4) (Koprivnikar, Leung 2015).

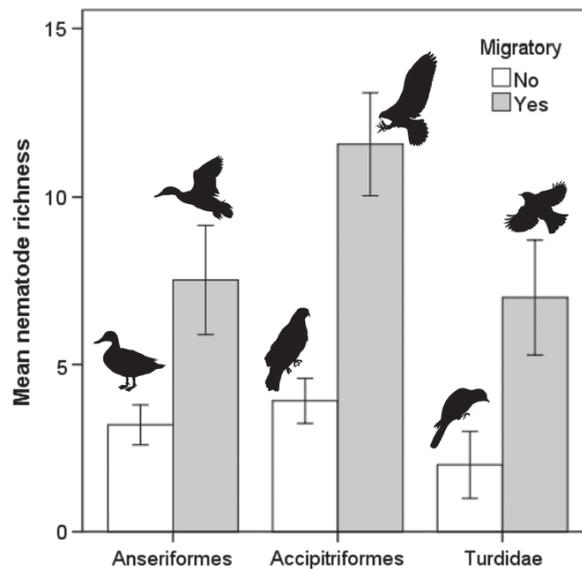


Figure 4 : Comparaison des moyennes de richesse en nématodes entre oiseaux migrateurs ou non migrateurs, selon leur appartenance à la famille des Ansériformes, des Accipitriformes ou des Turdidés (n=188). (Koprivnikar, Leung 2015)

La figure 4 montre que les oiseaux migrateurs de trois familles transportent plus de nématodes que les individus non migrateurs de ces mêmes familles, amplifiant ainsi le potentiel de dispersion de ces parasites.

Un autre exemple de l'intérêt du suivi des oiseaux pour répondre à des problématiques d'épidémiologie est l'étude du lien entre migration et frein à la dispersion d'agents pathogènes. En effet, trois types de mécanismes liés à la migration et limitant la dispersion des agents pathogènes ont pu être décrits (McCoy, LPO 2021).

- Le « migratory escape » est lié à la séparation géographique entre les oiseaux et leurs agents pathogènes, qui restent derrière eux sur le site d'hivernage ou de reproduction. La zone contaminée s'assainit pendant la période d'absence des oiseaux et sera donc saine à leur retour. Ce phénomène concerne les agents pathogènes qui peuvent persister en dehors de leur hôte, comme de nombreux helminthes, les ectoparasites et certains agents pathogènes dont la transmission est oro-fécale (Altizer, Bartel, Han 2011).

- Le « migratory culling » correspond au fait que les individus infectés n'arrivent pas au terme de leur migration car ils meurent pendant le trajet. C'est ce qui s'est passé en mars 2015 dans l'Idaho aux Etats-Unis, avec la mort de près de 2000 oies des neiges (*Anser Caerulescens*) sur leur chemin de migration, suite à l'infection par l'agent du choléra aviaire, aussi appelé pasteurellose (TVA nouvelles 2015).
- Le « migratory separation » est un processus faisant que les individus infectés migrent moins loin ou plus lentement, créant ainsi une séparation géographique et/ou temporelle entre le groupe d'oiseaux sains et le groupe d'oiseaux infectés. Ce phénomène a par exemple été mis en évidence sur des cygnes de Bewick (*Cygnus columbianus bewickii*), infectés naturellement par les virus d'influenza aviaire faiblement pathogène (VIAFP) des sous-types H6N2 et H6N8. Les cygnes infectés ont débuté leur migration plus d'un mois après les individus sains et ils ont parcouru de plus courtes distances (Van Gils et al. 2007).

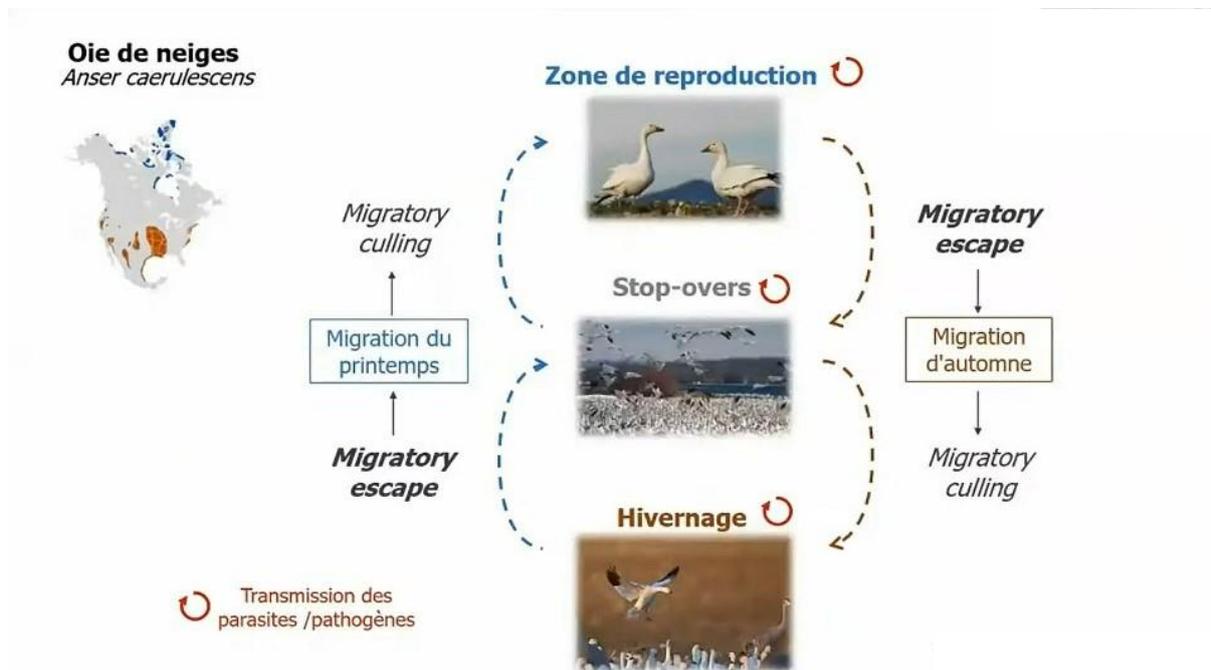


Figure 5 : Les phénomènes de « migratory culling » et de « migratory escape ». Adaptation par Karen McCoy du graphique d'Altizer et al. 2011 (McCoy, LPO 2021).

La figure 5 illustre sur le temps d'une année les mécanismes de « migratory culling » et de « migratory escape », lors des deux migrations qu'effectuent les oiseaux. Les agents pathogènes se transmettent sur les lieux d'hivernage, de reproduction et

de haltes migratoires (*stop-overs*). Ces deux phénomènes limitent la transmission, tout comme le « migratory separation » qui n'est pas décrit dans cette figure.

Les études s'intéressant à la dispersion d'un agent pathogène par les oiseaux sauvages ne sont pas si nombreuses car il est difficile de détecter et de suivre les mouvements d'oiseaux naturellement infectés et aussi car il est inenvisageable d'infecter expérimentalement des oiseaux pour les relâcher et les suivre ensuite.

Il existe des suivis uniquement axés sur la dispersion de certains agents pathogènes, utilisant par exemple des méthodes de phylogénie pour retracer la dispersion de virus au niveau international (Mine et al. 2019; Jeong et al. 2019). Ce type d'étude ne sera pas traité dans cette thèse car il ne s'agit pas d'une méthode de suivi des oiseaux sauvages appliquée à l'épidémiologie, mais une méthode de suivi de l'agent pathogène aviaire strictement. Mais ces études prouvent via les similitudes génétiques des virus provenant de divers continents qu'il y a bien des échanges intercontinentaux de virus par les oiseaux migrateurs.

B) Méthodes de suivi de type observation

1) Observation simple

La première méthode, la plus facile, est bien entendu l'observation directe ou avec des jumelles ou une longue-vue. Le principe est simple : observer les oiseaux à distance et compter le nombre d'individus de chaque espèce, voire si possible déterminer leur sexe et leur âge. Comme cela a été expliqué précédemment, les comptages permettent d'évaluer de nombreux éléments démographiques des populations d'oiseaux et d'évaluer par exemple la perte ou le gain de diversité.

La Ligue pour la Protection des Oiseaux (LPO) et le Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN) organisent d'ailleurs chaque année depuis dix ans deux weekends de recensement des oiseaux des jardins : le dernier weekend de janvier pour les oiseaux hivernants et le dernier weekend de mai pour les oiseaux nicheurs. N'importe qui peut participer et des fiches de reconnaissance sont disponibles sur le site de l'Observatoire des oiseaux des jardins https://www.oiseauxdesjardins.fr/index.php?m_id=20112 (oiseaux des jardins 2022). Il suffit de choisir au minimum un créneau d'une heure sur l'une des deux journées, de choisir un lieu d'observation (parc, balcon, jardin, en ville ou à la campagne) et de

compter et noter tous les oiseaux qui se posent dans le jardin. Cela permet d'avoir des données de comptage sur des lieux privés où les scientifiques n'ont pas accès et cela permet de sensibiliser les particuliers aux espèces d'oiseaux qui les entourent. Il est bien entendu possible de compter les oiseaux à d'autres moments de l'année et de leur envoyer les données (LPO 2022b).



Figure 6 : Initiatives de sciences participatives organisées par Faune France (Faune France 2022a).

Il existe d'autres initiatives de sciences participatives, coordonnées par Faune France notamment (<https://www.faune-france.org/>) (Faune France 2022a). La figure 6 montre les différentes façon de contribuer aux recensements d'oiseaux qu'ils proposent. Ils peuvent être généraux, en relevant toutes les espèces vues et identifiées pendant plus de cinq minutes sur un site, mais aussi plus spécifiques, concernant des espèces particulières et en faisant abstraction d'autres espèces. Par exemple, un suivi a été réalisé sur les populations nicheuses de rapaces en France. Ce sont plus de 1200 observateurs répartis dans plus de 70 départements et ayant passé des milliers d'heures sur le terrain qui ont permis d'estimer les effectifs de rapaces nicheurs, d'évaluer leur succès reproducteur et par conséquent de calculer les tendances à long terme des effectifs et de déterminer le statut de conservation des populations.

Par ailleurs, bien connaître et caractériser l'interface entre les oiseaux sauvages et domestiques est extrêmement important dans un contexte épidémiologique,

notamment avec l'émergence de maladies infectieuses transmises par les oiseaux sauvages. La quantification et la caractérisation de ces interactions sur un site en particulier (par exemple un élevage de volailles) peut se faire par simple observation, avec ou sans jumelles. Cela peut permettre de choisir les espèces d'oiseaux sauvages à étudier en priorité, de par leur proximité et interactions fréquentes avec les oiseaux d'élevage, et à quelle période de l'année il est judicieux de les étudier (Le Gall-Ladevèze et al. 2022).

La vision directe ou avec des jumelles peut aussi permettre de lire une bague, ou encore de détecter des signes d'infection. Par exemple, une surveillance spatio-temporelle de la variole de la Mésange charbonnière (*Parus Major*) a été réalisée pendant les hivers 2012-2013 et 2014-2015 (Tucoulet 2015). L'enquête, supervisée par le Centre Vétérinaire de la Faune Sauvage et des Ecosystèmes des Pays de la Loire (CVFSE), a fait appel à des témoignages (comme cela avait été fait au Royaume-Uni par LAWSON et al, 2012) pour l'observation des mésanges charbonnières. Des amateurs et des ornithologues, contactés via des réseaux naturalistes et ornithologiques, pouvaient participer à l'enquête et devaient alors envoyer leurs informations d'observation (date, lieu, nombre de mésanges atteintes de variole, localisation des nodules, environnement d'observation, et photographies des mésanges atteintes) au CVFSE. Des bagueurs ont également participé à l'enquête et avec l'avantage de la capture, plus d'informations pouvaient être récoltées.

Un document sur la variole avait été donné à chaque observateur avec des explications sur l'agent pathogène et des photos de mésanges atteintes de variole (figure 7).



© Ph. Lagabbe 2012



© F. Jallu 2011



© C. Marey 2012



© E. Michel 2012

Figure 7 : Photographies de cas de variole aviaire chez des mésanges charbonnières (*Parus Major*), utilisées comme référence par les observateurs participant à l'enquête. (Oniris, CVFSE 2014)

Ce type d'étude se nomme de l'épidémiologie participative et permet de collecter des données de qualité, ce qui permet de faire le point sur une situation et parfois de mettre en place un plan d'action. Ainsi, la vision simple ou avec des jumelles permet parfois déjà de réaliser un suivi épidémiologique intéressant.

2) Pièges photographiques

Les pièges photographiques sont des caméras qui déclenchent une prise de vue lorsque leurs capteurs mesurent un mouvement ou une variation de chaleur dans leur champ de vision (Rovero, Tobler, Sanderson 2010; O'Brien, Kinnaird 2008). Ils peuvent réaliser des photos et des vidéos, de jour comme de nuit.

Les applications sont nombreuses, comme par exemple réaliser un inventaire d'espèces, c'est-à-dire la présence et l'abondance relative (O'Brien, Kinnaird 2008),

faire un suivi de reproduction et de prédation au nid (Bradley & Marzluff, 2003), étudier le régime alimentaire (Juillard 1983) ou bien le comportement (par exemple la défense du nid, ou encore la répartition du budget-temps) (O'Brien, Kinnaird 2008). Le choix de l'emplacement du piège photographique est primordial et dépend de l'objectif de l'étude. Un piège photo peut ainsi être placé dans un nichoir pour suivre la couvaison, l'éclosion et l'évolution des poussins d'une espèce donnée, tout comme il peut être placé dans une zone de passage (un nichoir par exemple) pour évaluer la diversité des espèces présentes et mettre en évidence la présence d'espèces rares.

En terme d'épidémiologie, des pièges photographiques ont par exemple été utilisés pour quantifier et caractériser la faune sauvage présente autour d'élevages de volailles, élevées en plein-air ou non (Elbers, Gonzales 2019; Scott et al. 2018). Le but était de découvrir quels types d'interactions avaient les volailles d'élevage avec la faune sauvage. L'étude menée aux Pays-Bas cherchait à évaluer le risque de transmission de VIAHP à des élevages avicoles de plein-air et a relevé 16 familles d'oiseaux sauvages et 5 familles de mammifères qui venaient sur les lieux de vie des poules pondeuses (Elbers, Gonzales 2019). Seule une infime partie des animaux sauvages étaient présente sur le site en même temps que les volailles d'élevage et aucun contact direct n'a été observé entre les poules pondeuses et les oiseaux sauvages. Ainsi la transmission de l'agent pathogène semble se faire par contact indirect par l'eau et le sol. Dans l'étude australienne, plusieurs types d'élevage ont été équipés de pièges photographiques : aussi bien des élevages en plein air qu'en batterie, de poules pondeuses que de poulets de chair (Scott et al. 2018). De la faune sauvage a été détectée sur tous les sites, mais elle était plus souvent présente dans les fermes de poules pondeuses élevées en batterie. Les visites de la faune sauvage avaient majoritairement lieu en journée, entre 6h et 18h dans 85% des cas. Ce sont surtout des martins tristes (*Acridotheres tristis*) qui ont été observés dans 23,9% des cas, des corvidés (22,9%) et des columbiformes (7,5%). Ici aussi le contact direct était rare, ce qui laisse supposer que la transmission des agents pathogènes se fait surtout indirectement.

Les pièges photographiques sont rarement utilisés comme outil principal de suivi des oiseaux marqués, mais peuvent permettre d'augmenter le nombre de contrôles, notamment en ce qui concerne les espèces difficiles à capturer, timides, très

petites ou nocturnes (Mezier, Vollot 2018). L'utilisation de pièges photographiques pour les suivis individuels permet d'éviter les contraintes et les biais de la capture comme par exemple le stress pour l'oiseau, la nécessité d'avoir un bagueur sur place, et l'apprentissage et l'évitement des filets. Le travail se concentre donc principalement *a posteriori* avec le visionnage et l'analyse des photos ou des vidéos.

La principale problématique des pièges photographiques est la netteté de l'image, qui dépend de la vitesse de prise de vue et la distance minimale de mise au point, ce qui est difficile avec des petits oiseaux très vifs et très proches de l'objectif, surtout s'il s'agit de pouvoir lire l'inscription de la bague métallique (avec des bagues Darvic le problème se pose moins car l'inscription est en caractères plus gros). La buée, le contre-jour ou encore de la saleté sur l'objectif peuvent compromettre la lecture de certaines photos et vidéos. De nuit, l'éclairage de la zone du piège photographique peut être fait par des DELs noires ou rouges. Les DELs noires sont invisibles pour les humains et les animaux contrairement aux DELs rouges, mais leur portée est plus faible. Il existe de nombreux pièges photographiques différents, plus ou moins qualitatifs ou surtout plus ou moins adaptés à certains objectifs de suivi.

Dans le cadre du programme SPOL Effraie, des pièges photographiques ont été installés devant des nichoirs ou reposoirs adaptés à l'Effraie des clochers (*Tito alba*) (figure 8). Cela a permis de suivre l'occupation du nichoir et de voir que les individus sont la plupart du temps fidèles à leur site de nidification d'une année sur l'autre (Mezier, Vollot 2018). L'objectif serait également d'obtenir des informations sur la dispersion des poussins.



Figure 8 : Photographie d'une chouette effraie (*Tito Alba*) prise par un piège photographique dans le cadre du programme SPOL Effraie (Mezier, Vollot 2018)

Des appareils photos et des caméras, éventuellement infrarouges ou thermiques, peuvent également être équipés sur des drones afin de faire des suivis tels que du comptage d'oiseaux sauvages (Hodgson et al. 2016). Le recours au drone permet de ratisser rapidement de grandes surfaces, y compris inaccessibles, mais cette technique est chère et l'autonomie est faible. Elle est également soumise à la réglementation assez stricte sur l'utilisation de drones. Une étude a montré que 80% des oiseaux ne semblent pas dérangés par des drones volant à quatre mètres d'eux (Vas et al. 2015). Cette étude s'est basée sur environ 200 approches par drone sur des oiseaux appartenant à trois espèces différentes : des canards colverts (*Anas platyrhynchos*), des flamands roses (*Phoenicopterus roseus*) et des chevaliers aboyeurs (*Tringa nebularia*), certains semi-captifs (canards colverts) et d'autres complètement sauvages (flamands roses et chevaliers aboyeurs). Aucune réaction à l'approche du drone quadricoptère n'a été observée dans la grande majorité des cas. La couleur du drone, sa vitesse d'approche et les approches répétées n'avaient aucun effet sur les réactions des oiseaux. En revanche, l'angle d'approche du drone avait une importance : lorsque celui-ci s'approchait par le haut, les oiseaux étaient plus

effrayés. Par ailleurs, le départ du drone devait se faire à 400m au moins des oiseaux pour que le décollage ne les effraie pas.

3) Radars météorologiques

Lorsqu'ils volent trop haut ou lorsqu'il fait nuit, les oiseaux ne sont pas visibles pour les observateurs, c'est pourquoi certains équipements spécifiques sont utilisés pour pallier au manque d'informations à ce sujet. L'atout principal des radars météorologiques est qu'ils sont déjà implantés à travers les territoires et que le suivi des oiseaux ne demande donc qu'une analyse adaptée de données déjà obtenues pour d'autres raisons.

Les radars météorologiques permettent de détecter le vol d'oiseaux jusqu'à trois km d'altitude, de jour comme de nuit (Mission Migration 2022). Ils permettent d'obtenir des informations sur la distribution spatiale et l'altitude des oiseaux en vol, ainsi que sur la direction de vol (Nussbaumer et al. 2019). Cependant, ils ne permettent pas la reconnaissance des espèces survolant le site, même si des radars de poursuite dits « 3D » ou « Birdscan » sont en cours de développement et d'installation. Les radars, aux puissances et longueurs d'ondes utilisées, ne modifient pas le comportement de vol des oiseaux (Bruderer, Peter, Steuri 1999).

Des études utilisant cette technique ont par exemple permis de mettre en évidence des comportements de vol différents entre le jour et la nuit. Les oiseaux volent en groupe serré en journée lorsque la visibilité est bonne, et volent en groupe plus étendu en largeur la nuit (Eastwood 1967). C'est également grâce aux radars qu'il est apparu que le flux nocturne est bien plus important que le flux diurne (72% des mouvements sont nocturnes), ou encore que les altitudes de vol ne sont pas les mêmes entre le jour et la nuit (Govaere et al. 2008). Techniquement, ce sont uniquement les oiseaux en vol qui sont détectés par les radars mais une étude a permis d'extrapoler les données afin de mettre en évidence les oiseaux qui se posent au sol et qui repartent (Nussbaumer et al. 2021). Cela a permis de modéliser les flux et de suivre des trajets de migration et les haltes migratoires.

En termes d'applications pratiques, le radar peut permettre, en amont d'un projet d'installation d'un parc éolien, d'étudier et de quantifier le passage d'oiseaux en

vol au-dessus du site. Une fois les éoliennes installées, la technologie radar continue d'être utilisée pour détecter les oiseaux et mettre alors en œuvre de méthodes pour les effaroucher ou ralentir ou arrêter les turbines. Il a été montré que la majorité des collisions avec des éoliennes avaient lieu lors des migrations nocturnes, quelle que soit la densité d'oiseaux migrateurs en vol (Aschwanden et al. 2018). L'arrêt des turbines est appelé bridage. Ce bridage peut avoir lieu à certains horaires connus comme étant propice aux passages d'oiseaux, ou suite à la détection d'un oiseau ou groupe d'oiseaux en approche ou encore lorsque des travaux agricoles sont en cours dans les parcelles alentours. Les « Birdscan » ou « Birdradar » vont encore plus loin puisqu'en identifiant l'espèce et le nombre d'oiseaux en approche d'un parc éolien, il est possible d'arrêter les turbines au-delà d'un certain nombre d'individus ou juste pour quelques individus en cas d'espèce protégée par exemple (Vogelwarte 2022; Swiss Bird Radar 2021). Un « Birdscan » est un système radar compact qui utilise un cône vertical de faisceaux orientés verticalement et avec une ouverture étroite. Il peut permettre de détecter des oiseaux, chauves-souris et insectes. Les échos obtenus permettent de déterminer le battement d'aile, de caractériser la taille des individus et de les grouper en catégories. La direction et la vitesse sont également mesurées, et le tout est automatisé. Un « Birdscan » permet de suivre les mouvements des oiseaux de petite taille jusqu'à 1000m au-dessus du sol, et 2000m pour les oiseaux de grande taille.

Les radars météorologiques ont par exemple aussi permis de démontrer le déclin de la population d'oiseaux en Amérique du Nord, via des suivis sur de longues périodes et en comparant la taille des effectifs entre les années (Rosenberg et al. 2019).

Enfin, le Cornell Lab of Ornithology utilise les radars météorologiques pour créer des cartes de prédiction des migrations (Cornell Lab of Ornithology 2022). Cela permet par exemple d'arrêter les turbines des éoliennes, mais aussi aux scientifiques de savoir où se rendre pour observer la migration de certains oiseaux.

4) Enregistrements acoustiques

L'enregistrement acoustique permet de déterminer les espèces d'oiseaux migrateurs passant au-dessus d'un lieu, ou de mettre en évidence la présence de certaines espèces rares, par reconnaissance de leurs cris. Les enregistrements peuvent avoir lieu de jour comme de nuit, mais l'intérêt se porte principalement sur les enregistrements nocturnes car peu de données sont disponibles sur la migration nocturne en comparaison avec la migration diurne. Ces enregistrements peuvent aussi permettre de détecter la présence d'espèces d'oiseaux locaux très discrètes ou très rares, dont la présence était sous-estimée voire inconnue via l'utilisation des méthodes traditionnelles (Farnsworth 2005). Le projet Vol de Nuit de la LPO, débuté en 2020 et élargi en 2021, veut étudier la migration, les mouvements et la phénologie des espèces d'oiseaux dans les Pyrénées, par l'équipement d'une quinzaine de sites avec des capteurs acoustiques passifs (LPO 2022c). Le but serait également de trouver une méthode efficace et rapide d'analyse de ces données. En effet, l'identification des cris à partir d'un enregistrement est un travail long et fastidieux, et améliorer les capacités d'identification avec par exemple l'automatisation de ce travail permettrait d'analyser de plus grandes quantités d'enregistrements. Des chercheurs tentent de mettre au point un tel système (Connor, Li, Li 2012).

Pendant la migration, de jour comme de nuit, les oiseaux vocalisent, soit pour maintenir la cohésion de groupe pour les espèces grégaires, ou pour informer à distance de la trajectoire pour les vols très dispersés (Sallé, Pontalier, Coiffard 2020). De nombreuses espèces différentes émettent de telles vocalises. Parmi celles qui en émettent le plus peuvent être citées les anatidés ou les limicoles.

Les enregistrements sont soumis à des biais liés aux conditions météorologiques et à la géographie locale, et leur interprétation doit être précautionneuse pour ne pas confondre mouvements locaux et migration.

L'enregistrement acoustique peut donc permettre d'affiner la présence ou le passage de certaines espèces d'oiseaux sur un territoire donné. De telles informations sont précieuses. D'un point de vue épidémiologique, le fait de connaître les lieux de passage de certaines espèces d'oiseaux peut permettre de mesurer les risques de dispersion d'agents pathogènes dont elles sont le réservoir.

Par ailleurs, dans un autre contexte, les enregistrements acoustiques peuvent aller jusqu'à la reconnaissance des individus. C'est le cas de la Bécasse des bois (*Scolopax rusticola*) par exemple, pour laquelle les chercheurs sont en train de développer une méthode de reconnaissance individuelle des mâles par les variations de leurs chants pendant la croûle (Mollet et al. 2021; Zimmermann, Santiago 2019).

C) Méthodes de suivi de type marque visuelle : baguage et autres marquages corporels

1) Bagues métalliques

Le baguage est la technique de suivi individuel des oiseaux la plus utilisée à grande échelle. Cette technique est ancienne puisqu'elle est réalisée en France depuis 1911. Depuis, plus de six millions d'oiseaux ont été bagués (CRBPO 2021a). Le baguage a bouleversé les connaissances sur l'avifaune sauvage, et en particulier en ce qui concerne les migrations. Baguer consiste à apposer une bague métallique ou plastique numérotée sur le tarse ou le tibia des oiseaux. Le numéro est unique et une mention permet de déterminer la centrale nationale qui a émis la bague et qu'il faut informer si l'oiseau est retrouvé. En France, la centrale de baguage principale est depuis 1923 le Centre de Recherche sur la Biologie des Populations d'Oiseaux (CRBPO), géré par le Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris (MNHN), sous l'autorité du Ministère de l'Ecologie. Les bagues apposées en France comportent donc la mention "OIS. MUSEUM PARIS", "OIS. MUS. PARIS" ou "MUSEUM PARIS" (ONCFS 2018). Chaque centrale nationale transmet ses données à l'échelle internationale. En Europe par exemple, la mise en commun des données se fait via l'organisation EURING (European Union for Bird Ringing).

Lorsqu'un oiseau bagué est recapturé, on parle de "contrôle" d'un oiseau et s'il est retrouvé mort, on parle de "reprise" de bague (ONCFS 2018). Ce sont les observateurs qui transmettent alors les informations relatives à la découverte de l'oiseau bagué. Les informations sont à transmettre au CRBPO. Si l'oiseau est vivant, il faut transmettre le numéro de la bague (et si possible le libellé complet pour connaître la centrale nationale émettrice de la bague), la date et l'heure de découverte, le lieu exact voire dans l'idéal les coordonnées GPS du lieu de découverte, les circonstances de découverte et l'espèce présumée. Si l'oiseau est mort, il faut renvoyer la bague

aplatie au CRBPO avec les mêmes informations ainsi que dans l'idéal des détails sur l'état du cadavre (frais, ancien, traces de morsures, ...) et si possible sur les circonstances de la mort (collision, prédation, ...) (LPO 2022d). Il est possible de transmettre anonymement ces informations, mais si l'observateur transmet ses coordonnées, il peut recevoir en retour l'historique détaillé de l'oiseau (ONCFS 2018). Plus ces informations sont détaillées, plus les données sont exploitables scientifiquement. Cela permet par exemple d'estimer les causes et taux de mortalité au cours du temps, de notifier des échanges d'individus entre populations, d'étudier les voies de migration, de mesurer les conséquences des modifications de l'environnement, ou encore de connaître la structure des populations (âge, sexe ...). Ces données, entièrement numériques depuis 2000 et en cours d'informatisation pour les archives, sont consultables par tout un chacun sur la plateforme en ligne <https://crbpodata.mnhn.fr/> (CRBPO 2022a). Elles sont beaucoup utilisées par l'Office Français de la Biodiversité (OFB), en particulier pour la conservation et la gestion durable des espèces. C'est souvent en période de nidification ou d'hivernage que sont réalisées les opérations de baguage afin de pouvoir mettre en évidence des corrélations espèce-environnement.

N'importe qui ne peut pas baguer un oiseau : un bagueur doit être agréé. Cela nécessite une formation, avec des connaissances théoriques et de terrain évaluées par des examens, ainsi que des compétences techniques pour que toutes les étapes de capture, de mesures et de marquage soient faites sans aucun risque pour l'oiseau (CRBPO 2021a; ONCFS 2018). En France on compte environ 650 bagueurs, bénévoles ou professionnels, et ce ne sont pas moins de 350 000 oiseaux qui sont bagués chaque année. Le bagueur doit savoir reconnaître parfaitement les espèces d'oiseaux : certaines sont facilement identifiables mais d'autres nécessitent de connaître des critères spécifiques comme la formule alaire. Le bagueur doit également pouvoir reconnaître le sexe et l'âge de l'oiseau capturé afin que les données récoltées soient les plus fiables et précises possible. Il peut noter également sa masse, évaluer l'épaisseur de la graisse, mesurer l'aile, le tarse, la queue, la longueur et la profondeur du bec, noter l'étape de mue et selon l'espèce la présence d'une plaque incubatrice (plaque déplumée sur le ventre au moment de la couve des œufs). Un bagueur agréé a des obligations : celle de réaliser des opérations de baguage dans le cadre de projets scientifiques bien définis et celle de transmettre chaque année à la

centrale nationale les données qu'il a collectées. L'OFB a de nombreux bagueurs agréés ce qui fait de lui le premier contributeur au baguage des espèces chassables en France (bécassines, colombidés, bécasses, limicoles, anatidés).

Il existe des programmes de baguage spécifiques, organisés par le Programme National de Recherches sur les Oiseaux (PNRO), et qui sont organisés en trois axes (CRBPO 2021b).

Le premier axe correspond aux recherches avec des répétitions de capture sur un site défini et avec les mêmes modalités pendant plusieurs années, avec pour objectif d'étudier la dynamique des populations. Il y a deux types de suivis au sein du premier axe : le programme "STOC-Capture", ce qui signifie Suivi Temporel des Oiseaux Communs, et le programme SPOL (Suivi des Populations d'Oiseaux Locaux). Le premier s'intéresse plutôt aux fluctuations d'effectifs de toutes les espèces sur un site défini, et le second étudie des espèces précises et les variations de certains paramètres démographiques en particulier (probabilité de survie, taux de migration partiel, renouvellement de population,...). Le programme STOC-capture a par exemple mis en évidence une forte baisse des populations nicheuses de Pouillot fitis (*Phylloscopus trochilus*) en France (Mission Migration 2022). Le programme SPOL est décliné en différents sous-programmes, axés autour d'espèces en particulier (par exemple l'Effraie des clochers) ou de types de lieux (par exemple la mangeoire).

Le deuxième axe s'intéresse à la migration et à la dispersion des individus. Ce sont trois grands types de programmes, étudiant par exemple la phénologie de la migration, le processus de halte migratoire (Programme SEJOUR), les voies de migration, les migrations "éruptives", ou encore la dispersion post-juvéniles des oiseaux gibiers.

Le troisième axe comprend tous les programmes nécessitant une autorisation du CRBPO, comme c'est le cas des programmes personnels (comprenant toutes les demandes de pose de technologies embarquées ou de prélèvements sur les oiseaux) et des participations au thème RARE. Le thème RARE permet la capture d'un individu pour lequel les spécialistes n'arrivent pas à identifier le taxon (espèce ou sous-espèce) et si la capture apporte un réel bénéfice au processus d'identification de ce taxon reconnu comme rare. La capture et le baguage d'un tel individu sont autorisés dans ce seul et unique cadre car sans l'examiner en main, voire sans analyser du tissu, son identification serait impossible. Le but du thème RARE n'est pas de baguer un oiseau

rare pour suivre ses déplacements, ni de permettre à un bagueur de capturer un oiseau qu'il n'arrive pas à identifier. La capture ne sera autorisée par le CRBPO qu'après étude d'un dossier prouvant la réelle nécessité et plus-value scientifique qu'apporterait la capture de cet individu (CNRS, CRBPO, MNHN 2016).

Les trois axes sont représentés et détaillés sur le diagramme de la figure 9. En dehors de ces trois axes, il y a aussi des projets à court terme, auxquels les bagueurs sont invités à collaborer.

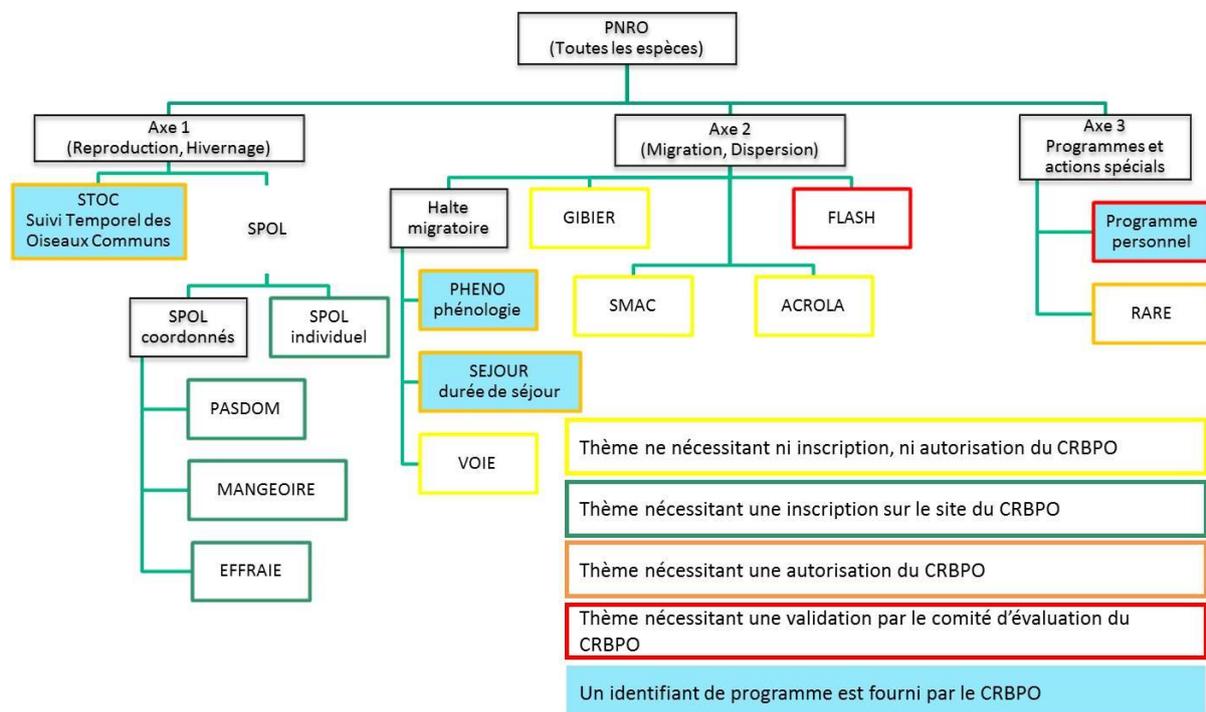


Figure 9 : Diagramme des programmes de recherche du PNRO (CRBPO 2021b)

Les étiquettes de palmure sont un cas un peu particulier de marquage puisqu'elles sont posées uniquement sur des poussins et remplacent la bague métallique classique le temps que l'oiseau atteigne sa taille adulte. Elles sont utilisées principalement lors d'études sur la croissance et la survie des poussins, et l'âge de l'animal sera alors connu avec précision. Parfois, pour éviter la méthode invasive d'étiquette de palmure, qui nécessite de percer la peau, des bagues remplies d'argile ou de pâte à modeler sont mises aux tarses des poussins. En grandissant l'argile s'effrite progressivement et un fois adulte, l'oiseau sera déjà équipé d'une bague à sa taille (Bird Banding Laboratory 2019).

- En plus des bagues en métal classiques, il existe aussi :
- des bagues fermées, réservées aux oiseaux d'élevage comme par exemple les pigeons voyageurs,
 - des marques de couleur pour les oiseaux sauvages.

2) Marquages colorés

Les marques colorées (Bird Banding Laboratory 2019; CRBPO 2022b; ONCFS 2018) sont plus facilement visibles et lisibles à distance, ce qui permet de ne pas recapter l'oiseau. Il s'agit par conséquent d'une méthode de capture - marquage - réobservation (FAO 2009). Le principal défaut en revanche de ces marques colorées est l'altération de la couleur avec le temps. La totalité des programmes de marquage par marques colorées sont détaillés sur le site du European Colour-Ring Birding : www.cr-birding.org (European colour-ring Birding 2022). Toute observation d'un oiseau équipé de marques colorées doit être relatée au responsable du projet, dont le nom et les coordonnées sont disponibles sur le site.

a) Bagues colorées simples et DARVIC

Il existe de nombreuses techniques utilisant des marques colorées et la technique la plus simple de marquage permanent correspond aux bagues colorées n'ayant pas d'inscription. Leur forme peut varier entre un anneau coloré simple et une banderole (anneau coloré prolongé sur le côté par une languette). Les bagues colorées peuvent être mises sur des oiseaux de toute taille, allant des passereaux (figure 10) aux ardéidés. C'est la combinaison de couleurs qui servira à la reconnaissance de l'individu (Jamault 2007; Faune France 2022b; FAO 2009; Bird Banding Laboratory 2019).



Figure 10 : Geai à gorge blanche (*Aphelocoma coerulescens*) avec bagues colorées (Bird Banding Laboratory 2019) (DR Margaret M. Sloane).

Les bagues colorées Darvic comportent quant à elles une inscription gravée (code alphanumérique). Pour que celle-ci soit suffisamment lisible, la bague doit donc être suffisamment grande. C'est pourquoi elles ne peuvent pas être posées sur des petites espèces et sont au contraire particulièrement répandues pour les oiseaux aux pattes longues comme les limicoles (Jamault 2007; Bird Banding Laboratory 2019) (figure 11). Pour ces bagues il faudra être attentif à la couleur de la bague ainsi qu'à la couleur du code alphanumérique. Les bagues Darvic sont la plupart du temps utilisées seules : une bague Darvic sur une patte et la bague du Muséum sur l'autre patte.



Figure 11 : Huîtrier d'Amérique (*Haematopus palliatus*) avec deux bagues colorées Darvic et une bague métallique (Bird Banding Laboratory 2019) (DR Jim Bennight).

b) Colliers

Les colliers sont l'équivalent d'une bague Darvic, mais fixés au cou de l'oiseau. Ils sont souvent utilisés chez les anatidés à long cou (cygnes, oies) car leurs tarses sont rarement visibles (Jamault 2007) (figure 12).



Figure 12 : Bernache du Canada (*Branta canadensis*) avec collier coloré Darvic au cou (Bird Banding Laboratory 2019) (DR Anna Ginsberg).

c) Disques nasaux et selles nasales

Les disques nasaux et les selles nasales, utilisés chez les anatidés, sont bien tolérés mais considérés comme invasifs car ils se fixent directement sur les narines de l'oiseau (FAO 2009). Les disques nasaux sont deux plaques de plastique colorées, chacune fixée sur une narine, avec une forme particulière (ronde, rectangulaire ...). Les selles nasales (figure 13) recouvrent l'arête du bec et comportent des inscriptions comme une bague Darvic (Bird Banding Laboratory 2019; Jamault 2007; Faune France 2022b). La mise en place de ces dispositifs est particulièrement minutieuse car s'ils sont mal mis, il y a un risque d'enchevêtrement dans la végétation.



Figure 13 : Sarcelle d'hiver (*Anas crecca*) avec selle nasale (CRBPO 2022b).

d) Marques alaires

Parmi les marques colorées, la pose de marques alaires – aussi appelées étiquettes patagiales – est une procédure invasive puisque la peau doit être percée (FAO 2009). Il s'agit d'une marque fixée généralement par du fil nylon et des rondelles

plastiques, en principe sur chaque aile. La peau de l'aile est percée avec une aiguille hypodermique modifiée, dans laquelle le fil nylon est passé, puis l'aiguille est retirée et la marque est fixée avec le fil nylon resté en place dans la peau (Claridge 1990). Un biais lié à la gêne de l'opération doit donc être pris en compte. Les marques alaires sont fixées sur le bord d'attaque (antérieur) de l'aile, ce qui permet de voir le marquage de l'oiseau, qu'il soit au sol, perché ou en vol. Tout comme sur une bague Darvic, un code alphanumérique est lisible (figure 14). Les marques alaires sont régulièrement utilisées chez les laridés, ardéidés et rapaces (Jamault 2007). Par exemple la LPO a mis en place dans le cadre de la Mission Rapaces, un programme de marquage alaire des milans royaux (LPO Mission Rapaces 2010). Cependant, il a été montré que les marques alaires peuvent avoir un effet néfaste sur les oiseaux équipés. En effet une étude a été menée sur des vautours chasseur (*Gyps coprotheres*) sauvages et captifs pour comparer leurs performances de vol selon s'ils étaient marqués par des bagues colorées ou par des marques alaires (Curk et al. 2021). Ainsi, les individus équipés avec les étiquettes patagiales étaient moins susceptibles de voler, parcouraient des distances plus courtes et volaient plus lentement que les oiseaux équipés avec les bagues colorées.



Figure 14 : Vautour de Rüppel (*Gyps rueppelli*) avec marques alaires (GREPOM 2020).

e) Ruban coloré

Les exemples précédents ont montré que la plupart des marques colorées permettent de différencier les individus marqués les uns des autres. Ce n'est pas le cas des rubans colorés (FAO 2009). La méthode consiste à attacher un ruban coloré en plastique sur les bagues, le collier ou les rectrices de l'oiseau. Le ruban doit être suffisamment visible mais ne doit pas trop dépasser pour autant, afin de ne pas déséquilibrer l'oiseau et de lui éviter de s'enchevêtrer dans la végétation.

f) Colorations et décolorations du plumage

Concernant les (dé)colorants de plumage, la différenciation entre individus dépend du protocole réalisé : parfois des codes par la décoloration de certaines rémiges uniquement permet de reconnaître certains individus. La méthode de coloration ou décoloration des plumes est utilisée surtout sur des oiseaux de couleur uniforme et doit être synchrone avec la mue pour que la marque reste présente le plus longtemps possible. La coloration peut également être passive : par exemple en colorant temporairement l'eau d'un élevage de volailles de plein air, puis en cherchant les oiseaux sauvages colorés. Cela peut mettre en évidence des mouvements entre les élevages et les zones humides naturelles (FAO 2009). Ce sont ces mouvements que l'on cherche particulièrement à éviter lors d'épizooties aviaires.

Le marquage par ruban de couleur ainsi que le marquage par coloration ou décoloration du plumage sont des marquages visibles depuis de longues distances mais qui ne durent pas très longtemps.

g) Lecture du code de ces marques visuelles

Sur chaque individu, il peut y avoir jusqu'à quatre marques de couleur sur chaque tibia et chaque tarse, jusqu'à deux marques sur les ailes et le cou et une marque nasale (disque ou selle). C'est la combinaison des marques colorées (autres que colorants et rubans) qui permet de reconnaître individuellement chaque oiseau et le programme auquel il appartient (Faune France 2022b). La bague métallique peut parfois faire partie du code. Les données sont récoltées via des plateformes internet, et il est important que tous les programmes de marquage soient coordonnés au niveau

national et international pour éviter des contradictions avec d'autres programmes en cours.

Une codification est utilisée pour décrire un oiseau ayant des marques colorées (autres que colorants et rubans) et le système international développé par le *British Trust for Ornithology* semble être le plus utilisé (Faune France 2022b). Selon cette méthode, la lecture des marques colorées se fait en partant de la patte gauche de l'animal et de haut en bas. Cette codification commence par décrire le type et la position de la marque, puis sa couleur et la couleur de l'inscription, et enfin le cas échéant l'inscription qu'elle comporte. Un exemple est présenté en figure 15.



Figure 15 : Limicole avec bagues et banderoles colorées au tibia et au tarse et codification selon le système du *British Trust for Ornithology* (Faune France 2022b).

Le code de la figure 15 se comprend ainsi :

- LABF : LA signifie Left Above, c'est-à-dire le tibia gauche (au-dessus de l'articulation), B équivaut à Blue (bleu) et le F correspond à Flag (banderole). Il y a donc une banderole bleue sur le tibia gauche.
- LBR,B : LB signifie Left Below, c'est-à-dire le tarse gauche (au-dessus des doigts), R équivaut à Red (rouge) et le B correspond à Blue (bleu). Il y a donc deux bagues sur le tarse gauche, celle du haut est rouge et celle de bas est bleue.
- RAM : RA signifie Right Above (tibia droit) et le M correspond à une bague métallique.

- RBB,W : RB signifie Right Below (tarse droit), B indique du bleu, et le W désigne White (blanc). Il y a donc deux bagues sur le tarse droit, celle du haut est bleue et celle de bas est blanche.

Les principales techniques de marquage des oiseaux sauvages sont récapitulées dans le tableau suivant (tableau 2).

Tableau 2 : Les techniques courantes de marquage des oiseaux sauvages (FAO 2009)

Les techniques de marquage de la faune sauvage d'usage courant dans les études d'oiseaux*					
Technique de marquage	ID	Invasive	Codes	Recapture-Réobservation	Durée
Bagues					
Metal	Ind	Non	Numérique	Recapture	Vie
Plastique, Darvic	Ind	Non	Couleur	Réobservation	Mois/Vie
Colliers	Ind	Non	Couleur+numérique	Réobservation	Vie
Disques Nasaux	Ind	Inv	Couleur+forme	Réobservation	Vie
Selles Nasales	Ind	Inv	Couleur+numérique	Réobservation	Vie
Rubans	Groupe	Non	Couleur	Réobservation	Semaines
Banderoles	Ind	Non	Couleur+numérique	Réobservation	Vie
Colorants de plumage	Groupe	Non	Couleur	Réobservation	Semaines
Étiquettes Patagiales	les deux	Inv	Couleur+numérique	les deux	Vie
Étiquettes de palmure	les deux	Inv	Couleur+numérique	les deux	Vie

* Les caractéristiques de chaque technique indiquent si la marque permet d'identifier les oiseaux comme des individus (Ind) ou en groupe; si la technique est invasive (invasive [Inv] ou non-invasive [Non]); si les codes numériques, de la couleur ou de la forme sont utilisés pour l'identification des oiseaux marqués; si les données sont obtenues par le moyen de la recapture ou de la réobservation; et la durée de la marque

h) Applications en épidémiologie

Appliqué à l'épidémiologie, le baguage permet d'éviter d'échantillonner plusieurs fois le même individu dans le cadre de la recherche d'un agent pathogène, et peut également permettre de suivre l'état de santé d'un oiseau infecté s'il est recapturé plusieurs fois, permettant de connaître l'évolution de l'infection dans le temps.

Reprenons l'exemple du suivi de la variole aviaire chez Mésange charbonnière (*Parus Major*), déjà évoqué précédemment (Tucoulet 2015). En plus des observations à distance par un public averti d'amateurs et d'ornithologues, les bagueurs du programme SPOL Mangeoire avaient la possibilité de prendre part à l'étude en spécifiant, à chaque capture d'une mésange charbonnière et après examen visuel, la présence ou non de nodules. Les renseignements complets comprenaient la date et le lieu de l'observation, le numéro de la bague et si possible une photographie de la

mésange. Ce deuxième volet de l'étude correspond aussi à de l'épidémiologie participative. Il est important de prendre en compte que le suivi d'un agent pathogène chez une espèce d'animal sauvage inclut forcément un biais d'échantillonnage par absence de tirage aléatoire (par exemple un oiseau sain et un oiseau infecté n'auront pas la même probabilité d'être capturés). Ainsi, le baguage des oiseaux peut permettre aux bagueurs de prendre part à des études épidémiologiques.

De plus, une étude menée aux Emirats Arabes Unis s'est servie du marquage des oiseaux par des bagues métalliques (gravées avec un code alphanumérique unique à chaque oiseau) pour étudier la dynamique de transmission du virus de la maladie de Newcastle chez les oiseaux péri-domestiques (Hirschinger et al. 2021). Pendant deux ans, des sessions de capture-recapture ont été menées autour de deux sites d'élevage et de conservation de l'Outarde houbara (*Chlamydotis macqueenii*). Un prélèvement sanguin était réalisé sur les oiseaux capturés, afin de rechercher le virus de la maladie de Newcastle grâce à un test sérologique ELISA. Les bagues permettaient entre autre de ne pas reprélever le même individu si un mois complet ne s'était pas écoulé depuis son précédent prélèvement. Les bagues ont bien entendu également permis de différencier les individus entre eux et de répertorier leur espèce, âge et sexe et de suivre leur statut sérologique au cours du temps. Ainsi, les résultats ont montré que certaines espèces avaient plus de probabilité d'être séropositives au virus de la maladie de Newcastle, ce qui concordait avec la littérature. Par ailleurs, les adultes étaient plus souvent séropositifs que les juvéniles, quelle que soit l'espèce. Les individus séropositifs avaient une probabilité de survie plus élevée que les séronégatifs, bien que cela dépendait du site de capture, montrant l'implication de l'environnement et des interactions telles que la compétition, la prédation ou encore le parasitisme. Enfin, la survie à l'infection dépendait de l'espèce et il a été montré que le virus de la maladie de Newcastle circulait davantage en 2017 qu'en 2016. Des paramètres démographiques et épidémiologiques de la maladie de Newcastle ont par conséquent pu être estimés grâce à cette étude. Ainsi, comme cela a été montré avec cet exemple, l'utilisation de bagues peut permettre de faire de grandes avancées en épidémiologie.

D) Méthodes de suivi de type télémétrie

Ces méthodes nécessitent de placer un équipement électronique sur les oiseaux. Il existe différents types d'équipements, variant de par leur forme, leur masse, leur moyen de fixation et bien entendu leur moyen de fonctionnement.

Il existe des équipements classiques collés sur le dos de l'oiseau, accrochés à ses pattes ou à son cou, mais aussi des équipements qui s'attachent comme un baudrier, ou encore des systèmes placés chirurgicalement sous la peau. La figure 16 illustre quelques exemples de méthodes d'attache des systèmes de télémétrie.

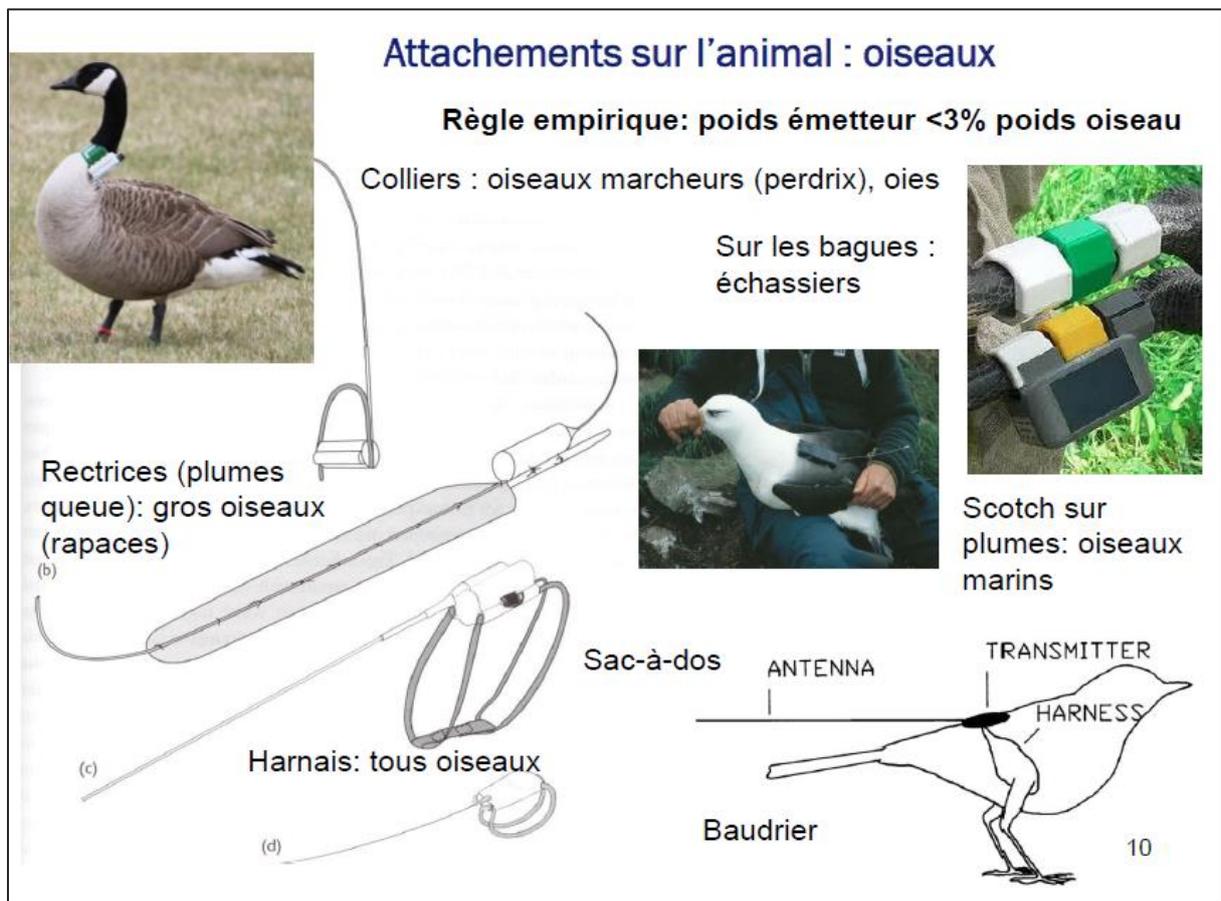


Figure 16 : Exemples de fixations possibles pour maintenir l'émetteur sur l'oiseau. (Duriez 2021)

Certains appareils communiquent leurs données à distance alors que d'autres nécessitent de recapter l'oiseau. D'ailleurs, tout équipement trouvé sur un oiseau mort doit être envoyé au CRBPO selon la même procédure que pour les bagues métalliques.

Les données obtenues via ces équipements de télé-localisation sont partagées sur le site MOVEBANK afin que les données soient disponibles pour tous les scientifiques. Cela permet d'optimiser l'utilisation de données coûteuses à acquérir.

Le fait de suivre activement un animal par le biais de la télémétrie permet aussi de retrouver son cadavre et donc d'identifier la cause de sa mort, élément important en épidémiologie.

1) Radio repérage haute fréquence (Radio-tracking VHF)

Cette méthode se base sur le principe d'une onde radio émise par un émetteur embarqué sur l'oiseau, émettant à une fréquence précise comprise entre 150 et 200kHz. Cette onde est reçue par un récepteur relié à une antenne râteau. L'antenne peut soit être fixe et omnidirectionnelle, soit mobile et unidirectionnelle, appelée antenne Yagi (figure 17). La précision de détection des émetteurs par les antennes reliées à un récepteur peut aller au maximum jusqu'à quelques kilomètres.

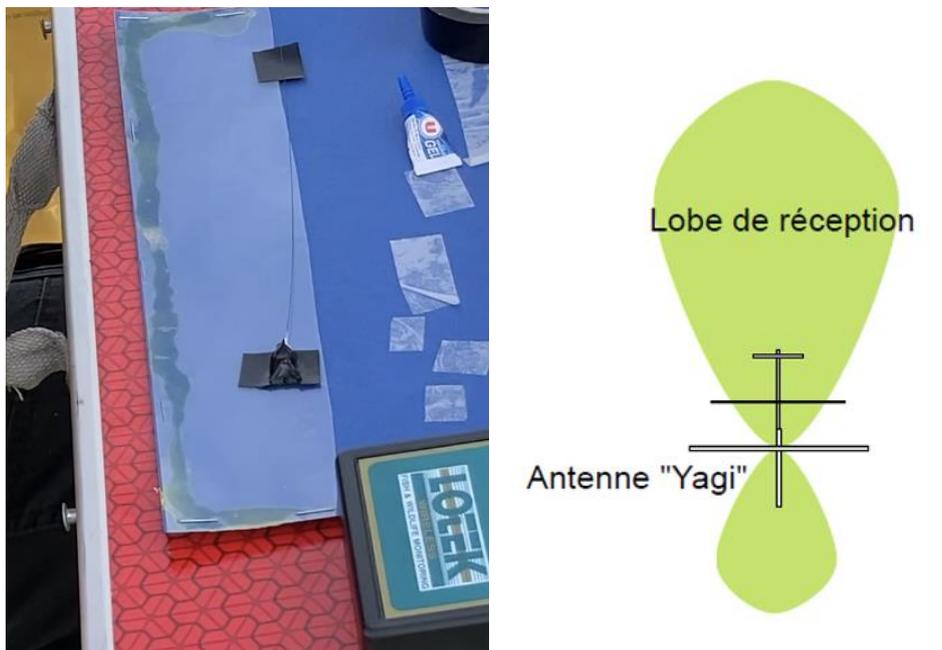


Figure 17 : A gauche : balise radio fréquence VHF (photo personnelle). A droite : fonctionnement de la réception du signal radio par l'antenne Yagi (Duriez 2021)

Pour être le plus précis possible pour localiser un oiseau grâce au signal VHF, il existe plusieurs méthodes :

- La triangulation : deux observateurs sont placés à deux endroits différents. Quand ils captent tous les deux le signal de l'oiseau, ils pointent leur antenne Yagi vers la direction où le signal est le plus fort et notent la direction indiquée par une boussole. En recoupant les deux directions, il est possible de trouver la position de l'oiseau.
- Le « Time Difference of Arrival » (TDOA) : il s'agit d'une méthode de triangulation un peu particulière. Un réseau d'au moins trois antennes fixes assez proches sont disposées dans la zone à étudier. Leur position est connue très précisément par GPS. Lorsqu'un oiseau se situe dans la zone, le signal de sa balise va atteindre les différentes antennes en décalé selon la distance à laquelle il se situe par rapport à chaque antenne réceptrice. La triangulation permettant de connaître précisément la position de l'oiseau se fait alors par le calcul de la différence de l'heure d'arrivée du signal pour chaque antenne (Duriez 2021). Cette méthode est utilisée à très grande échelle par le projet ATLAS (*Advanced Tracking and Localization of Animals in real-life Systems*), qui a permis d'équiper énormément d'oiseaux de tailles très variées avec des balises VHF depuis mai 2014 dans la vallée de Hula dans le Nord d'Israël (Minerva Center for Movement Ecology 2019). Beaucoup de données ont été générées grâce à ce projet, comme par exemple sur l'Effraie des clochers (*Tyto alba*). La méthode TDOA peut s'utiliser pour les balises VHF, mais aussi pour les chants des oiseaux : à la place des antennes ce sont des microphones qui sont disposés dans la zone d'étude. Le système de localisation acoustique peut alors localiser l'oiseau grâce à la différence d'amplitude de l'enregistrement du même chant par des microphones placés à des endroits différents, mais aussi selon la différence entre les délais d'arrivée (TDOA) du son aux différents microphones selon leur position (Camacho-Schlenker 2012).
- Le « homing-in » : le principe est de suivre un gradient croissant de l'intensité du signal jusqu'à trouver l'oiseau. Cette méthode est plus précise, mais il est long voire impossible de suivre les animaux dans leur environnement.

Les avantages et les inconvénients de cette méthode sont récapitulés dans le tableau 3.

Tableau 3 : Avantages et inconvénients du radio tracking VHF

	Radio-tracking VHF
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Identification possible de chaque individu, émettant chacun à une fréquence unique • Faible coût (minimum 100€ par animal) • Petite taille et faible masse de l'émetteur (de moins d'1g à 12g) • Potentiellement très précis : précision entre quelques mètres et 1km, suivi en continu possible selon la méthode employée (homing-in)
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • Même si en théorie il serait possible de travailler en 3D avec cette méthode, la précision est faible sur un oiseau en vol et donc en mouvement car il est difficile d'orienter les antennes • Dérangement possible de l'oiseau car la portée du signal est courte (potentiellement à vue de l'émetteur) • Suivi manuel car automatisation limitée • Relief perturbant les signaux (signal arrêté ou formation d'échos) • Autonomie moyenne (de quelques jours à plusieurs mois)

Cette méthode est plutôt utilisée pour suivre les déplacements des oiseaux dans un périmètre restreint car elle implique de devoir les chercher et les suivre, ce qui n'est pas évident sur de longues distances, même si ce n'est pas impossible. En effet, cette méthode a été utilisée lors d'études sur la migration des grives de Swainson (*Catharus ustulatus*) (Stokstad 2004; Wikelski et al. 2003).

Lorsqu'elle est utilisée lors de migration, cette méthode peut être difficile à mettre en place si le suivi se fait en voiture ou en avion par exemple. Pour remédier à cela, il est possible d'utiliser un réseau de stations d'enregistrement et de retracer ainsi la voie migratoire. Ce système est par exemple beaucoup développé en Amérique du

Nord avec un réseau d'environ 300 stations d'enregistrement et antennes, appartenant au programme collaboratif Motus notamment (Système de surveillance faunistique Motus, Etudes d'Oiseaux Canada 2014).

L'utilisation du réseau Motus a par exemple permis aux chercheurs de repérer les principales causes de mortalité des oiseaux côtiers (Munro, Monastersky, Krzysztofciak 2017; Munro 2017), dont les effectifs ont drastiquement baissé ces dernières années. Ils ont ainsi pointé du doigt les changements climatiques, les barrages hydroélectriques, la chasse, ou la diminution des ressources alimentaires (notamment la limule) à cause des prélèvements humains (figure 18).

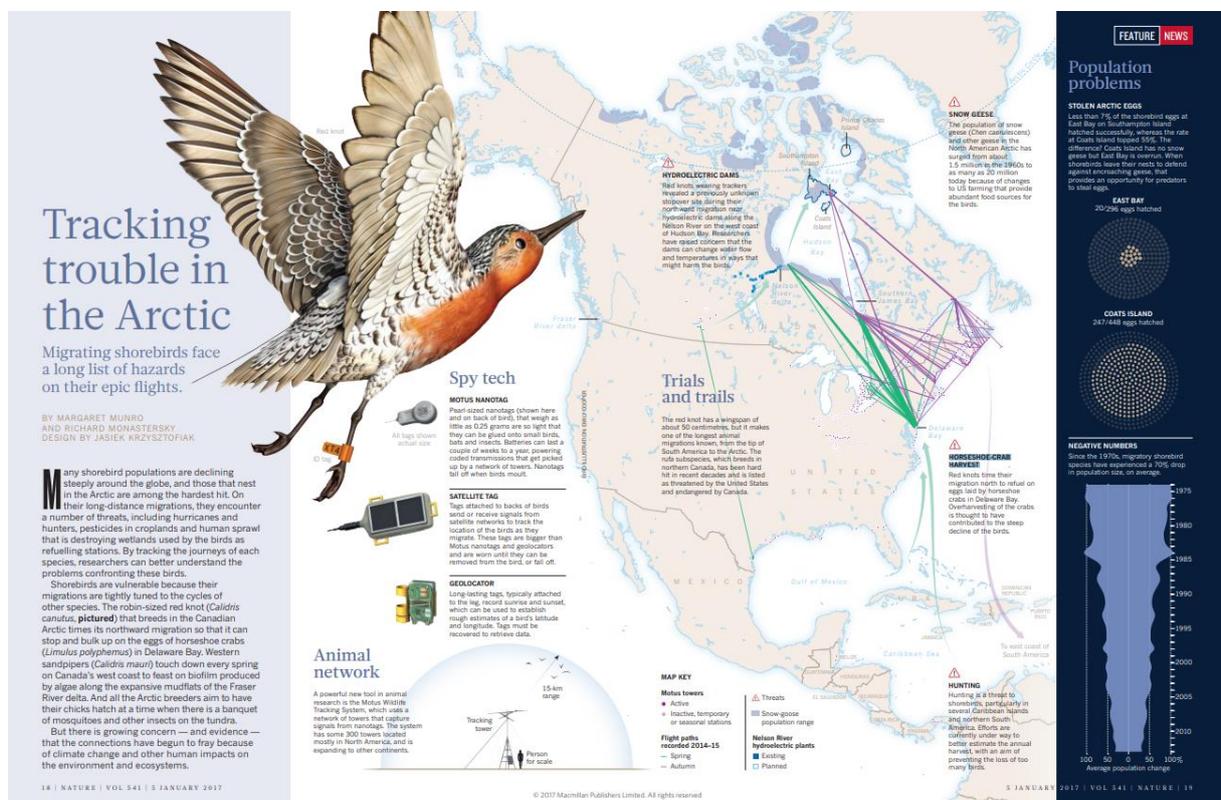


Figure 18 : Les difficultés rencontrées par les oiseaux côtiers canadiens lors de leur migration. Exemple d'application du suivi des oiseaux par radio-tracking VHF (Munro, Monastersky, Krzysztofciak 2017).

En terme d'épidémiologie, le programme Motus a par exemple permis de s'intéresser aux effets d'une infection expérimentale par l'agent de la malaria aviaire (*Plasmodium* spp.) sur la migration des parulines à croupion jaune (*Setophaga coronata*) (Howe 2022). Sur un total de 40 oiseaux, tous ont été équipés de balises radiofréquence, mais seulement 25 ont reçu une injection de *Plasmodium cathemerium*, les 15 autres ayant reçu une injection placebo (groupe témoin). Parmi les oiseaux inoculés, 24% ont développé une infection (groupe d'oiseaux infectés).

Cette infection a été confirmée par la réalisation d'un frottis sanguin, montrant la présence de plasmodium dans les hématies dix jours après l'inoculation. Les oiseaux ayant reçu l'inoculation mais n'ayant pas de plasmodium sur leur frottis sanguin constituent un troisième groupe : les oiseaux exposés mais non infectés. Les 40 oiseaux ont été relâchés 12 jours après. La durée des arrêts migratoires ainsi que l'activité des oiseaux ont été mesurées grâce au signal radio de leur émetteur, reçu par les antennes du réseau Motus. Il a été mis en évidence que les trois groupes d'oiseaux ont montré le même niveau d'activité qu'avant la capture et que la durée des arrêts migratoires était la même, suggérant que l'infection à plasmodium n'affecte pas les arrêts migratoires.

Une autre étude récente utilisant également le réseau Motus, a cherché à montrer une corrélation entre le statut immunitaire des passereaux, la durée de leurs arrêts migratoires et la voie migratoire empruntée (Brust et al. 2022). Des marqueurs de l'immunité innée (notamment les anticorps naturels) et de l'immunité acquise (immunoglobulines Y) ont été mesurés dans le plasma et les oiseaux ont ensuite été suivis par radio repérage. Les anticorps naturels se lient de façon non spécifique à divers antigènes et jouent un rôle important dans l'opsonisation. Ils ont été mis en évidence grâce à un test d'hémolyse et d'hémagglutination. La concentration en immunoglobulines Y, qui est le principal anticorps du système immunitaire adaptatif chez les oiseaux, a été mesurée par ELISA. Les résultats ont montré que les arrêts migratoires étaient plus longs au printemps pour les oiseaux ayant un plus fort taux d'anticorps naturels et d'immunoglobulines Y, probablement suite à une infection récente ou un investissement accru dans leurs fonctions immunitaires. Cette tendance a été montrée chez toutes les espèces étudiées alors qu'à l'automne aucun lien n'a pu être mis en évidence. Chez certaines espèces, les distances de vol augmentaient avec la concentration en immunoglobulines Y. La route suivie pour la migration était indépendante du statut immunitaire

2) Télémétrie satellite

a) Argos

Testé pour la première fois en 1989 sur des animaux, ce système créé en 1978 utilise les satellites pour calculer la position de l'émetteur (argos-system 2022). Le calcul se fait grâce à l'effet Doppler, pour connaître le moment exact où le satellite est passé au-dessus de la balise. L'émetteur Argos est aussi appelé Platform Transmitter Terminal (PTT), c'est-à-dire terminal de l'émetteur de la plateforme. A chaque fois qu'un satellite passe au-dessus d'une plateforme, il mesure la fréquence des signaux reçus et récupère les informations qu'elle transmet. Ces deux informations sont transmises via des stations au sol à des centres de traitement Argos. Les localisations sont alors calculées en mesurant l'effet Doppler (changement de la fréquence de l'onde) sur les signaux transmis.

La précision de ce système est comprise entre 100m et 1km. Le chercheur reçoit la position de l'animal environ une heure après la réception du signal par le satellite. Cette technique est notamment utile en plein océan, par exemple pour les oiseaux marins ou les oiseaux dont la migration survole les océans.

Les avantages et les inconvénients de cette méthode sont récapitulés dans le tableau 4.

Tableau 4 : Avantages et inconvénients du système Argos

	Télémétrie satellite - système Argos
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Suivi global et en direct des animaux (via internet) • Durée de la batterie : deux mois à deux ans • Programmation du cycle d'émission • Pas besoin de récupérer la balise • Possibilité de transmission de données connexes (localisations GPS par exemple) • Fonctionne même dans des conditions extrêmes (par exemple forêt dense/tropicale).
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • Masse (12 à 18g) • Localisations espacées de manière irrégulière, en général toutes les quatre heures • Prix (entre 3000 et 4500€) • Précision (entre 100 et 1000m, précisé par la classe de la localisation) • Zones à réception perturbée (radars militaires par exemple)

La figure 19 permet d'illustrer un faucon pèlerin portant une balise Argos fixée via un harnais sac à dos.



Figure 19 : Faucon pèlerin (*Falco peregrinus*) équipé d'une balise Argos (argos-system 2022) (DR B.-U. Meyburg).

Il a été montré par exemple grâce au système Argos qu'un dendrocygne veuf (*Dendrocygna viduata*) infecté par un virus influenza hautement pathogène H5N2 a pu réaliser une migration de 655km et a survécu à l'infection (Gaidet et al. 2008).

Une autre étude très complète a été menée en 2010 pour évaluer le potentiel de dispersion du virus influenza hautement pathogène H5N1 pendant la période asymptomatique d'infection, en utilisant des suivis satellites Argos (Gaidet et al. 2010). L'étude s'est faite en deux étapes :

- La première étape de revue bibliographique, s'intéressant aux infections expérimentales d'oiseaux avec H5N1, a montré qu'après l'infection expérimentale, certaines espèces étaient asymptomatiques parfois pendant plusieurs jours, voire ne déclaraient pas de signes cliniques (portage sain), tout en étant excrétrices de virus (Brown, Stallknecht, Swayne 2008; Keawcharoen et al. 2008). Cela a permis de proposer des périodes asymptomatiques minimales et maximales (respectivement un et huit jours, en moyenne quatre jours) et donc de connaître l'intervalle de temps à risque pour la dispersion du virus.
- La seconde étape, de terrain, a été de suivre 228 oiseaux de 19 espèces différentes pendant en moyenne 188 jours entre 2006 et 2009 par télémétrie satellitaire Argos pour analyser les mouvements et la vitesse de déplacement des individus. Certaines des 19 espèces étaient des candidats majeurs pour être vecteur de virus influenza pathogène (Keawcharoen et al. 2008; Brown, Stallknecht, Swayne 2008), comme par exemple le Canard colvert (*Anas platyrhynchos*), l'Oie à tête barrée (*Anser indicus*) ou le Cygne chanteur (*Cygnus cygnus*), les autres étaient des espèces abondantes avec des populations de plus d'un million d'individus (Wetlands International 2006). Pour chaque espèce a alors été calculée la distance maximale de dispersion potentielle du virus, d'après la vitesse de déplacement des individus et la période asymptomatique supposée grâce à la première étape.

En résumé, cette étude a permis de montrer que les oiseaux sauvages migrateurs ont la possibilité de répandre sur de longues distances (1700km pour une période asymptomatique d'un jour par exemple) le VIAHP H5N1 pendant la période

d'infection asymptomatique. Mais la probabilité pour qu'un tel évènement se produise est *a priori* faible :

- Premièrement il faut que l'oiseau soit en période asymptomatique au moment de la migration, or les oiseaux ne parcourent d'aussi longues distances qu'entre 5 et 15 jours dans l'année, en général de mars à juin et de septembre à novembre. La probabilité que l'oiseau soit infecté pendant ce court laps de temps est faible. En revanche, en dehors des périodes de migration, cette étude a montré que 20 à 80% d'oiseaux font plus de 100km en 4 jours, ce qui augmente le potentiel de dispersion.
- Deuxièmement, la durée des haltes migratoires est souvent plus longue que la période d'infection et d'excrétion virale. En effet, la migration se fait en plusieurs étapes, entrecoupée de pauses : les haltes migratoires. Ainsi un oiseau ne pourrait pas disperser le virus sur plusieurs étapes successives. Pour un seul individu, le potentiel de propagation a été estimé à 2000km maximum. La distance maximale de dispersion est atteinte en un à quatre jours pour un individu. Pour que le virus continue de se propager, il est nécessaire que l'individu infecté puisse transmettre H5N1 à d'autres oiseaux au moment de la halte migratoire, et que cela se répète à la halte suivante, puis à la suivante... Ce relai de transmission entre plusieurs oiseaux permettrait que la dispersion du virus se fasse d'un continent à l'autre, car il est très peu probable qu'un individu seul en soit capable. Par ailleurs, avec l'asynchronie des migrations entre les individus d'une même espèce et entre les espèces ayant le même couloir migratoire, la dispersion longue distance est en fait présente une grande partie de l'année (estimée entre six et sept mois dans l'année).

b) Système de positionnement global GPS (Global Positioning System)

Cette technique consiste à placer le récepteur GPS sur l'oiseau et les satellites sont les émetteurs. Ainsi les informations sont stockées dans le récepteur, qui est embarqué sur l'oiseau. Par conséquent, les données ne sont accessibles qu'après recapture de l'individu, ce qui peut être un frein majeur avec certaines espèces d'oiseaux. Avec 36 satellites sur 6 orbites, cela permet d'atteindre n'importe quel point sur la Terre à chaque instant. Le satellite émet des micro-ondes à la vitesse de la lumière et le récepteur calcule le temps entre l'émission et la réception du signal, ce

qui permet d'obtenir une distance entre le récepteur et l'émetteur. Ce calcul de distance est réalisé avec plusieurs satellites et il est alors possible de faire une triangulation. Afin d'avoir une position en trois dimensions (latitude, longitude et hauteur) il est nécessaire de réaliser le calcul avec quatre satellites.

La précision de cette méthode est de 5 à 50m, avec un suivi possible en continu (jusqu'à 10 positions par seconde), ce qui fait de ce système l'un des plus précis et efficace. Les seules sources d'erreur possibles sont liées à l'environnement :

- Sous l'eau, sous la neige, dans une forêt dense, le signal n'est pas correctement reçu par l'émetteur.

- En cas de relief escarpé, certains satellites peuvent être hors du champ de réception du récepteur placé sur l'oiseau. Cela diminue le nombre total de satellites avec lesquels il est possible de faire le calcul de distance, ce qui entraîne une perte de précision. De manière générale, l'information susceptible d'être la moins précise avec cette méthode est l'altitude.

Il est par ailleurs possible de définir des zones avec un suivi renforcé, appelées géofence. Cela permet par exemple d'augmenter le nombre de positions par heure ou par seconde en fonction des besoins scientifiques ou des coûts engendrés (en Afrique par exemple, les coûts sont beaucoup plus élevés).

Les avantages et les inconvénients de cette méthode sont récapitulés dans le tableau 5.

Tableau 5 : Avantages et inconvénients du système GPS

	GPS
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Suivi global • Très précis, entre 5 et 50m • Localisations très fréquentes voire en continu • Prix (entre 400 et 4000€, sans coût de localisation) • Suivi longue durée (de plusieurs mois à plusieurs années)
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessite de récupérer le matériel • Masse de l'émetteur entre 30 et 60g (grosses batteries, parfois solaires)

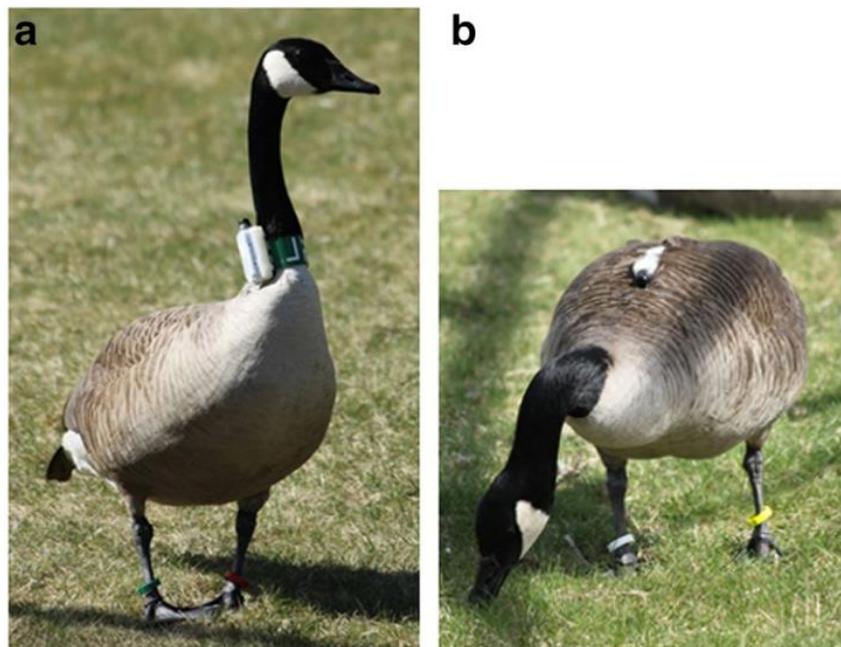


Figure 20 : Bernaches du Canada (*Branta canadensis*) équipées de GPS. (a) collier (b) harnais sac-à-dos. (Kölzsch et al. 2016)

La figure 20 montre deux méthodes de fixation d'un équipement GPS.

L'utilisation de ce système s'applique dans la vie quotidienne avec les propriétaires de chats domestiques qui équipent leur animal avec un logger GPS afin de connaître la position de leur compagnon, le prix étant plus abordable (environ 40€).

Les dispositifs GPS permettent d'étudier par exemple les lieux de vie des oiseaux et l'intensité de leur agrégation, mais aussi les effets de l'infection par les virus influenza aviaire, ou la prévalence de virus chez les oiseaux en relation avec leur statut social (Munster, Fouchier 2009). Il est par exemple supposé qu'il a plus de virus influenza aviaire lors de la migration d'automne car il y a plus de jeunes oiseaux naïfs (Olsen et al. 2006). Par ailleurs, la prévalence du virus est plus importante dans les latitudes Nord que Sud car elle diminue au fur et à mesure de la migration automnale selon un axe Nord-Sud (Munster et al. 2007).

L'utilisation du GPS a permis de démontrer que les oiseaux sauvages utilisent les infrastructures des élevages de volailles, de jour pour se nourrir en volant de la nourriture, mais aussi de nuit, pour se percher et dormir, ce qui majore le risque de transmission des virus influenza aviaire (McDuié et al. 2022). Caractériser l'interface entre les oiseaux sauvages et d'élevage est essentiel à la compréhension de la transmission d'agents pathogènes. Certaines études utilisant le suivi des oiseaux sauvages par GPS peuvent permettre de faire des prédictions sur la présence ou l'absence d'oiseaux sauvages près des élevages de volailles au cours du temps et des saisons et déterminer ainsi des périodes critiques. Par exemple il a été montré dans une région humide du Mali une forte variation saisonnière du contact entre les canards à bosse sauvages (*Sarkidiornis melanonos*) et les volailles des villages avoisinants. Le suivi pendant sept mois par télémétrie satellite GPS a permis de montrer que leur contact était le plus fréquent à la fin de la saison sèche et au début de la saison humide (Cappelle et al. 2011).

c) GPS transmission à distance et couplage de systèmes

Avec la transmission à distance des données, les chercheurs s'affranchissent de devoir récupérer le matériel.

➤ Les systèmes hybrides combinant plusieurs techniques : GPS-Argos, GPS-Argos-pinpoint tags

Avec le couplage GPS-Argos, les positions recueillies par le récepteur GPS à des intervalles fixes et prédéfinis sont envoyés par messages Argos et permettent de pallier au problème majeur du GPS qui est de devoir récupérer la balise pour récupérer

les données. Avec ce couplage, les position GPS sont envoyées aux chercheurs à distance et la localisation Argos peut servir de système de secours si jamais les signaux GPS ne sont pas reçus (par exemple dans une forêt dense). La position GPS est plus précise que celle obtenue avec un système Argos et les positions sont mieux réparties tout au long de la journée. En revanche, ce système engendre une importante consommation d'énergie et les coûts des communications Argos sont élevés. Le couplage GPS-Argos est à envisager si les localisations doivent être fréquentes (par exemple une fois par heure) ou encore si une meilleure précision de localisation est nécessaire (argos-system 2022).

Le couplage GPS-Argos-PinPoint tags permet d'enregistrer les positions GPS à intervalles réguliers, avec un nombre défini de points en fonction de la taille de la batterie. Par exemple, une batterie de 3,5 grammes permet d'enregistrer 30 positions et celle de 10g 75 positions. Les points ont la précision du système GPS mais le nombre réduit de positions implique de choisir le bon intervalle de temps entre les enregistrements de positions et aussi d'équiper l'oiseau à la bonne période, pour ne pas rater la migration par exemple. L'envoi de toutes les positions se fait à la fin, en un seul message Argos, il n'est donc pas nécessaire de recapter l'oiseau. Cela permet de réduire les coûts Argos mais ceux-ci s'élèvent tout de même aux alentours des 1000 euros.

➤ Téléchargement des données par ondes ou sans fil

Il est possible de transmettre les données à distance via des ondes radio, wifi ou Bluetooth. Cela permet de ne pas avoir de coût de communication et d'avoir une faible consommation d'énergie de la batterie pour la transmission des données. En revanche, la transmission est lente en raison du faible débit et il est nécessaire que l'oiseau revienne sur un lieu connu comme son nid ou son site d'alimentation pour que les données puissent être téléchargées. Le système est donc utile en cas d'étude sur un lieu donné ou alors il faut attendre le retour de migration.

Les données peuvent également être transmises via un réseau sans-fil GSM-GPRS. Cette méthode offre une grande flexibilité et il est même possible de reprogrammer la balise à distance de la zone d'étude, ou encore de mettre en place des géofences. En revanche, cette méthode est dépendante de la couverture GSM, souvent faible en montagne ou encore en mer, et lors du changement de pays il faut

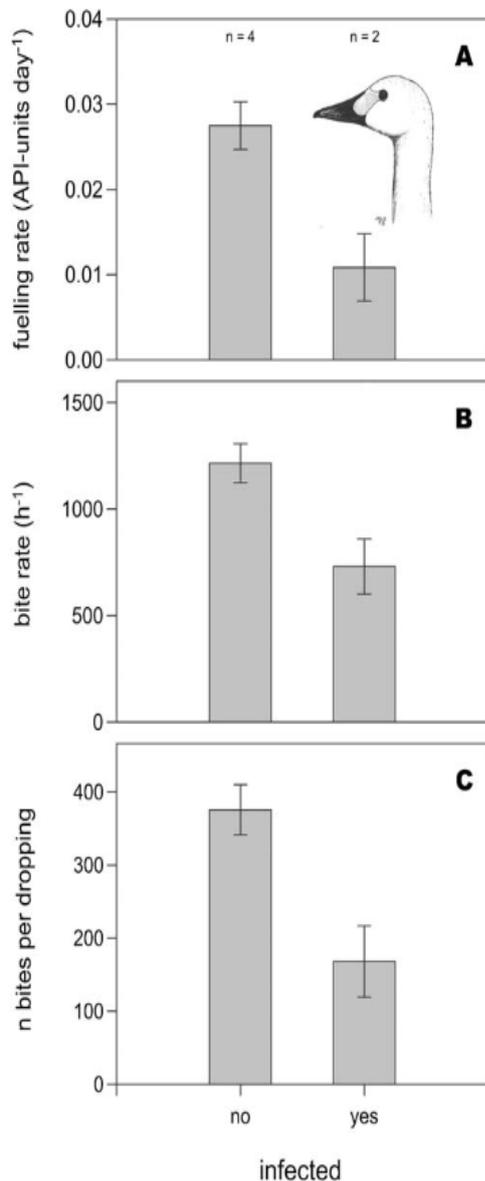


Figure 21 : Paramètres d'alimentation des cygnes de Bewick (*Cygnus columbianus bewickii*) équipés de colliers GPS selon leur statut infectieux (Van Gils et al. 2007).

- (A) score corporel basé sur le profil abdominal de l'oiseau
- (B) nombre de bouchées par heure sur l'herbe
- (C) ratio du nombre de bouchées sur le nombre de fientes émises

que l'abonnement SMS soit compatible. Elle consomme également beaucoup d'énergie, impliquant souvent d'avoir recours à des batteries solaires, par conséquent plus lourdes.

Lorsque nous avons évoqué le phénomène de « migratory separation » dans la partie I)A)3), nous avons illustré le propos par l'étude des cygnes de Bewick (*Cygnus columbianus bewickii*), infectés naturellement par les virus IAFP de sous-types H6N2 et H6N8 (Van Gils et al. 2007). C'est par le biais de colliers GPS transmettant les données via Bluetooth que les chercheurs ont pu mettre en évidence que les oiseaux infectés étaient partis de leur site d'hivernage un mois après le départ en migration des oiseaux sains. En plus de cela, ils ont voyagé sur de plus courtes distances. Dans cette même étude, les chercheurs ont observé le comportement des cygnes équipés de colliers GPS, et en particulier leur alimentation et leurs déjections.

La figure 21 montre les résultats obtenus par ces observations. Les cygnes infectés s'alimentaient moins : leur score corporel et le nombre de bouchées par heure sont significativement plus faibles que les oiseaux sains. Par ailleurs le ratio du nombre de bouchées sur le nombre de fientes permet

d'estimer la performance digestive des oiseaux, qui ici aussi était moins bonne que pour les oiseaux sains.

➤ ICARUS

ICARUS est un programme en cours de développement qui utilisera un système fixé sur l'ISS (station spatiale internationale) ayant un cône de détection activant les balises au moment du passage de la station. Cela permettra d'avoir jusqu'à six positions par jour. Les balises actuelles pèsent cinq grammes mais les chercheurs travaillent afin de réduire leur masse à un à trois grammes.

3) Système de géolocalisation GLS (Geo Localization System)



Figure 22 : Tourterelle des bois (*Streptopelia turtur*) équipée d'un harnais avec un capteur GLS (Boutin et al. 2011)

Un dernier système de géolocalisation mérite d'être cité, mais celui-ci est beaucoup moins précis (environ 150km). Il permet d'étudier l'intensité lumineuse, et donc d'approximer la longitude grâce à l'heure de midi et la latitude en fonction de l'heure du coucher du soleil. Le capteur de luminosité est surélevé afin de dépasser du plumage (figure 22). Deux localisations sont ainsi enregistrées chaque jour. Il y a de nombreuses sources d'erreur possibles, liées aux nuages, aux montagnes, aux

terriers, aux forêts mais aussi aux équinoxes quand la durée du jour est la même partout sur Terre, ce qui rend le calcul de latitude impossible pendant deux à trois semaines, qui correspondent en général aux périodes de migration (aux alentours du 21 mars et du 21 septembre). Ce système reste pratique en zone d'hivernage car il a les avantages d'être petit et léger (1g), d'enregistrer pendant 2 à 5 ans et d'être peu coûteux (pas de coût de localisation et faible coût à l'achat (100 à 150 euros)). Combiné à un accéléromètre, il permet par exemple de connaître les périodes d'activités diurnes/ nocturnes ou encore la durée de vol. Il est en revanche nécessaire de récupérer le matériel et donc de recapturer l'oiseau.

E) Autres méthodes de suivi

1) Biologgers

Les biologgers sont des dispositifs électroniques enregistrant au cours du temps des paramètres physiques et/ou bio-géochimiques. Ils peuvent permettre de décrire le milieu de vie de l'animal équipé et son activité (Centre d'Etudes Biologiques de Chizé (CEBC), CNRS 2020). Les données sont enregistrées dans l'appareil et il est donc nécessaire de recapturer l'animal pour les récupérer. Pour pallier à ce problème, de nouveaux biologgers avec transmission à distance ont récemment été développés. Leur principal intérêt est qu'ils apportent des informations plutôt complémentaires à la localisation, fournie par les autres systèmes préalablement détaillés.

a) Baromètre - Altimètre

Cet équipement permet de mesurer la pression atmosphérique et donc de connaître l'altitude de l'oiseau. Il est plus précis que le GPS puisque sa précision est de plus ou moins un mètre. En revanche, le baromètre doit être re-calibré plusieurs fois par jour avec une mesure de pression atmosphérique connue, c'est à dire au sol et dans un lieu connu. Cela ne pose pas de problème pour les oiseaux marins car quand ils sont posés sur l'eau il s'agit du niveau 0. Pour les oiseaux terrestres, il est

plus compliqué d'avoir un point de référence et plus particulièrement sur un trajet de migration.

b) Magnétomètre

Un magnétomètre permet de mesurer le champ magnétique terrestre et en fonction de celui-ci, de connaître l'orientation du corps de l'oiseau. Trois valeurs sont enregistrées : l'orientation du corps par rapport au pôle magnétique, la direction de déplacement et la posture.

c) Accéléromètre

L'accéléromètre est un appareil permettant de connaître la posture de l'animal : couché, debout ou en flottaison ou encore en vol battu, en vol désordonné ou en vol plane. Trois types d'accélération sont mesurées : l'accélération en hauteur, l'accélération avant-arrière et l'accélération gauche-droite. L'accéléromètre ne donne aucune information sur la vitesse, puisque rappelons-le, l'accélération vaut zéro lorsque la vitesse est constante. Un logiciel peut apprendre à reconnaître les différents signaux et des informations sur le comportement, l'activité, le repos ou la mort de l'animal équipé sont alors disponibles.

Les vautours fauve (*Gyps fulvus*) ont été étudiés dans les Causses en France grâce à des balises GPS couplées à un accéléromètre et à une batterie solaire rechargeable (CEBC, CNRS 2020). Cela a permis d'étudier leur vol et notamment l'utilisation des ascendances thermiques (air chaud s'élevant du sol) pour gagner en altitude. En effet l'accéléromètre permettait de connaître les moments de vol actif avec battements d'ailes (signal dynamique et périodicité élevée) et les moments de vol plané (composante basse fréquence). Pendant le vol plané, le signal d'accélération informait les scientifiques sur la posture de l'oiseau et son inclinaison lorsqu'il tournait en spirale.

2) Technique des isotopes stables

Cette technique est un peu particulière puisque le suivi des mouvements des oiseaux se fait par l'analyse des plumes, donc sans équipement à mettre en place sur les oiseaux et sans suivi dans le temps. La concentration en isotopes stables dans les plumes, comme l'hydrogène, le carbone et l'azote, permet de connaître la zone

géographique de mue et de croissance des plumes de l'oiseau (Hobson 1999). En effet la concentration des isotopes dans l'environnement varie selon l'aire géographique et il existe une corrélation entre cette concentration dans l'environnement et celle que l'on retrouve dans les plumes des oiseaux (FAO 2009). La précision est faible (au mieux de l'ordre d'une centaine de kilomètres), mais cela donne tout de même un indicateur sur la route générale de migration. De plus, la mise en œuvre est facile : cette méthode peut être réalisée partout, avec n'importe quelle espèce d'oiseau de n'importe quel gabarit puisqu'elle ne nécessite qu'une faible quantité de plumes, les oiseaux ne sont capturés qu'une fois et n'ont pas besoin d'être marqués d'une quelconque façon (Chang et al. 2008).

3) Méthode ADNe et metabarcoding

La méthode de l'ADN environnemental (ADNe) consiste à analyser des échantillons environnementaux afin de détecter la présence de plantes et d'animaux, sans nécessité de les voir ni de les capturer, via les cellules dermiques, le mucus ou encore les fèces dispersées dans l'environnement (Domaizon, OFB 2020; Poulet, OFB 2017). Cette méthode permet de mettre en évidence la présence ou l'absence d'une espèce cible. Le metabarcoding se base sur l'ADNe mais va encore plus loin puisqu'il permet de rechercher l'ensemble des espèces d'un groupe taxonomique dans un lieu.

Ces deux méthodes innovantes non invasives ont l'avantage de ne pas être une source de stress pour les animaux, du fait qu'ils ne sont pas capturés ni manipulés et car elles ne réquisitionnent pas trop de personnes sur le terrain. Elles permettent également aux chercheurs d'identifier rapidement les espèces probablement présentes dans un écosystème, d'autant plus si elles sont rares ou très discrètes. Cela nécessite en revanche de bonnes connaissances des espèces afin de réaliser les prélèvements au bon endroit et au bon moment. La mise en application concerne actuellement essentiellement la biodiversité aquatique, mais se développe pour tous les milieux de vie.

Les échantillons d'ADN se conservant très longtemps, il est possible de réaliser d'autres analyses plusieurs années après le prélèvement afin de chercher une autre espèce par exemple.

4) Radio Frequency Identification (RFID)

Cette méthode utilise des transpondeurs électroniques sans batterie (figure 23), appelé fréquemment « PIT tags » pour Passive Integrated Transponder, qui ont un code unique pour chaque animal. Le principe est le même que pour l'identification des animaux de compagnie. La taille de ces transpondeurs est en moyenne en ornithologie de 2,12 x 12mm, pour une masse de 0,095g, mais il existe un large panel de tailles et de formes (Bonter, Bridge 2011). Leur durée de vie est *a priori* illimitée, mais n'a jamais été testée sur le terrain. Un autre avantage de cette méthode est son coût, devenu très abordable et qui est d'environ 40€ par puce électronique.

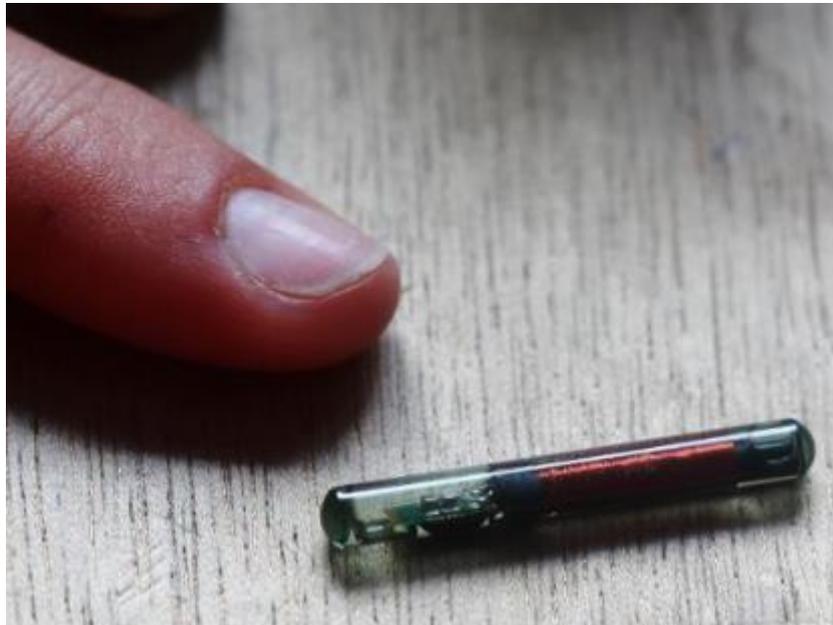


Figure 23 : Exemple de transpondeur électronique RFID utilisé chez des manchots Adélie (*Pygoscelis adeliae*) (Kremer 2017)

Alors que le transpondeur est passif, c'est le lecteur qui est actif, en envoyant de l'énergie à travers un champ électromagnétique pour lire le numéro d'identification de la puce électronique. Les fréquences utilisées pour les études sur les animaux appartiennent aux basses fréquences (125-150kHz) (Bonter, Bridge 2011). Cela permet de lire la puce si elle est placée en position sous-cutanée car ces fréquences traversent les tissus, mais cela diminue aussi drastiquement la distance maximale de lecture entre la puce et le lecteur. C'est pourquoi il faut une proximité importante entre le transpondeur et son lecteur, dans l'idéal de quelques centimètres. Cette technologie

n'est donc pas adaptée à tout type de sujet de recherche puisque l'oiseau doit revenir à côté du lecteur assez régulièrement. Il s'agit en général de savoir si l'oiseau est présent ou non sur le site étudié. Cela constitue déjà une source d'information importante lorsqu'on s'intéresse par exemple à l'arrivée des migrateurs sur un site de reproduction, à leur appariement et à la durabilité du couple au fil des années, ou bien au choix de la place du nid. Une mise en application simple est d'équiper des mangeoires ou encore des nichoirs avec des lecteurs RFID (Iserbyt et al. 2018).

Cette technologie est souvent couplée avec d'autres enregistreurs, tels que des balances pour mesurer la masse de l'individu reconnu, ou encore des caméras. Ce couplage permet que l'information de présence de l'oiseau soit plus complète, comme par exemple en connaissant la raison de la venue de l'oiseau (alternance des parents pour couvrir les œufs ou nourrir les petits). Une étude s'est par exemple intéressée aux mouvements des manchots royaux (*Aptenodytes patagonicus*) quand ils sont sur la terre ferme afin de tester si les repères visuels sont importants pour s'orienter au sein de la colonie. L'étude a ainsi étudié les déplacements des manchots à l'aide de lecteurs RFID et a mesuré leur activité en fonction de la luminosité et de leur âge (Nesterova et al. 2010). La même unité de chercheurs s'est également intéressée aux manchots Adélie (*Pygoscelis adeliae*) qui ont été étudiés pour voir l'impact du changement climatique sur leur masse, leur survie et leur succès reproducteur, toujours via l'utilisation de lecteurs RFID, cette fois-ci couplés à des balances à l'entrée et à la sortie de la colonie (figure 24) (Kremer 2017).

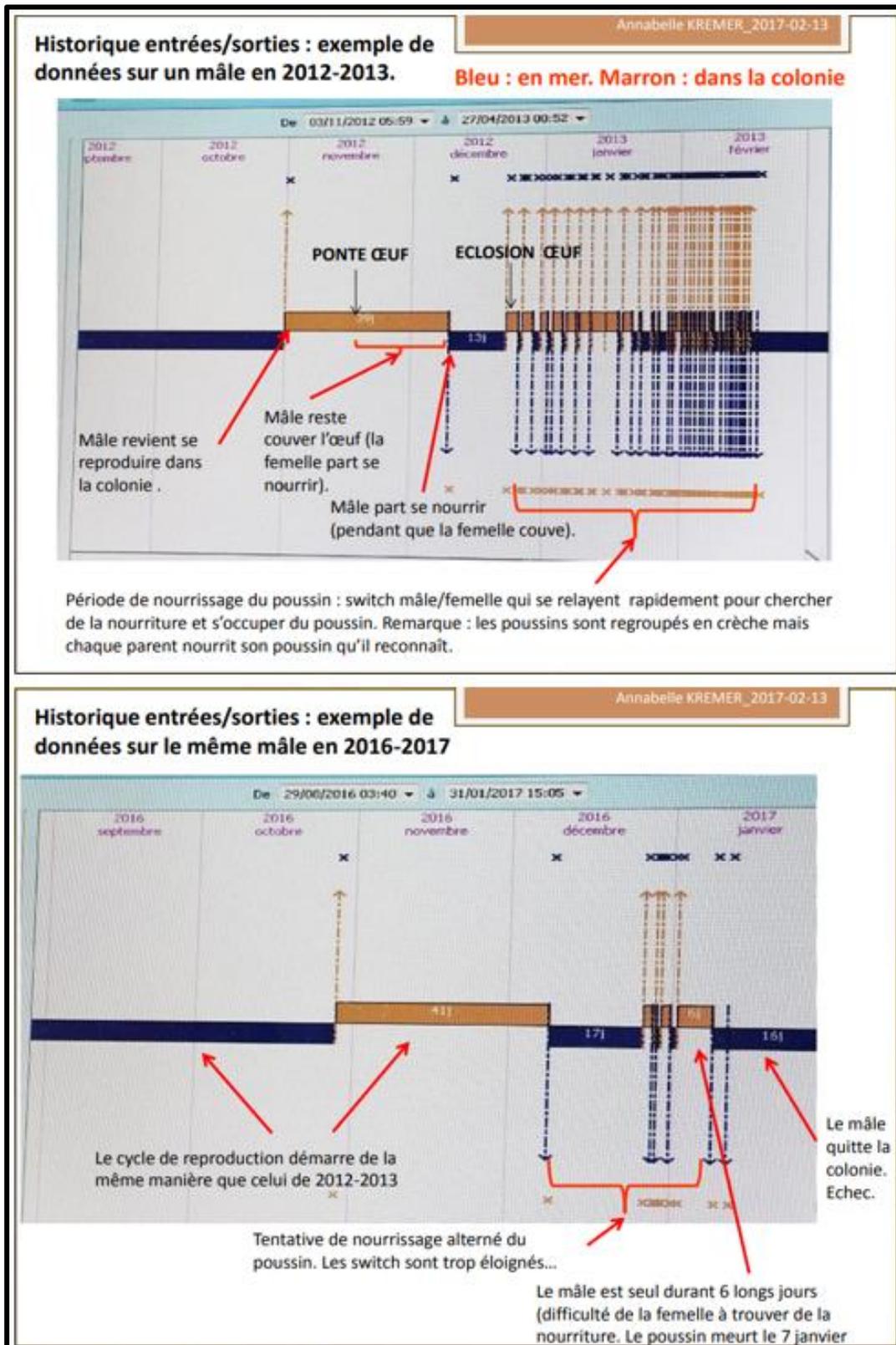


Figure 24 : Suivi de l'activité d'un même mâle manchot Adélie (*Pygoscelis adeliae*) sur deux saisons de reproduction différentes. Suivi réalisé par des lecteurs RFID enregistrant les entrées et sorties de la colonie. L'exemple du haut est représentatif d'un succès de reproduction et l'exemple du bas d'un échec de reproduction (Kremer 2017).

Une étude tout à fait différente des précédentes a quant à elle permis de mettre en évidence que la date d'arrivée des sternes pierregarin (*Sterna Hirundo*) sur leur site de reproduction est négativement corrélée à la masse corporelle de l'individu, et que cette date d'arrivée dépend aussi de l'âge, du sexe, et de l'expérience reproductive (Dittmann, Becker 2003). La masse corporelle étant diminuée par la présence de d'ectoparasites notamment (Hoi et al. 2012), et en se basant sur le principe de « migratory separation », ce décalage temporel de l'arrivée des animaux plus maigres peut peut-être mettre en évidence la présence de certains parasites ou agents pathogènes dans la population d'oiseaux.

Enfin, dans sa thèse universitaire, Julien Hirschinger a équipé avec des transpondeurs électroniques et des bagues colorées des oiseaux péridomestiques autour de deux élevages d'Outarde houbara (*Chlamydotis macqueenii*) aux Emirats Arabes Unis (Hirschinger 2020). Cet équipement a servi lors de deux études qu'il a menées : dans un premier temps il a tenté d'étudier les déplacements des oiseaux à l'extérieur des élevages, pour savoir s'ils suivaient plutôt un couloir de végétation ou s'ils coupaient à travers les dunes. Trois stations de détection, possédant chacune huit points d'écoute, ont été équipées de lecteurs de transpondeurs électroniques et de pièges photographiques. Les points d'écoute ont été appâtés avec de la nourriture. Peu d'oiseaux ont été détectés et c'est finalement via un autre protocole impliquant des équipements VHF qu'il a pu montrer que les oiseaux passaient plutôt par les dunes et ne se déplaçaient pas d'un élevage d'outardes à l'autre mais vers l'extérieur. Il a cependant réutilisé les transpondeurs et les bagues colorées dans un second temps pour caractériser les contacts entre les oiseaux sauvages et les outardes captives. Cette fois-ci, les trois stations ont été placées en zone de volières au sein des élevages. Le but était de compléter les comptages manuels déjà effectués en fournissant une identification précise des individus et des zones visitées. Les résultats ont été plus concluant dans cette seconde étude et ont montré que les oiseaux sauvages étaient surtout présents dans les volières en matinée, ce qui est probablement à mettre en lien avec l'heure de distribution des aliments aux outardes. Les espèces les plus détectées étaient des bulbuls à oreillons blancs (*Pycnonotus leucotis*) (86,5%), des tourterelles maillées (*Spilopelia senegalensis*) (7,7%), des moineaux domestiques (*Passer domesticus*) (3,8%) et des tourterelles turques (*Streptopelia decaocto*) (1,9%). Les contacts avec les outardes représentaient 42%

des oiseaux observés et étaient de type direct et indirect. Ce sont quasiment exclusivement les moineaux domestiques qui étaient en contact direct avec les outardes.

F) Mise en œuvre

Historiquement, la plupart des suivis se basaient sur la méthode de capture-marquage-recapture, dont le principe général est le suivant : des individus au nombre de n_1 sont capturés aléatoirement et marqués par différents moyens. Historiquement ils étaient marqués avec des fils colorés, à présent c'est avec des bagues métalliques ou colorées ou encore des taches de couleur. Ils sont ensuite relâchés et après un certain temps, une deuxième session de capture est réalisée, un nombre e_2 d'oiseaux sont capturés et sont comptés le nombre d'animaux déjà marqués n_2 . La proportion d'animaux déjà marqués lors de la seconde capture ($= n_2/e_2$) est considérée comme la même proportion qu'au sein de la population globale dont l'effectif inconnu est N . De façon simple, on a donc le calcul suivant pour estimer l'effectif de la population : $\frac{n_1}{N} = \frac{n_2}{e_2} \leftrightarrow N = \frac{n_1 \times e_2}{n_2}$. Grâce à ce modèle de base, dit de Lincoln-Peterson, on peut par exemple estimer le nombre total d'individus dans le milieu (Peycru et al. 2014; FAO 2009). Cependant, ce modèle est fondé sur plusieurs conditions rarement réunies par les populations naturelles. Il existe par conséquent des modifications de la modélisation pour que les analyses de capture-marquage-recapture soient possibles même si les hypothèses de bases ne sont pas respectées (par exemple lors de probabilité de capture inégale). Pour les populations ouvertes entre autres, c'est le modèle de Jolly-Seber qui est utilisé (FAO 2009).

De nos jours, pour d'autres objectifs d'étude, la méthode de capture-marquage-réobservation est facilement utilisée. C'est le cas par exemple de toutes les marques visuelles repérables et lisibles à distance (marques allaires, bagues DARVIC etc). Le but est de suivre les oiseaux dans le temps et dans l'espace, afin de déterminer par exemple leurs voies de migration, leur dispersion après la sortie du nid ou encore leurs lieux de vie. Le fait de ne pas devoir recapter l'oiseau évite d'infliger trop de stress à l'animal, la réobservation se faisant à distance (FAO 2009).

La grande majorité des méthodes nécessitent de capturer l'oiseau au moins une fois. Ainsi, il est primordial de prendre garde aux manipulations de l'oiseau dès lors qu'il est capturé (Duarte 2013) : éviter de le blesser, minimiser au maximum le temps dans le filet et en main, sachant que chaque espèce n'a pas la même tolérance à la manipulation. Pour les oiseaux nocturnes il faut éviter d'utiliser des lumières trop fortes ou alors couvrir leur tête afin de ne pas perturber leur vision de nuit. Le temps de manipulation est un temps où l'oiseau pourrait se nourrir, ou encore couvrir ses œufs. Certains oiseaux perdent en masse pendant leur capture, qui peut parfois durer jusqu'à deux heures, et cela peut avoir un fort impact négatif sur leur survie.

La capture doit être la moins traumatisante possible, pour ne pas blesser l'animal mais aussi ne pas modifier son comportement. L'état de vigilance de l'oiseau est surveillé tout au long de la procédure : si l'oiseau est trop fatigué, il est relâché immédiatement. Les oiseaux doivent impérativement être relâchés sur le lieu de la capture. Les techniques de capture ont considérablement évolué avec le temps. Les bagueurs d'aujourd'hui utilisent des leurres, de la nourriture ou encore la diffusion du chant de l'espèce pour attirer les oiseaux dans les filets. Le moment d'ouverture des filets est aussi primordial : le plus souvent le matin à l'aube. Le bagueur doit vérifier très régulièrement ses filets une fois qu'ils sont ouverts car un oiseau qui reste dans un filet pendant plus de 30 minutes s'épuise. En cas de forte chaleur, de risque d'averse, ou de prédateurs fréquentant le site, les filets doivent être surveillés encore plus fréquemment car une attente trop longue dans le filet peut alors être fatale. Certains oiseaux apprennent vite et évitent les filets après une première capture, il faut alors changer les filets de place et d'orientation, alors que d'autres oiseaux se font parfois recapturer systématiquement. Il existe d'ailleurs de nombreux types de filets, comme par exemple le filet japonais (figure 25), qui est un filet statique vertical qui permet de capturer en vol les oiseaux allant d'arbuste en arbuste, ou encore le filet plat (figure 25), utilisé pour les oiseaux se nourrissant au sol (Gast 2022).



Figure 25 : A gauche un filet japonais et à droite un filet plat (type tente) (Gast 2022)

Il y a d'autres méthodes pour attraper les oiseaux, comme les corrals (figure 26), qui sont des enclos-pièges dans lesquels des oiseaux sont rassemblés. Ce type de piège n'est utilisable qu'à un moment précis de l'année, en période postnuptiale de mue, quand les anatidés, les grèbes et les foulques perdent toutes leurs plumes du vol, et sont donc incapables de voler. Les individus sont alors guidés (à pied ou en bateau) entre deux longues barrières disposées comme un entonnoir, qui donne sur un enclos-piège. L'enclos est sur la terre ferme, mais le corral peut être en partie dans l'eau.



Figure 26 : Fonctionnement d'un corral (FAO 2009)

Il existe également des nasses avec appât, qui se referment lorsque les oiseaux entrent dedans pour y consommer de la nourriture, ou encore des filets à canon qui lancent un filet sur les oiseaux visés.

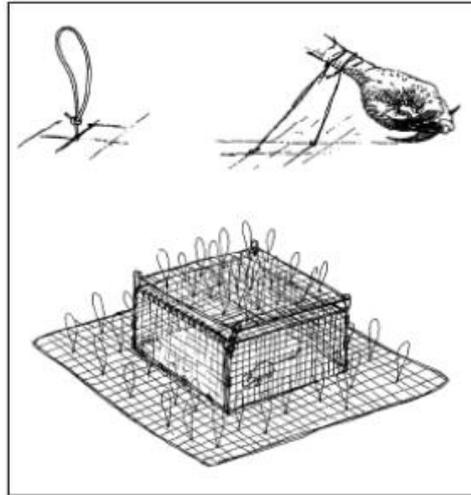


Figure 27 : Schéma du fonctionnement d'un piège bal-chatri (Hull, Bloom 2001).

En revanche, pour attraper un oiseau en particulier (espèce dont la capture est difficile, suivi individuel d'un oiseau dans le cadre de la surveillance d'un agent pathogène), il y a des techniques de capture spécifiques. Par exemple le piège bal-chatri est utilisé pour les rapaces (figures 27 et 28). Il est fait d'un tapis de nœuds coulants en nylon attachés au-dessus d'un leurre ou d'un appât, ou à l'entrée d'un nid. Le piège est lesté pour que l'oiseau ne puisse pas s'envoler avec le piège accroché à la patte.

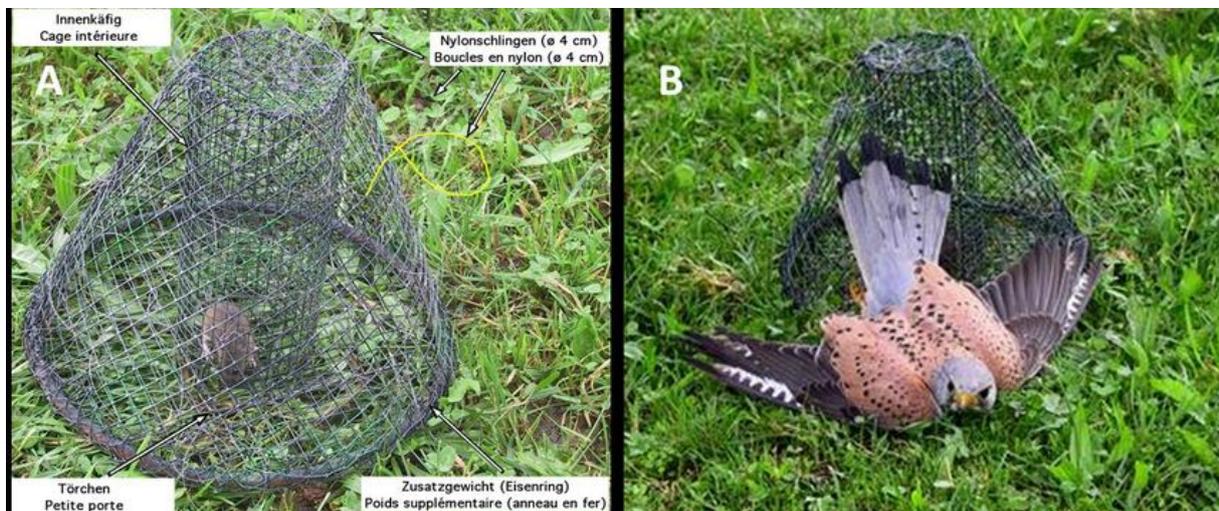


Figure 28 : Exemple de piège bal-chatri utilisé pour un projet de conservation du faucon crécerelle (*Falco tinnunculus*) (Michler et al. 2016).

A : Piège bal-chatri avec une souris comme appât.

B : Le même piège avec un faucon crécerelle mâle adulte pris dans les nœuds coulants en nylon.

Le filet Dho-gaza (figure 29) est de petite dimension et fabriqué avec le même type de cordage et maillage que le filet japonais. Il est donc utilisé pour les mêmes types d'espèces et notamment les oiseaux de proie. Il peut par exemple être placé devant un appât ou un leurre. Le filet se détache des bâtons lorsque l'oiseau s'y heurte.

La figure 29a, par exemple, montre un système d'anneau qui se détache mais il y a d'autres possibilités : l'anneau peut par exemple aussi glisser le long du bâton. L'oiseau est alors enveloppé par le filet.

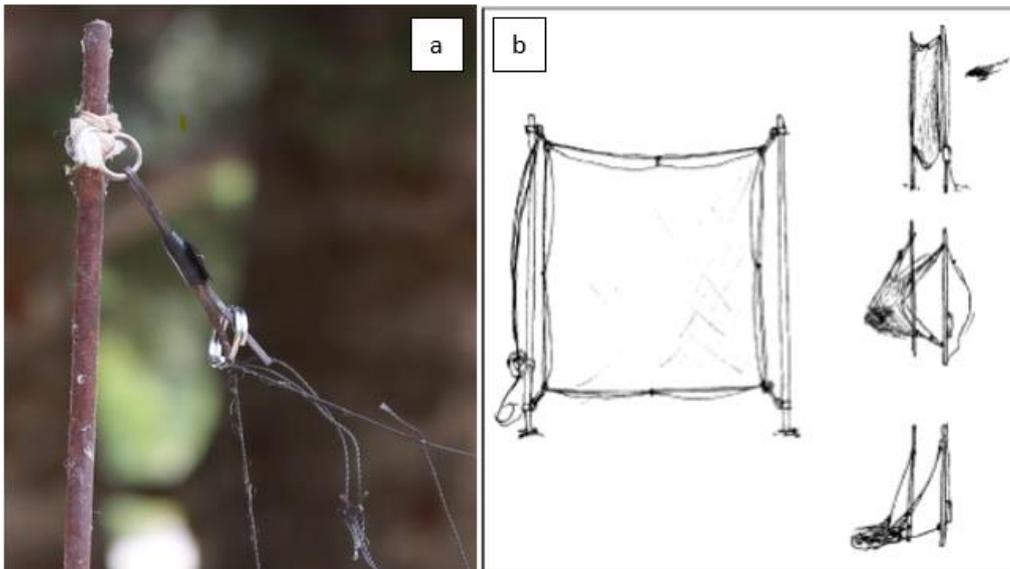


Figure 29 : Filet Dho-gaza (Hutchings Museum Institute 2017; Hull, Bloom 2001).
 a : système de détente, ici avec un anneau qui se détache au moment où l'oiseau heurte le filet.
 b : étapes du mécanisme lors de la capture.

Parmi les autres méthodes de capture ciblant une espèce ou un individu, on peut également citer le piège rabattable (figure 30), dont le déclenchement se fait en tirant sur une corde attachée au mécanisme de détente composé de puissants ressorts. Il y a aussi le piège à précipice, qui fait tomber sur l'oiseau une cage ou un filet lorsqu'il se trouve à un endroit précis.

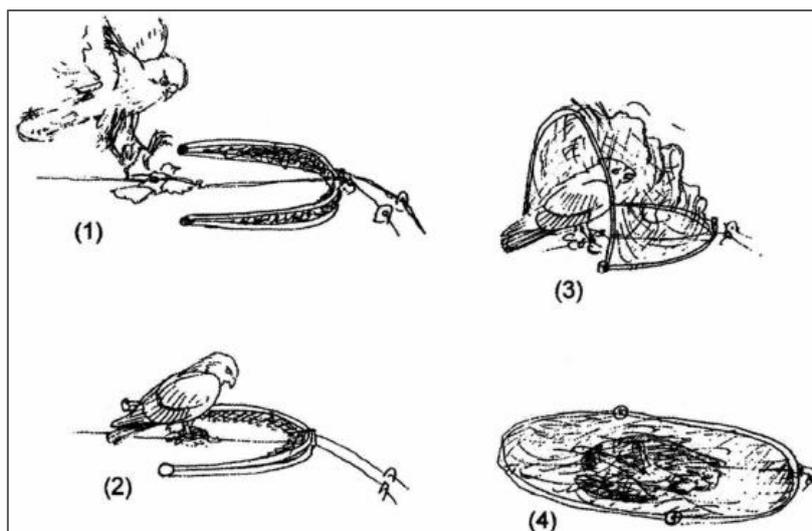


Figure 30 : Séquence d'action d'une capture à l'aide d'un piège rabattable (Hull, Bloom 2001)

G) Quelle méthode choisir et combien d'animaux équiper ?

1) Un choix adapté à l'animal (masse, volume, bien-être, résistance)

Le matériel utilisé pour équiper les oiseaux ne doit pas leur nuire, et pour cela il doit être adapté au mieux à chaque espèce voire à chaque individu. De manière générale, ni le volume, ni la masse et ni le bruit de l'équipement ne doivent gêner l'oiseau dans son quotidien. L'oiseau doit pouvoir effectuer ses mouvements normalement, son vol et sa démarche ne doivent pas être déséquilibrés, il ne doit pas s'enchevêtrer dans son environnement à cause de l'équipement. Ses capacités à s'alimenter et à se déplacer ne doivent pas être altérées. Il ne doit pas être gêné par le bruit engendré par l'appareil si celui-ci en produit. Pour conclure l'équipement doit donc être le moins invasif possible. Ainsi, les maîtres mots sont légèreté, silence et faible volume.

Mais le matériel doit aussi être adapté aux contraintes de vie de l'oiseau, pour qu'il puisse y résister et rester fixé aussi longtemps que le demande l'étude. De cette façon, le matériel doit être résistant à l'eau notamment, et aux mouvements de la zone où il est fixé (aile, cou, bec, pattes...).

De même, le mode de vie de l'espèce d'oiseau doit impérativement être pris en compte : par exemple le fait qu'il soit diurne ou nocturne joue sur la possibilité de coupler le système de suivi avec des panneaux solaires ou non. Si son environnement est difficile (forêt dense, milieu de l'océan...), la télémétrie Argos sera favorisée. Il faut aussi se renseigner sur la couverture GSM des pays où passera l'oiseau, ainsi que sur le coût des communications, variant également selon le pays.

Enfin, l'équipement doit être facilement fixable sur l'oiseau afin de réduire au maximum la durée de la capture.

Afin que les bagues métalliques soient le mieux adaptées à chaque individu marqué, le CRBPO recommande dans son guide des codes des espèces, les tailles et les types de bagues métalliques à apposer selon les espèces d'oiseaux (CRBPO et al. 2021).

Les difficultés sont nombreuses surtout en ce qui concerne la télémétrie car les équipements sont plus lourds, plus volumineux et plus difficiles à fixer. La difficulté

augmente avec la diminution du gabarit des oiseaux, et le problème principal se pose notamment pour les petits passereaux. En effet, la masse seuil indiquée par les règles éthiques est de 5% de la masse de l'oiseau, mais il couramment admis qu'idéalement il ne faut pas dépasser 3%, ce qui peut être un vrai challenge (CRBPO, MNHN, CNRS 2022; FAO 2009). Il a même été montré que pour certaines espèces un rapport de 1% était déjà trop élevé (Bodey et al. 2018). Bien entendu, la zone où sera fixée l'équipement (cou, dos, plumes ...) est un élément essentiel à analyser pour causer le moins de perturbations à l'oiseau et ainsi avoir le minimum de biais pour les résultats de l'étude. Ce n'est pas tout, le choix de la méthode de fixation doit aussi se faire selon le mode de vol, la durée et la distance de migration, ou encore selon les modifications de la masse de l'oiseau au cours du cycle annuel et des migrations, ainsi que selon les périodes de mue (Bodey et al. 2018).

Le choix de la méthode de marquage et/ou de suivi est primordial pour éviter des effets négatifs sur le comportement, la santé, le succès reproducteur et la survie de l'oiseau marqué et/ou équipé. Certaines méthodes peuvent être adaptées à une espèce mais pas à une autre, aussi proches soient-elles (Weiser et al. 2016). Des pré-études en captivité et/ou sur un petit échantillon d'individus (Chan et al. 2016; Kölzsch et al. 2016) peuvent être menées afin d'évaluer la gêne occasionnée par le système embarqué, à la fois dans un souci de bien-être animal, mais également pour que les résultats obtenus soient fidèles à la réalité et ne soient pas biaisés par la gêne de l'équipement. La figure 31 expose par exemple les conséquences comportementales de deux méthodes de marquage sur le comportement de Bernaches du Canada (*Branta canadensis*) captives (Kölzsch et al. 2016).

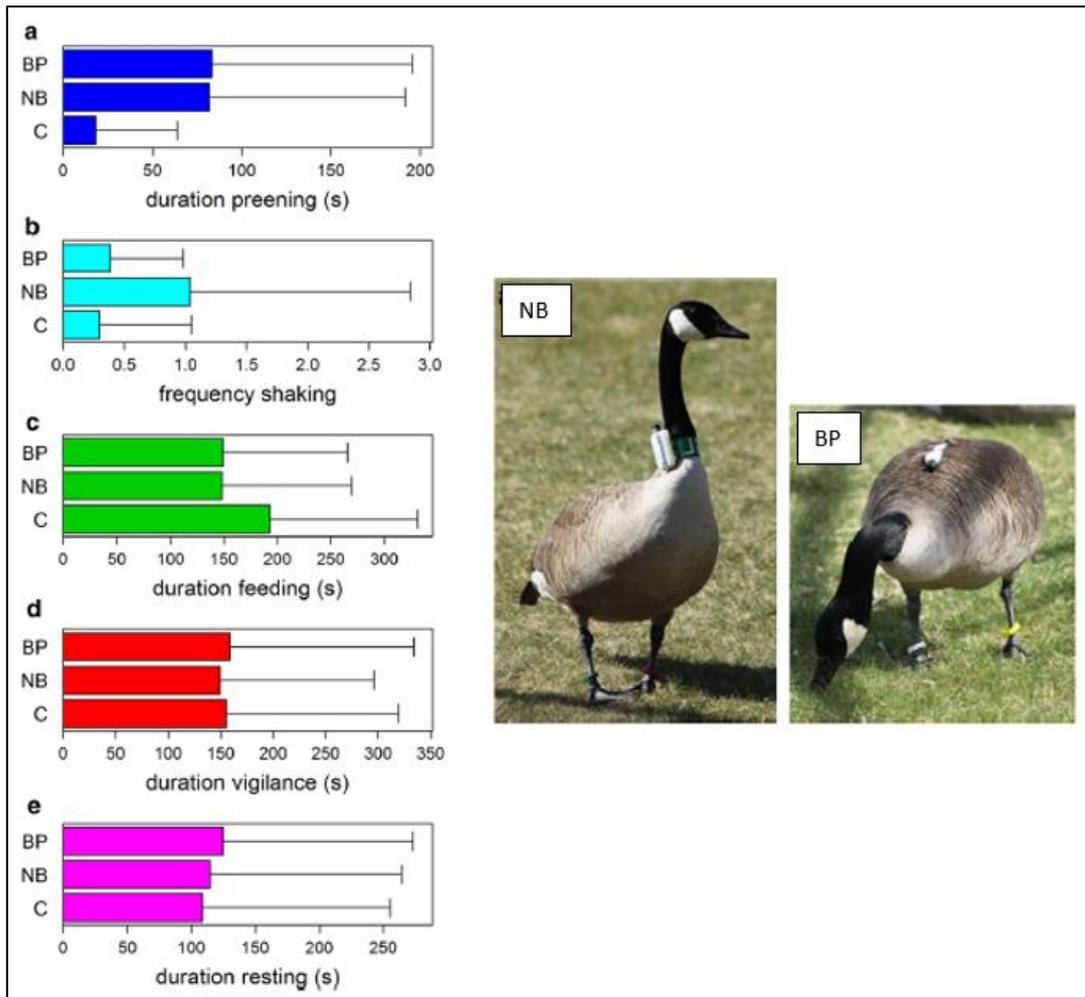


Figure 31 : Impact de la méthode de marquage sur le comportement de bernaches du Canada (*Branta canadensis*) captives (Kölzsch et al. 2016). NB : bague à cou, BP : harnais sac-à-dos, C : témoin.
a : durée de nettoyage du plumage, b : fréquence de secouement, c : temps consacré à s'alimenter, d : durée de vigilance, e : temps de repos.

La figure 31 montre que quelle que soit la méthode de marquage, les bernaches du Canada équipées d'un émetteur passaient plus de temps à se nettoyer le plumage que les oiseaux témoins (sans équipement). Par ailleurs, elles consacraient aussi moins de temps à se nourrir. Celles équipées de bagues à cou se secouaient plus fréquemment que celles avec le harnais sac-à-dos et que le groupe témoin. Le repos et la vigilance n'étaient pas impactés par le fait de porter une balise. Dans l'ensemble, les deux types d'équipements ont causé un inconfort aux oiseaux, et l'ampleur de ces comportements n'a pas diminué avec le temps (du moins sur les suivis de six jours réalisés par les chercheurs), montrant que les individus ne s'habituèrent pas à l'équipement. Une autre partie de cette étude a également permis de montrer que la bague à cou permettait d'avoir une meilleure précision des données de l'accéléromètre

en ce qui concerne la recherche de nourriture et la vigilance, alors que les comportements de repos et de marche ont été mieux détectés par les données de l'accéléromètre lorsqu'il était fixé au harnais sac-à-dos (Kölzsch et al. 2016).

Cependant, même avec une étude préalable sur des oiseaux captifs, les résultats peuvent être très différents une fois sur le terrain (Chan et al. 2016). Il existe aussi des études à posteriori sur l'impact de la méthode de marquage (Sergio et al. 2015; Morganti et al. 2018; Saraux et al. 2011; Gauthier-Clerc et al. 2004) ou comparant l'effet de différents types de méthodes sur la fiabilité des résultats et la gêne occasionnée à l'animal (Bodey et al. 2018; Kölzsch et al. 2016). Malheureusement, moins de 10% des études sont réalisées avec une évaluation des impacts causés par le dispositif de suivi et les études à long terme sont encore plus rares. Pourtant les équipements peuvent être lourds et peuvent rester longtemps fixés sur l'animal (Sergio et al. 2015).

2) Précision spatiale et temporelle des données

De manière générale, plus le suivi est long et avec beaucoup d'individus plus les résultats sont fiables car ils impliquent de nombreuses répétitions. Par exemple suivre un oiseau sur un de ses trajets de migration est intéressant, mais si on étudie ses migrations sur plusieurs années, une tendance plus précise pourra en être tirée. De même, suivre un grand nombre d'oiseaux sera toujours plus précis que de ne suivre que quelques rares individus. Un grand nombre de données permet généralement d'éviter les mauvaises interprétations d'évènements. En effet si un événement se produit une fois sur un suivi d'un mois, on peut estimer logiquement sa fréquence à une fois par mois, alors que cet événement est peut-être extrêmement rare mais s'est produit par hasard dans la période d'étude, ou il peut *a contrario* être extrêmement fréquent mais ne s'être produit par hasard qu'une seule fois dans la fenêtre d'étude. Plus le suivi est long et plus les oiseaux suivis sont nombreux, plus cela permet de s'affranchir de ce genre d'erreurs.

En ce qui concerne la télémétrie notamment, la précision des données dépend du type de balise utilisé. Par exemple une balise enregistrant plusieurs points par seconde (par exemple balise GPS) sera beaucoup plus précise qu'une balise enregistrant quelques points par jour (Argos par exemple). Mais selon le type d'étude,

il n'est pas nécessaire d'avoir un point de donnée toutes les secondes : par exemple lors du suivi de la migration, le but est souvent de connaître le tracé général emprunté par les oiseaux, c'est pourquoi trois ou quatre localisations par jour peuvent probablement être suffisantes.

Par ailleurs, qu'importe le nombre de données qu'un équipement enregistre par jour, si la précision spatiale qu'elles apportent n'est pas suffisante. Selon l'étude que l'on cherche à mener, il est important de définir cette précision spatiale nécessaire afin d'obtenir des résultats parlants. Par exemple, une localisation enregistrée par GPS sera très précise, entre 5 et 50m, alors qu'au contraire, une balise GLS permettra une localisation précise à 150km près environ. Si l'étude cherche à connaître la position exacte de l'oiseau, par exemple pour savoir le chemin exact qu'il parcourt, les élevages de volailles dans lesquels il s'est rendu (...), il est important que la position dans l'espace soit suffisamment précise. Au contraire si l'on souhaite connaître sa localisation de manière générale, comme par exemple la latitude où il se trouve, un système GLS suffira.

La précision temporelle et spatiale des données sont par conséquent deux éléments importants à prendre en compte lors du choix de l'équipement qui permettra le suivi des oiseaux.

3) Temps et moyens humains nécessaires

De manière générale, il faut s'assurer que le suivi est possible en termes de moyens financiers et humains avant de débiter n'importe quelle méthode de suivi ou de marquage, sinon sa mise en place serait vaine.

En effet, rien ne sert de mettre en place un suivi d'une durée de deux ans si les personnes impliquées dans le projet ne sont disponibles que pendant un an et qu'il n'est pas sûr qu'une relève soit assurée.

De même, un suivi nécessitant une présence quotidienne dans un lieu reculé ne sera pas possible si aucun moyen n'est déployé pour que les chercheurs puissent rester longtemps sur place avec les commodités nécessaires. Cela est possible un temps, mais il est irréaliste d'imaginer qu'un suivi dans de telles conditions soit effectué pendant des mois durant.

De plus, un suivi 24h/24 et 7j/7 n'est pas envisageable pendant une longue période s'il n'y a qu'une seule personne dédiée au travail sur le terrain. Il est nécessaire que plusieurs personnes puissent se relayer.

Bien entendu, le volet financier est également à prendre en compte. Si les moyens financiers sont trop faibles pour permettre d'envoyer les chercheurs sur place, ou encore d'analyser les échantillons au laboratoire, c'est qu'il est nécessaire de revoir le protocole de l'étude. Le partage de données, notamment via MOVEBANK, permet de profiter des données d'autres études, permettant ainsi parfois de limiter le nombre d'individus à équiper, ce qui logiquement diminue les dépenses financières

4) Durée du suivi

La durée du suivi dépend principalement de l'objectif de recherche et de la précision souhaitée. Un suivi peut être long lors d'études comparant plusieurs années entre elles par exemple, ou encore pour suivre la vie entière d'un individu. En revanche par exemple pour le suivi d'une nichée, il s'agit d'une étude courte, d'une durée de quelques semaines. Le matériel utilisé doit donc s'adapter à la durée du suivi : plus celui-ci est long plus l'équipement doit être résistant et capable de rester sur l'oiseau et d'enregistrer des données pendant une longue période. Un suivi court peut se permettre d'utiliser du matériel moins résistant voire parfois moins performant (en durée de batterie notamment). Par exemple pour le suivi d'une nichée rien ne sert d'avoir un piège photographique permettant d'enregistrer des mois durant. De même la (dé)coloration du plumage est tout à fait temporaire mais l'essentiel est que cela suffise aux objectifs de l'étude : par exemple pour détecter sur une journée quels sont les oiseaux s'étant posés dans une mare dont l'eau a été colorée, il n'est pas nécessaire d'avoir des colorants persistants pendant des mois dans l'eau et sur le plumage des oiseaux.

5) Autorisations réglementaires

Une fois que tous les éléments du suivi ont été détaillés, il est impératif d'obtenir les autorisations réglementaires nécessaires avant de débiter quoi que ce soit.

A cette fin, le Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris (MNHN) vérifie chaque protocole impliquant la capture d'oiseaux à des fins scientifiques et décide ou non de valider le projet. Chaque élément du protocole est passé au crible : la taille de l'équipement, sa masse, le moyen de capture, le temps de manipulation ... Son accord est une étape obligatoire pour pouvoir débiter l'étude en question. Il faut parfois leur prouver rétrospectivement que l'étude n'a pas eu d'impact négatif sur l'oiseau, en leur envoyant par exemple une vidéo du vol des oiseaux qui ont été équipés avec des émetteurs.

6) Choix final

D'après ce qui a été vu précédemment, il semble que les questions à se poser pour déterminer le protocole sont donc :

- Quels moyens humains sont disponibles et pendant combien de temps ?
- Quel est le degré attendu/nécessaire de précision temporelle et spatiale des données ?
- Quelle est la facilité de mise en œuvre ?
- Jusqu'à quand les moyens financiers permettront-ils de continuer l'étude ?
- Le bien-être animal est-il respecté ?
- Le matériel est-il adapté à la durée de la période d'étude ?
- Le protocole a-t-il toutes ses chances d'être approuvé par le MNHN ?
- Combien d'oiseaux doit-on équiper ?

Le nombre d'individus à équiper dépend notamment du type d'équipement choisi. En effet, si le système choisi ne transmet pas ses données à distance (GPS par exemple), cela signifie qu'il est nécessaire de recapturer les individus équipés, mais la probabilité de recapture peut être faible. C'est pourquoi équiper un grand nombre d'oiseaux permet de tenter de pallier à ce problème. Cependant, il sera très cher d'équiper un grand nombre d'oiseaux avec des balises GPS. Ainsi il peut parfois

être nécessaire de faire des compromis sur certains points pour que l'étude puisse avoir lieu et donner des résultats satisfaisants, même s'ils ne sont pas parfaits.

Pour rappel, le tableau 6 rappelle les différentes caractéristiques des trois principales méthodes de suivi télémétriques : VHF, Argos et GPS.

Tableau 6 : Comparaison des caractéristiques des émetteurs VHF, Argos et GPS (FAO 2009)

	Type d'émetteur radio		
	VHF	Satellite (PTT)	Satellite (GPS)
Poids Émetteur	< 1 g à 12	12-18 g	30-60 g
Espèce	> 20 g	> 500 g	> 1 kg
Coût			
Minimum	US\$ 100/ea	US\$ 3,200/ea	US \$3,800/ea
Attachment	Ancrage, plumes, implant	Collier, dorsal, implant	Collier, dorsal, implant
Source d'alimentation	Batterie	Batterie ou solaire	Batterie ou solaire
Durée	Jours à mois*	Mois aux années	Mois aux années
Portée	0.1 à 100+ km*	Sans limite	Sans limite
Suivi	Manuel	Par satellite	Par satellite
Intervalle de suivi	Continu*	4 heures	Continu
Exactitude	± 5 m à 1 km*	±100 à 200 m	±10 à 20 m
Fréquence	VHF	UHF	UHF

* Dépend de la taille de l'émetteur et de la méthode de suivi employé.

Le tableau 6 peut permettre d'orienter les chercheurs dans le choix de la méthode de suivi des oiseaux qu'ils souhaitent étudier. Sont intéressants à comparer notamment la masse minimale des espèces qui peuvent être équipées, la durée possible du suivi, l'exactitude de la position ou encore le coût du matériel par animal. Ce tableau résume et compare les méthodes les plus utilisées en télémétrie.

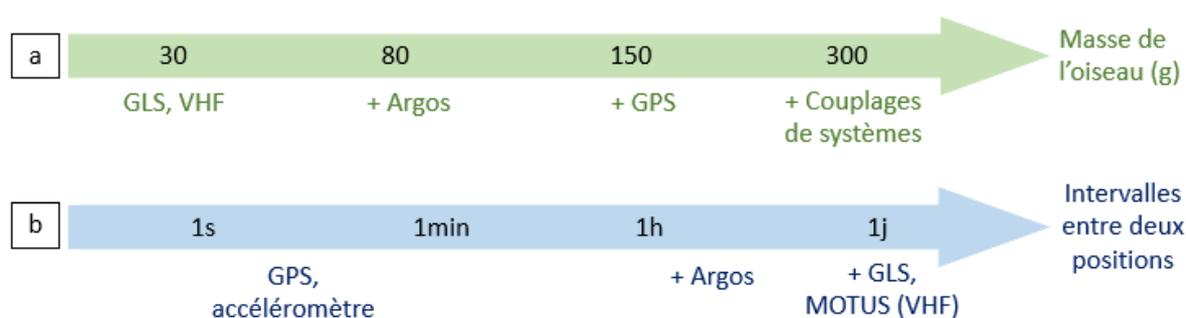


Figure 32 : Equipements possibles à utiliser selon (a) la masse de l'oiseau ou (b) l'intervalle souhaité entre deux positions. Le « + » signifie que les équipements peuvent se rajouter les uns aux autres.

II) Exemple du suivi télémétrique de *Motacilla Alba* autour d'un élevage de canards gras dans le Gers

Dans le cadre de ma thèse, j'ai participé à une partie d'un travail de thèse d'université (Le Gall Ladevèze 2022) portant sur les déplacements individuels de bergeronnettes grises (*Motacilla Alba*) autour d'un élevage de canards gras de plein air dans le Gers. La Bergeronnette grise a été choisie car elle est abondante autour de l'élevage étudié et pourrait faire le lien avec les zones humides aux alentours. Par ailleurs, cette même thèse a permis de montrer qu'elle pouvait être infectée, à de très faibles prévalences cependant, par des virus influenza aviaire A et des chlamydia, rendant le suivi de ses déplacements autour de l'élevage d'autant plus important. En effet elle pourrait être un hôte relai, mécanique ou biologique (Caron et al. 2015).



Figure 34 : Bergeronnette grise (*Motacilla Alba*) (photo personnelle)

La Bergeronnette grise (figure 34) est un passereau vivant notamment à proximité des berges et des cours d'eau, comme l'indique son nom (Snow, Perrins 1998). Certaines populations sont sédentaires et d'autres sont migratrices entre le Sud de l'Europe et l'Afrique du Nord (principalement France et Péninsule Ibérique) pour la période d'hivernage et le Nord de l'Europe (Scandinavie, Grande-Bretagne, Pays-Bas) pour la période de reproduction (Davies 1976). Ainsi en hiver, le nombre d'individus présents dans la zone étudiée correspond à la somme des populations sédentaires et migratrices. De plus, ces nombreux individus ont tendance à davantage se regrouper en hiver en raison de la faible abondance en insectes, qui sont leur principale source

d'alimentation (Stoffolano, Geden 1987). Ils se concentrent alors principalement autour des élevages. Mais les bergeronnettes se regroupent aussi la nuit dans des « dortoirs », se rassemblant le soir juste avant d'y aller et le matin avant de le quitter, pour se socialiser et se toiletter. Ces différents lieux de vie ont des localités différentes, souvent à quelques kilomètres les uns des autres, ce qui constitue un lien écologique entre les élevages et les zones humides environnantes, permettant par conséquent la circulation possible d'agents infectieux. Le site étudié est situé dans le Gers en région Midi-Pyrénées (figure 35). Il s'agit de la Ferme de la Patte d'Oie, un élevage de canards gras de plein air.

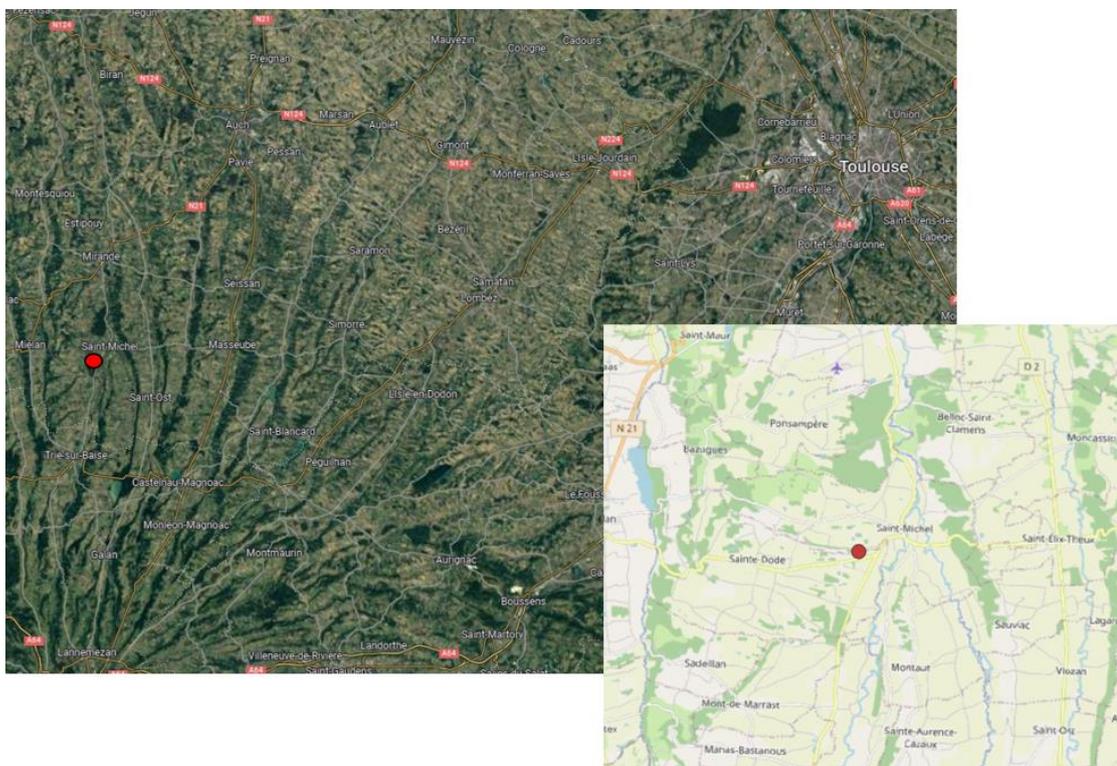


Figure 35 : Site d'étude de la Ferme de la Patte d'Oie, élevage de canards gras de plein air, dans le Gers (Google Maps).

Le site est utilisé pour diverses raisons tout au long de l'année par les bergeronnettes grises : alimentation sur les parcours des canards toute l'année et en particulier l'hiver, rassemblements sur les toits des hangars avant et après la nuit au dortoir, nidification en période de reproduction. En revanche, les oiseaux ne sont pas présents à toutes les saisons et à toute heure de la journée, ce qui suggère la fréquentation d'autres sites. Le but de cette partie de l'étude était ainsi d'identifier ces différents sites, notamment dans une approche épidémiologique afin de voir les

connexions que peuvent établir les bergeronnettes entre différents élevages par exemple, ou avec des zones humides.

Des suivis télémétriques ont ainsi été réalisés sur certains individus afin de pouvoir identifier les lieux fréquentés par les bergeronnettes grises. Le travail ainsi que les résultats obtenus lors de la période où j'ai participé au projet (ce dernier est encore en cours actuellement) vous seront présentés ici.

A) Matériel et méthode

Comme nous l'avons vu dans la première partie de cette thèse, le choix de l'équipement de télémétrie dépend de nombreux facteurs. Premièrement le fait de devoir répondre à une question précise. Ici, afin de pouvoir définir précisément le lieu où la bergeronnette grise était détectée, une précision d'au maximum de quelques dizaines de mètres était requise. Par ailleurs il était nécessaire de pouvoir détecter les individus à plusieurs centaines de mètres, et enfin que la détection et l'identification soient rapides et que le suivi puisse se faire sur plusieurs mois. Les émetteurs satellites, et notamment GPS, étaient tout à fait adaptés pour répondre à ces questions mais il ne faut pas oublier les autres facteurs influençant le choix de la méthode. En effet, l'équipement doit être adapté à l'oiseau et dans le cadre de cette étude, la principale contrainte était la petite taille de la Bergeronnette grise. C'est pourquoi les balises GPS n'ont pas pu être choisies pour réaliser le suivi des individus. L'équipement devait peser entre 0,5 et 0,9g pour ne pas dépasser les 3% de la masse du corps, car les bergeronnettes ont une masse corporelle comprise entre 17 et 30g environ. Il a donc été décidé de choisir un émetteur VHF de 0,62g (modèle nanotag NTQB2-3-2 de chez Lotek, Newmarket, Canada) pouvant par conséquent être installé sur des individus de 21g au moins. Sa longévité d'émission était estimée à 224 jours. Le travail sur terrain avec des localisations VHF est assez fastidieux (FAO 2009), mais heureusement chaque émetteur installé sur une bergeronnette avait un code d'identification unique, émis à fréquence fixe et toutes les 13s. Il y a eu deux sessions pour équiper les bergeronnettes grises : une en fin d'hiver 2021 (février-mars), qui a

permis d'équiper huit bergeronnettes avec des émetteurs, et une autre à l'automne (novembre et décembre), concernant 12 autres individus.

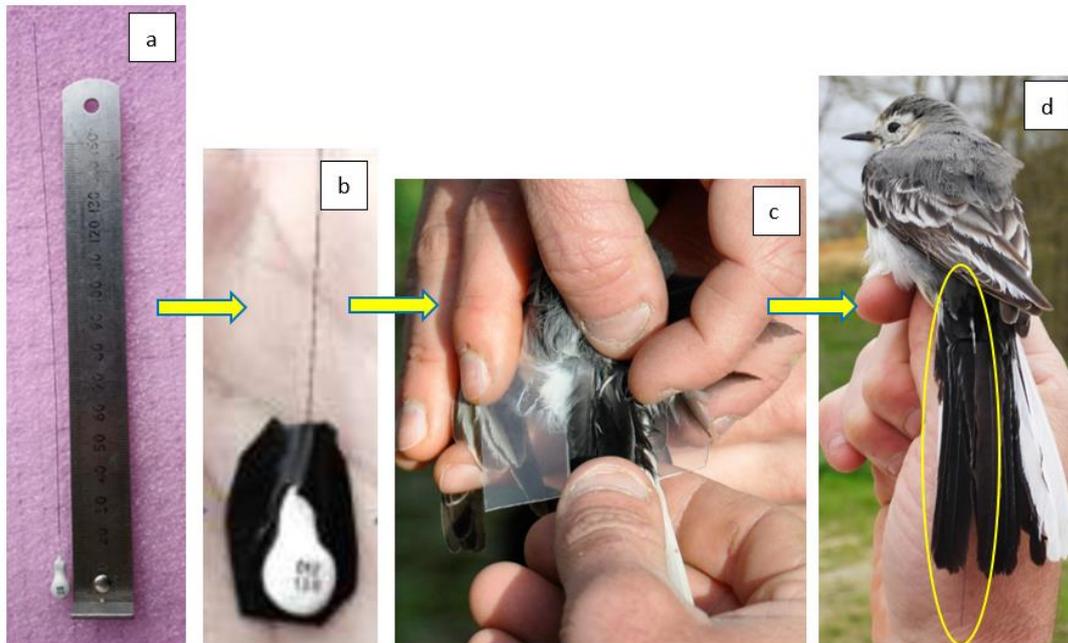


Figure 36 : Description du matériel et de la méthode d'équipement des bergeronnettes grises.
a : Balise émettrice brute de modèle Nanotag NTQB2-3-2 (Lotek, Newmarket, Canada).
b : Balise émettrice adaptée avec du ruban adhésif augmentant la surface de contact.
c et d : Balise émettrice fixée sur l'oiseau à la base des trois rectrices centrales.

Les captures et manipulations ont été réalisées sur le site étudié par Benjamin Vollot, un bagueur généraliste et expérimenté et le protocole a été autorisé par le CRBPO. Comme il en est l'usage, chaque individu capturé a été également équipé d'une bague métallique du MNHN. Avant la pose de tout équipement de télémétrie, les individus ont été pesés, leur état de santé a été évalué et il a été vérifié que l'oiseau n'était pas en période de mue sur les plumes caudales. La balise étant relativement petite et afin de pouvoir la fixer efficacement sur les plumes, il a été nécessaire d'augmenter sa surface de contact à l'aide d'un système l'englobant dans deux épaisseurs de ruban adhésif avec de la colle forte. Ensuite, ce montage a été fixé sur l'oiseau - toujours avec de la colle forte - au niveau de la base des trois plumes rectrices centrales (figure 36). Après avoir vérifié que le dispositif était bien fixé, la bergeronnette grise était relâchée et suivie visuellement le plus longtemps possible afin de pouvoir s'assurer d'un comportement normal et d'une bonne récupération suite à la fixation de l'émetteur et aux manipulations.

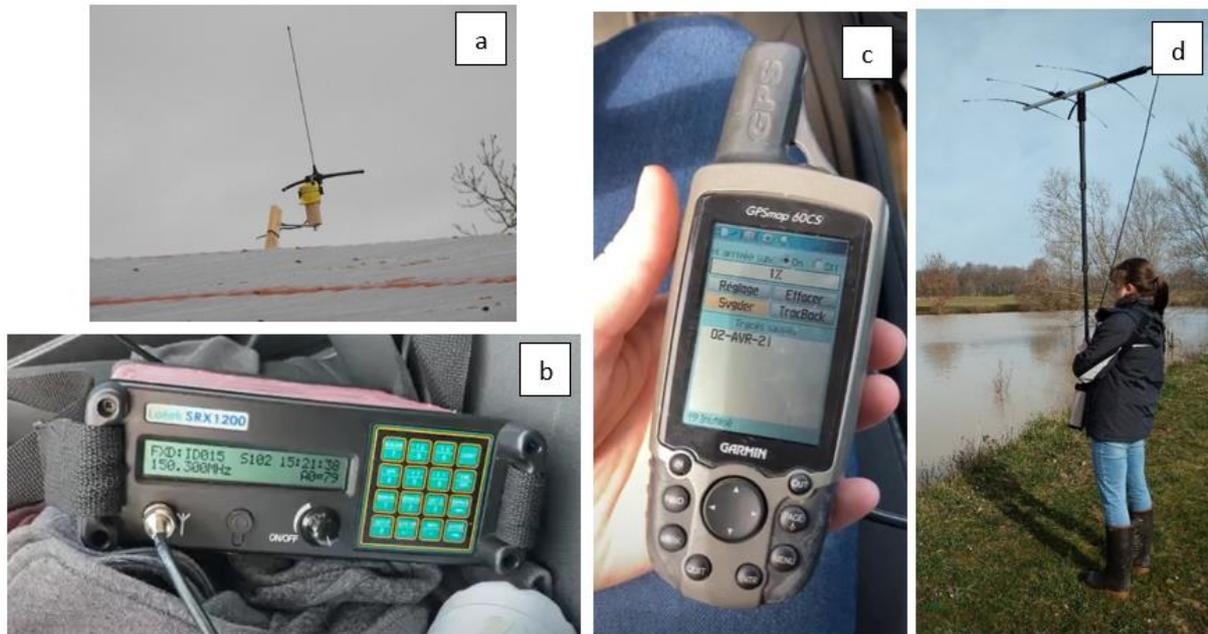


Figure 37 : Méthode de suivi télémétrique des bergeronnettes grises.

- a : Dispositif de réception des ondes VHF émises par les balises : antenne omnidirectionnelle installée sur le toit d'un hangar en point haut de l'élevage, reliée à un récepteur fixe enregistrant les données en continu des individus présents sur l'élevage
- b : Récepteur portable utilisé pour les recherches de balises hors du site d'élevage, pouvant se brancher à une antenne omnidirectionnelle placée sur le toit du véhicule ou à une antenne directionnelle manportée.
- c : GPS de randonnée enregistrant les transects et les waypoint sous le format GPX.
- d : Dispositif de réception des ondes VHF émises par les balises : antenne directionnelle manportée reliée au récepteur portable pour les recherches de balises hors du site d'élevage.

Deux méthodes complémentaires ont ensuite permis le suivi des individus ainsi équipés :

- Via une antenne omnidirectionnelle fixe, positionnée sur le toit d'un hangar sur le point haut de l'élevage (figure 37a) Cette dernière était reliée à un récepteur allumé en continu et réglé sur la fréquence fixe d'émission commune à tous les émetteurs. Les détections étaient enregistrées avec les précisions suivantes : l'identifiant de la balise, la date, l'heure (en minutes et secondes), la force du signal et le gain du récepteur (pour approximer la distance de détection). Lors de chaque visite à l'élevage, ces données étaient récupérées et regroupées dans un tableur numérique. Afin d'avoir la certitude que les balises étaient détectées par l'antenne fixe uniquement sur le site de l'élevage et non dans les champs ou les jardins particuliers à proximité, des tests de sensibilité et de calibration ont été menés auparavant.

- Via un récepteur mobile embarqué dans un véhicule (figure 37b). Ce récepteur était à lecture directe et sans enregistrement. Le but était de trouver les bergeronnettes dans un rayon de 20km autour de l'élevage, ce qui correspond à l'estimation de la distance maximale de dispersion journalière d'un individu. Le récepteur était tout d'abord relié à une antenne omnidirectionnelle fixable au toit de la voiture lors des recherches, puis à une antenne directionnelle Yagi portée à la main (figure 37d) dès qu'un signal semblait être détecté. Le problème principal de cette méthode se posait lors du passage en zones boisées, car le signal de l'émetteur y est interrompu. En milieu ouvert, la détection pouvait aller jusqu'à une distance de 500m entre le récepteur et l'émetteur. Ce sont des calibrations préalables qui ont permis d'évaluer ces distances de détection. Les circuits se sont faits selon les axes routiers de la zone étudiée, en se concentrant davantage autour des sites dits d'intérêt pour l'espèce, c'est-à-dire les élevages, les cours d'eau, les plans d'eau et les habitations, mais toute détection en tout lieu a bien entendu aussi été répertoriée. A chaque détection, la fiche présentée à la figure 38 a été remplie.

Date	Heure	N° point d'écoute (waypoint)	Id-tag	Gain récepteur	S récepteur	Azimut (degré boussole)	N° photo	Type d'habitat	Météo	Remarques
27.03	15h 25	012	15	78	111	195°	6	Ferme (hanger)	ensoleillé	
27.03	19h 45	013	17	79	85	230°	7	Pré à l'arrière du docteur avec hedges	nuit	
28.03	9h 50	014	13 (et 15)	80	79	215°	8	Arrière habitat ferme Patte d'oie	ensoleillé	15 réceptionnée jugement pas possible de la rattraper avec l'antenne à main

Figure 38 : Fiche de suivi utilisée sur le terrain lors de la réalisation des transects routiers.

Lorsqu'un signal semblait être détecté par l'antenne omnidirectionnelle de toit, la voiture était arrêtée, la date et l'heure était notée sur la fiche et un point (waypoint) était créé sur le GPS (figure 37c). Le numéro du waypoint était noté sur la fiche ainsi que l'identifiant de la balise dont le signal était réceptionné et enfin, le gain du récepteur. Il fallait ensuite sortir de la voiture et brancher l'antenne à main Yagi pour pouvoir collecter les informations. Avec l'antenne Yagi, le but était de faire un balayage lent à 360°C (afin d'avoir au moins 2 réceptions du signal, émis toutes les 13 secondes) et de trouver la direction dans laquelle la force du signal (S dans la fiche de la figure

38) était la plus élevée, donnant ainsi la direction dans laquelle se trouvait la bergeronnette. Avec l'aide d'une boussole il était ainsi possible de déterminer l'azimut, angle entre le Nord et la direction pointée, où la bergeronnette devait se situer. Une photo était prise et numérotée afin de déterminer l'environnement où l'oiseau avait été repéré. L'environnement était d'ailleurs à décrire brièvement sur la fiche de suivi, ainsi que la météo et d'éventuelles remarques. L'enregistrement des transects et des waypoints s'est fait à l'aide d'un appareil GPS de randonnée, sous le format GPX (figure 37c). Ces fichiers étaient ensuite importés sur le logiciel QGIS version 3.6 afin de les cartographier.

Les données de localisation des bergeronnettes grises ainsi obtenues, que ce soit par l'antenne fixe ou via les transects mobiles, ont été partagées sur la plateforme en ligne Movebank (<https://www.movebank.org/>).

Ce sont les recherches mobiles qui ont constitué la majeure partie de mon travail au sein de cette étude, même si elles ont été poursuivies par Chloé Le Gall-Ladevèze ainsi que par des étudiants vétérinaires formés à la technique, en partie grâce à des vidéos explicatives que j'ai réalisées. Des transects étaient effectués à hauteur d'une fois par semaine ou un weekend complet sur deux pendant deux mois, du 15 mars au 20 mai 2021 pour la première période, celle durant laquelle j'ai participé à l'étude.

B) Résultats et discussions

Lors de la période à laquelle j'ai participé à l'étude, 8 individus ont été marqués (figure 39), respectivement 3 individus le 20 février et 5 individus le 15 mars. Le suivi mobile a ainsi débuté à partir du 15 mars, mais la station fixe enregistrait déjà les allers et venues des trois individus équipés précédemment. Le sexe ratio (nombre de mâles/nombre de femelles) était un peu déséquilibré puisqu'étant de 0,33. Seul un oiseau, une femelle, était âgée de plus de deux ans, les autres étaient tous dans leur premier hiver.

DATE	HEURE	BAGUE	SEXE	AGE	MASSE (g)	MASSE AVEC EMETTEUR (g)	MASSE EQUIPEMENT (g)	% MASSE EQUIPEMENT	N° EMETTEUR
20/02/21	08:38	9032183	F	2A	22,8	23,44	0,64	2,81	26
20/02/21	08:41	9032184	F	2A	20,29	21	0,71	3,50	17
21/02/21	08:34	9032192	F	2A	19,57	20,51	0,94	4,77	23
15/03/21	09:25	9032575	F	2A	21,73	22,51	0,78	3,59	14
15/03/21	10:10	9032576	F	2A	22,59	23,39	0,80	3,54	16
15/03/21	10:14	9032577	M	2A	24,23	25	0,77	3,18	13
15/03/21	13:31	9032578	M	2A	21,82	22,50	0,68	3,12	12
15/03/21	13:38	9032579	F	+2A	21,12	21,79	0,67	3,17	15

Figure 39 : Récapitulatif des balises posées en février et mars 2021 sur des bergeronnettes capturées sur l'élevage d'étude.

La figure 39 montre également que la masse totale du matériel (incluant le système de fixation, l'émetteur et la masse des bagues métalliques), dépasse les 3% sauf pour un seul individu, mais est toujours inférieure à 5%. Il a été vérifié par le suivi du comportement lors de l'envol que les bergeronnettes le supportaient bien. De même, les résultats présentés par la suite montrent une bonne mobilité des oiseaux équipés. Cependant, si impact minime il y a eu, il n'aura duré que quelques mois, jusqu'à la mue des rectrices.

Du 20 février au 20 mai 2021, plus de 244 000 détections ont été enregistrées par l'antenne fixe. Un des oiseaux, une femelle adulte avec l'identifiant 15, a été détectée 226 313 fois sur l'élevage, correspondant à une présence quotidienne sur le site, de jour comme de nuit, probablement car elle y nichait. A contrario, l'individu avec la balise 14 a été identifiée à peine 143 fois sur cette période, ce qui correspond à la plus faible présence sur le site pour ces huit oiseaux équipés.

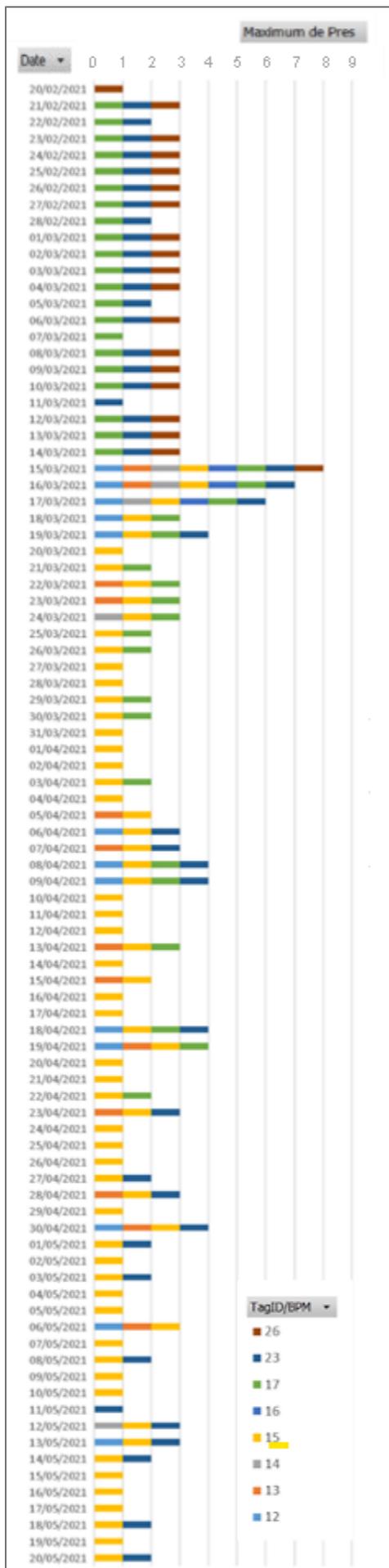


Figure 40 : Jours de présence sur le site de la ferme entre le 20 février 2021 et le 20 mai 2021 pour les 8 bergeronnettes équipées lors de la première session.

La figure 40 ci-contre montre les jours de présence des oiseaux équipés sur le site de la ferme. Lorsqu'un individu a été détecté au moins une fois sur le site un jour en particulier, alors la petite barre colorée correspondant à son numéro de balise est représentée sur le graphique. On peut ainsi remarquer que la bergeronnette équipée de l'émetteur 15 était présente tous les jours sur le site à partir du 15 mars, date de la pose de son équipement, et que l'individu numéro 26 n'a plus jamais été détecté sur le site après le 15 mars alors qu'il était détecté quasiment tous les jours entre le 20 février et le 15 mars.

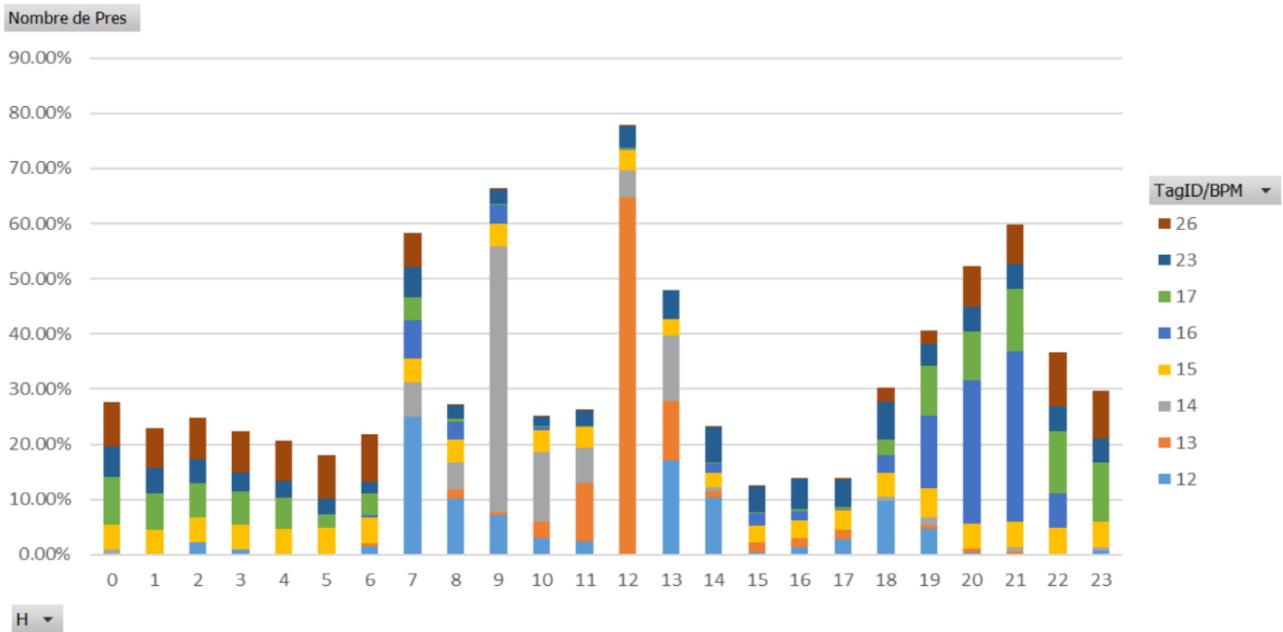
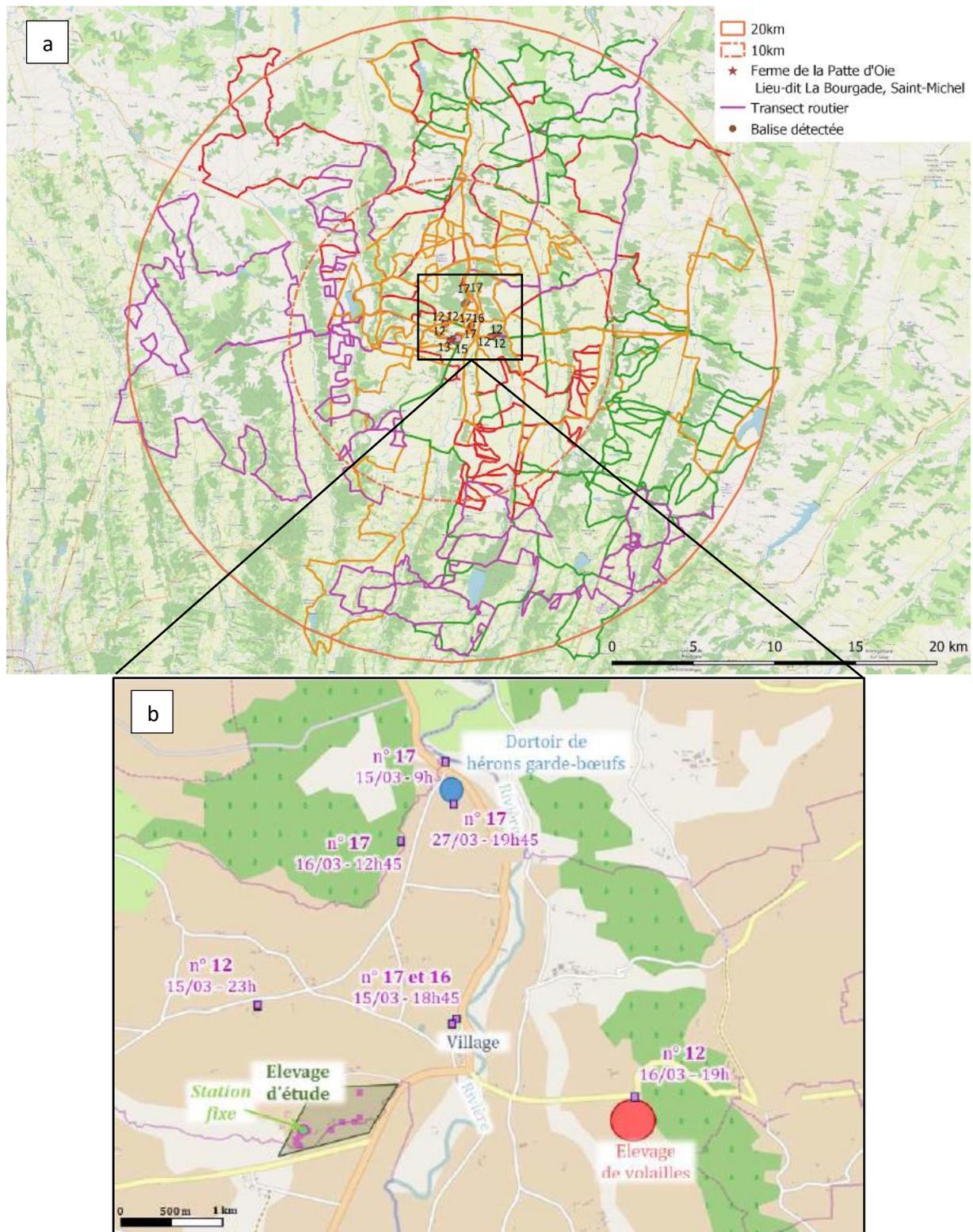


Figure 41 : Répartition des détections des différents individus en fonction de l'heure de la journée. Pourcentages calculés sur la période du 15 mars au 20 mai 2021.

Par ailleurs, la figure 41 représente les horaires de présence des individus sur le site de la ferme. Il s'agit d'un pourcentage de détection calculé sur toute la période du 20 février au 20 mai 2021 par les données de la station fixe. En reprenant l'exemple de l'individu équipé de la balise 15, la figure 41 précise les données de la figure 40 : l'individu est présent de manière homogène tout au long de la journée et de la nuit et ne fait pas uniquement un bref passage une fois par jour. Cela peut par exemple être le signe que l'oiseau niche sur le site, comme nous l'avons déjà supposé du fait du grand nombre de détections (pour rappel 226 313 détections). Par ailleurs il est possible de voir que l'individu numéro 17 était principalement présent sur le site de la tombée de la nuit (environ 18h) jusqu'au lever du soleil (environ 7h). Au contraire, l'individu 13 était davantage présent en milieu de journée, entre 10h et 13h environ.

Les figures 40 et 41 permettent également de prouver la bonne mobilité des individus équipés, de par leurs allers et venues sur le site à des jours et des horaires variés. L'équipement ne semble ainsi pas perturber le comportement des bergeronnettes grises, notamment en ce qui concerne leurs déplacements.

Concernant les suivis mobiles, les cartes de la figure 42 présentent les différents transects réalisés et les balises détectées uniquement par l'antenne mobile entre le 15 mars et le 20 mai 2021.



La figure 42a permet de voir que peu de détections ont été faites avec l'antenne mobile Yagi et la figure 42b montre que seuls trois individus ont été retrouvés en dehors du site de l'élevage d'étude, toujours à moins de 3km de ce dernier et uniquement dans les 15 premiers jours de suivi (balises 17, 16 et 12). Les données obtenues avec l'antenne fixée au toit ne sont pas représentées sur la figure 42. La jeune femelle identifiée par la balise 17 a été détectée quatre fois sur trois jours différents, dont deux jours où elle avait aussi été détectée par la station fixe de l'élevage (15 et 16 mars, figure 40). L'individu avec la balise numéro 16, aussi une jeune femelle, a été repérée une seule fois, le jour où elle a été équipée de l'émetteur, à proximité du village et non loin de l'individu 17. Enfin, le jeune mâle identifié par la balise 12 a été détecté la nuit suivant son équipement. Il était probablement en dortoir à ce moment-là et était situé à proximité d'habitations isolées. Il a été repéré le lendemain soir à proximité d'un autre élevage de volailles et était présent en journée sur le site de la ferme (figures 42 et 40).



Figure 43 : Détections des émetteurs VHF de bergeronnettes grises par le récepteur fixe sur l'élevage et le récepteur mobile hors de l'élevage entre le 20 février et le 20 mai 2021 (Le Gall Ladevèze 2022).

Les bandes verticales bleutées indiquent les jours de recherches mobiles par transects routiers.

a : Tous individus détectés par la station fixe à partir du jour de leur équipement.

b : Détections fixes et mobiles des individus, sauf le numéro 15 présent constamment sur l'élevage. Les détections mobiles sont écrites en toutes lettres et les détections fixes sont représentées par les barres colorées.

c : Grossissement en axe Y de la partie b, permettant de visualiser les détections par l'antenne fixe plus rares au printemps.

La figure 43 récapitule sous forme de frise chronologique les différentes détections. Les détections par l'antenne fixe sont représentées par les barres colorées, chaque couleur correspondant à un individu, et les détections mobiles sont indiquées en toutes lettres dans la partie b du graphique. Les détections mobiles ont forcément lieu un jour de recherches mobiles, représenté par une bande bleutée verticale. L'individu 15 étant présent en permanence sur le site, il a été retiré des parties b et c

de la figure 43 afin de mieux visualiser les comportements des autres individus. Grâce à cette figure, il est possible de voir que les détections se faisaient de plus en plus rares après le 27 mars (sauf pour l'individu 15) mais pas au point d'être inexistantes. Cela permet de savoir que ces individus étaient toujours présents dans les environs mais qu'ils étaient beaucoup moins présents autour de l'élevage et plus mobiles. Pourtant, les transects routiers effectués pendant cette même période n'ont pas donné lieu à des détections, puisque c'est le 27 mars que le dernier oiseau a été repéré grâce à l'antenne mobile.

Les données de suivi obtenues ont permis de mettre en évidence le fait que les bergeronnettes grises ne restent pas uniquement sur le site de l'élevage étudié et font bel et bien des allers-retours avec l'extérieur. En revanche les détections par transects mobiles sont trop peu nombreuses pour connaître précisément les autres lieux qu'elles fréquentent. Cela permet tout de même de prouver que ces oiseaux, dont la proximité avec les canards d'élevage a été démontrée (Le Gall-Ladevèze et al. 2022), pourraient disperser des agents infectieux dans leur environnement et auprès de l'avifaune aquatique, mais aussi introduire ces agents infectieux dans les sites d'élevages et entre les sites d'élevage (espacés de deux-trois kilomètres environ). Ces échanges potentiels sont à considérer sérieusement.

Cependant, le suivi réalisé et présenté ici s'est fait sur la fin de période d'hivernage (et pendant la période de reproduction) et il aurait été intéressant de pouvoir faire un suivi complet de toute la période d'hivernage car il s'agit de la période la plus à risque d'après les résultats de suivis infectieux sur l'élevage étudié (Le Gall Ladevèze 2022) et par rapport aux dates d'introduction des VIAHP dans la filière dans le Sud-Ouest lors des épizooties des précédents hivers (ANSES 2022). C'est pourquoi l'étude s'est poursuivie en automne avec un nouveau groupe de bergeronnettes grises qui ont été suivies sur toute la période d'hivernage suivante.

Par ailleurs, il est important de noter différents biais présents dans cette étude. Tout d'abord, peu d'individus ont été marqués, et leurs comportements étaient très variables comme le montre la figure 41. En équipant davantage d'oiseaux, cela aurait permis de mettre en évidence une tendance générale sur leur comportement ou au contraire d'avoir une idée plus précise sur leur diversité. De cette manière, en augmentant le nombre d'individus équipés, cela aurait probablement permis de les

détecter plus fréquemment hors du site d'élevage. En effet les détections par l'antenne Yagi lors des transects routiers sont très rares et il est difficile d'estimer la fréquence d'utilisation des autres lieux (zones humides, autres élevages) par les bergeronnettes. De surcroît, certains individus ont disparu assez tôt au cours de nos suivis (l'émetteur numéro 26 par exemple), diminuant encore la taille de notre échantillon et soulevant la question de leur devenir : les possibilités sont nombreuses et le décès, la migration ou la perte de l'équipement sont les hypothèses principales.

De plus, des incertitudes techniques sont à soulever : par exemple il a été remarqué que le relief et les forêts pouvaient empêcher les ondes de parcourir de trop longues distances, or il se trouve que la zone d'étude était plutôt vallonnée et souvent arborée. En outre, lors des transects routiers, le signal du récepteur était facilement brouillé par le passage près de lignes ou clôtures électriques ou encore lors de la proximité avec des camions. La détection d'un individu dans ces conditions particulières était quasiment inenvisageable.

Par ailleurs, des incertitudes dues au matériel étaient présentes : en effet aucun membre de l'équipe n'avait déjà travaillé avec du matériel Lotek®, rendant son utilisation plus compliquée. De la même manière, l'absence d'expérience sur la Bergeronnette grise, qui n'a *a priori* jamais fait l'objet de tels suivis, a fait qu'il a parfois fallu tâtonner, mais le point positif est que ce travail est un premier pas dans l'étude de cette espèce, pour laquelle il reste encore beaucoup de choses à apprendre.

Pour améliorer notre étude, nous aurions pu réaliser des transects routiers plus fréquemment ou avec plusieurs véhicules en simultané pour augmenter les chances de détecter un individu. Cela aurait nécessité plus de matériel et plus de temps. La période de la première session de marquage et de suivi aurait pu être optimisée pour avoir un suivi complet de la période d'hivernage. Nous aurions également pu équiper davantage d'individus, mais les autorisations réglementaires ne vont pas forcément dans ce sens.

En termes d'épidémiologie, le suivi des hérons garde-bœufs (*Bubulcus ibis*) est une autre piste à suivre car ces oiseaux sont également très présents sur les sites d'élevage et les zones humides, ce qui fait qu'ils sont de potentiels hôtes relais pour les agents infectieux des canards. Cette espèce a d'ailleurs été désignée comme étant

à cibler lors d'études de surveillance infectieuse et des souches de chlamydia et de mycoplasmes ont été détectées et identifiées dans leurs fientes (Le Gall Ladevèze 2022). Les hérons garde-bœufs pourraient relier des sites plus éloignés car leur capacité de déplacement journalier est probablement plus grande. Leur suivi serait également plus facile de par leur taille, permettant un suivi visuel plus aisé, mais aussi et surtout car ils pourraient porter un équipement plus lourd afin de réaliser un suivi en continu (balise GPS par exemple). Cependant, les hérons garde-bœufs sont délicats à capturer et d'autres méthodes devraient être mises en place pour limiter leur dérangement et des blessures lors de la capture (FAO 2009).

Conclusion

Cette thèse a permis de dresser les différentes méthodes existantes actuellement pour étudier les oiseaux notamment afin de répondre à des problématiques épidémiologiques. En étudiant les déplacements des oiseaux il est par exemple possible de repérer les potentielles zones de dispersion d'agents pathogènes.

Il existe des méthodes de type observation simple : avec l'utilisation de sa vue, de pièges photographiques, de radars météorologiques ou encore d'enregistrements acoustiques. Ensuite, les marques visuelles telles que le baguage ou l'utilisation d'autres marquages corporels peuvent permettre de réaliser des suivis plus individualisés. Enfin, les méthodes de suivi de type télémétrie, utilisant des ondes radio ou des satellites notamment, donnent lieu à des suivis bien plus précis de chaque individu équipé. Les transpondeurs électroniques RFID et les biologgers sont également des moyens électroniques de suivi des oiseaux. Des méthodes différentes et encore assez méconnues peuvent également être utilisées, telles que l'analyse de l'ADN environnemental ou l'analyse des isotopes stables dans les plumes. Chacune de ses méthodes peut être utilisée dans la surveillance ou l'étude d'évènements sanitaires, comme cela a été montré avec les nombreux exemples mis en avant tout au long de cette thèse.

Cependant, avec une telle diversité des méthodes de suivis et d'équipements possibles, il est nécessaire de faire un choix. Les chercheurs choisiront la méthode la plus adaptée, en fonction de l'espèce d'oiseau, de la facilité de mise en œuvre, de la durée souhaitée de suivi, des temps et moyens humains nécessaires, de la précision des données et des fonds financiers disponibles. Bien entendu, le protocole doit également être validé par les autorités compétentes.

Dans une seconde partie, une étude de télémétrie sur des bergeronnettes grises évoluant autour d'un élevage de canards gras du Gers a été mise en œuvre afin de déterminer leur éventuel rôle épidémiologique vis-à-vis d'agents pathogènes aviaires. Ce travail a été réalisé dans le cadre de la thèse d'université de Dr Le Gall-Ladevèze. Lors de la session à laquelle j'ai participé, huit bergeronnettes grises ont été équipées d'émetteurs VHF. Le suivi a été réalisé via une antenne fixe recevant les signaux émis sur le site d'élevage étudié, ainsi que via une antenne mobile Yagi, utilisée lors de transects routiers réalisés dans un rayon de 20km autour de l'élevage

étudié. Cette étude est la première de ce type à étudier les Bergeronnettes grises. Les résultats ont permis de montrer que les individus équipés avaient tous des comportements très différents, certains individus évoluant sur le site de l'élevage tout au long de la journée, alors que d'autres ne l'utilisent que la nuit ou uniquement sur un créneau horaire assez restreint. Les suivis mobiles par transects routiers en dehors du site étudié n'ont pas permis de détecter beaucoup d'individus, mais les rares détections ont permis de voir que les bergeronnettes pouvaient se déplacer entre l'élevage étudié et d'autres zones d'intérêt épidémiologique (zones humides et autres élevages). Cependant, des biais sont à prendre en compte et la mise en œuvre de ce suivi aurait pu être améliorée.

Références bibliographiques

ALTIZER, Sonia, BARTEL, Rebecca et HAN, Barbara A., 2011. Animal Migration and Infectious Disease Risk. *Science*. 21 janvier 2011. Vol. 331, n° 6015, pp. 296-302. DOI 10.1126/science.1194694.

ANSES, 2022. *Avis relatif à un retour d'expérience sur la crise influenza aviaire hautement pathogène 2020-2021 (3ème partie) (No. Saisine n° 2021-SA-0022)*. [en ligne]. 13 janvier 2022. - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail. [Consulté le 27 octobre 2022]. Disponible à l'adresse : <https://www.anses.fr/fr/system/files/SABA2021SA0022-2.pdf>

ARGOS-SYSTEM, 2022. Suivi des animaux : oiseaux, animaux marins et terrestres. *Argos* [en ligne]. 2022. [Consulté le 3 octobre 2022]. Disponible à l'adresse : <https://www.argos-system.org/fr/applications-argos/suivi-des-animaux/>

ASCHWANDEN, Janine, STARK, Herbert, PETER, Dieter, STEURI, Thomas, SCHMID, Baptiste et LIECHTI, Felix, 2018. Bird collisions at wind turbines in a mountainous area related to bird movement intensities measured by radar. *Biological Conservation*. 1 avril 2018. Vol. 220, pp. 228-236. DOI 10.1016/j.biocon.2018.01.005.

AUFRAY, Renan et ROVILLÉ, Manuelle, 2022. Les écosystèmes. *sagascience* [en ligne]. 2022. [Consulté le 13 novembre 2022]. Disponible à l'adresse : https://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosbiodiv/index.php?pid=decouv_chapA&zoom_id=zoom_a1_3

BARBAULT, Robert et LEBRETON, Jean-Dominique, 2022. Populations animales (dynamique des). *Encyclopædia Universalis* [en ligne]. [Consulté le 3 novembre 2022]. Disponible à l'adresse : <https://www.universalis.fr/encyclopedie/animal-dynamique-des-populations/>

BIRD BANDING LABORATORY, 2019. À propos des marqueurs auxiliaires | U.S. Geological Survey. *U.S. Geological Survey (USGS) Science for a changing world. Bird Banding Laboratory*. [en ligne]. 24 juillet 2019. [Consulté le 5 septembre 2022].

Disponible à l'adresse : <https://www.usgs.gov/labs/bird-banding-laboratory/science/propos-des-marqueurs-auxiliaires#overview>

BODEY, Thomas W., CLEASBY, Ian R., BELL, Fraser, PARR, Nicole, SCHULTZ, Anthony, VOTIER, Stephen C. et BEARHOP, Stuart, 2018. A phylogenetically controlled meta-analysis of biologging device effects on birds: Deleterious effects and a call for more standardized reporting of study data. *Methods in Ecology and Evolution*. 2018. Vol. 9, n° 4, pp. 946-955. DOI 10.1111/2041-210X.12934.

BONTER, David N. et BRIDGE, Eli S., 2011. Applications of radio frequency identification (RFID) in ornithological research: a review: RFID Applications in Ornithology. *Journal of Field Ornithology*. mars 2011. Vol. 82, n° 1, pp. 1-10. DOI 10.1111/j.1557-9263.2010.00302.x.

BOUTIN, Jean-Marie, ERAUD, Cyril, LORMÉE, Hervé, RIVIÈRE, Marcel et DUCAMP, Jean-Jacques, 2011. Le GLS: un éclairage nouveau sur la migration de la tourterelle des bois. *Faune Sauvage*. 2011. N° 293, pp. 2.

BROWN, Justin D., STALLKNECHT, David E. et SWAYNE, David E., 2008. Experimental infections of herring gulls (*Larus argentatus*) with H5N1 highly pathogenic avian influenza viruses by intranasal inoculation of virus and ingestion of virus-infected chicken meat. *Avian Pathology: Journal of the W.V.P.A.* août 2008. Vol. 37, n° 4, pp. 393-397. DOI 10.1080/03079450802216595.

BRUDERER, B., PETER, D. et STEURI, T., 1999. Behaviour of migrating birds exposed to X-band radar and a bright light beam. *Journal of Experimental Biology*. 1 mai 1999. Vol. 202, n° 9, pp. 1015-1022. DOI 10.1242/jeb.202.9.1015.

BRUST, Vera, EIKENAAR, Cas, PACKMOR, Florian, SCHMALJOHANN, Heiko, HÜPPOP, Ommo et CZIRJÁK, Gábor Á., 2022. Do departure and flight route decisions correlate with immune parameters in migratory songbirds? *Functional Ecology* [en ligne]. 23 septembre 2022. Vol. n/a, n° n/a. [Consulté le 30 septembre 2022]. DOI 10.1111/1365-2435.14187. Disponible à l'adresse : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/1365-2435.14187>

CAMACHO-SCHLENKER, Sol, 2012. *Etude des réseaux de communications acoustiques chez un oiseau chanteur forestier, le Troglodyte mignon (Troglodytes*

trogodytes) [en ligne]. Ecole doctorale signalisations et réseaux intégratifs en biologie. Paris : Université Paris Sud - Paris XI. [Consulté le 10 novembre 2022]. Disponible à l'adresse : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00712924/document>

CAPPELLE, Julien, GAIDET, Nicolas, IVERSON, Samuel A., TAKEKAWA, John Y., NEWMAN, Scott H., FOFANA, Bouba et GILBERT, Marius, 2011. Characterizing the interface between wild ducks and poultry to evaluate the potential of transmission of avian pathogens. *International Journal of Health Geographics*. 15 novembre 2011. Vol. 10, n° 1, pp. 60. DOI 10.1186/1476-072X-10-60.

CARON, Alexandre, CAPPELLE, Julien, CUMMING, Graeme S, DE GARINE-WICHATITSKY et GAIDET, Nicolas, 2015. Bridge hosts, a missing link for disease ecology in multi-host systems. *Véeterinary Research*. 2015. N° 46, pp. 11. DOI 10.1186/s13567-015-0217-9.

CEBC et CNRS, 2020. Le vautour fauve - études de bio-logging. [en ligne]. 2020. [Consulté le 3 novembre 2022]. Disponible à l'adresse : <https://www.cebc.cnrs.fr/services/bio-logging/le-vautour/>

CENTRE D'ETUDES BIOLOGIQUES DE CHIZÉ (CEBC) et CNRS, 2020. Qu'est-ce que le bio-logging? [en ligne]. 2020. [Consulté le 2 novembre 2022]. Disponible à l'adresse : <https://www.cebc.cnrs.fr/services/bio-logging/quest-ce-que-le-bio-logging/>

CHAN, Ying-Chi, BRUGGE, Maarten, TIBBITTS, T. Lee, DEKINGA, Anne, PORTER, Ron, KLAASSEN, Raymond H. G. et PIERSMA, Theunis, 2016. Testing an attachment method for solar-powered tracking devices on a long-distance migrating shorebird. *Journal of Ornithology*. janvier 2016. Vol. 157, n° 1, pp. 277-287. DOI 10.1007/s10336-015-1276-4.

CHANG, Yuan-Mou, HATCH, Kent A., DING, Tzung-Su, EGGETT, Dennis L., YUAN, Hsiao-Wei et ROEDER, Beverly L., 2008. Using stable isotopes to unravel and predict the origins of great cormorants (*Phalacrocorax carbo sinensis*) overwintering at Kinmen. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*. 30 avril 2008. Vol. 22, n° 8, pp. 1235-1244. DOI 10.1002/rcm.3487.

CLARIDGE, G.F., 1990. Methods for attaching patagial tags, and a description of a new method. *Corella*. 1990. pp. 91-93.

CNRS, CRBPO et MNHN, 2016. *Protocole Thème RARE* [en ligne]. 17 février 2016. [Consulté le 7 novembre 2022]. Disponible à l'adresse : https://crbpo.mnhn.fr/IMG/pdf/protocole_rare_v1.pdf

CONNOR, Edward F., LI, Shidong et LI, Steven, 2012. Automating identification of avian vocalizations using time–frequency information extracted from the Gabor transform. *The Journal of the Acoustical Society of America*. juillet 2012. Vol. 132, n° 1, pp. 507-517. DOI 10.1121/1.4726006.

CORNELL LAB OF ORNITHOLOGY, 2022. Cornell Lab of Ornithology—Home. *Birds, Cornell Lab of Ornithology* [en ligne]. 2022. [Consulté le 7 septembre 2022]. Disponible à l'adresse : <https://www.birds.cornell.edu/home>

CRBPO, 2021a. Le baguage, pour quoi faire ? *CRBPO* [en ligne]. 30 novembre 2021. [Consulté le 31 août 2022]. Disponible à l'adresse : <https://crbpo.mnhn.fr/spip.php?article5>

CRBPO, 2021b. Programmes de recherche - [CRBPO]. [en ligne]. 19 octobre 2021. [Consulté le 7 novembre 2022]. Disponible à l'adresse : <https://crbpo.mnhn.fr/spip.php?rubrique8>

CRBPO, 2022a. CRBPO - Data - Consultation des données françaises de baguage d'oiseaux. [en ligne]. 2022. [Consulté le 31 août 2022]. Disponible à l'adresse : <https://crbpodata.mnhn.fr/>

CRBPO, 2022b. Marque couleur - [Le C.R.B.P.O.]. [en ligne]. 15 août 2022. [Consulté le 4 septembre 2022]. Disponible à l'adresse : <https://crbpo.mnhn.fr/spip.php?article33>

CRBPO, MNHN et CNRS, 2022. *Questionnaire à remplir : Bilan de programme personnel pour des recherches sur des oiseaux sauvages faisant appel au marquage et/ou au prélèvement simple de tissus*. [en ligne]. 25 mai 2022. [Consulté le 17 novembre 2022]. Disponible à l'adresse : https://crbpo.mnhn.fr/IMG/docx/bilan_de_prog_pers_20210705.docx

CRBPO, MNHN, CNRS et OFB, 2021. *Guide des codes des espèces. Tailles et types de bagues recommandés* [en ligne]. 2021. [Consulté le 3 septembre 2022]. Disponible à l'adresse : https://crbpo.mnhn.fr/IMG/pdf/guide_bague.pdf

CURK, Teja, SCACCO, Martina, SAFI, Kamran, WIKELSKI, Martin, FIEDLER, Wolfgang, KEMP, Ryno et WOLTER, Kerri, 2021. Wing tags severely impair movement in African Cape Vultures. *Animal Biotelemetry*. 9 mars 2021. Vol. 9, n° 1, pp. 11. DOI 10.1186/s40317-021-00234-2.

DAVIES, N. B., 1976. Food, Flocking and Territorial Behaviour of the Pied Wagtail (*Motacilla alba yarrellii* Gould) in Winter. *The Journal of Animal Ecology*. février 1976. Vol. 45, n° 1, pp. 235. DOI 10.2307/3777.

DEBOUZIE, D, 1999. La notion de population en dynamique et génétique des populations. *Nature Sciences Sociétés*. 12 octobre 1999. Vol. 7, n° 4, pp. 19-26. DOI 10.1016/S1240-1307(00)86465-1.

DITTMANN, Tobias et BECKER, Peter H., 2003. Sex, age, experience and condition as factors affecting arrival date in prospecting common terns, *Sterna hirundo*. *Animal Behaviour*. mai 2003. Vol. 65, n° 5, pp. 981-986. DOI 10.1006/anbe.2003.2128.

DOMAIZON, Isabelle et OFB, 2020. Caractérisation de la biodiversité par l'ADNe. *Le portail technique de l'OFB* [en ligne]. janvier 2020. [Consulté le 22 septembre 2022]. Disponible à l'adresse : <https://professionnels.ofb.fr/index.php/fr/node/456>

DUARTE, Leila Magna Gomes, 2013. *IMPACTS OF CAPTURE AND HANDLING ON WILD BIRDS*. Cardiff : School of biosciences organisms and environment, Cardiff UK.

DURIEZ, Olivier, 2021. Les techniques télémétriques et bio-logging. . Diaporama de cours. Université de Montpellier. octobre 2021.

EASTWOOD, Eric, 1967. *Radar Ornithology*. Londres : Methuen & Co Ltd.

ELBERS, Armin R. W. et GONZALES, José L., 2019. Quantification of visits of wild fauna to a commercial free-range layer farm in the Netherlands located in an avian influenza hot-spot area assessed by video-camera monitoring. *Transboundary and*

Emerging Diseases. 6 octobre 2019. Vol. 67, n° 2, pp. 661-677.

DOI 10.1111/tbed.13382.

EUROPEAN COLOUR-RING BIRDING, 2022. European colour-ring Birding | cr-birding. *European colour-ring Birding* [en ligne]. 2022.

[Consulté le 4 septembre 2022]. Disponible à l'adresse : <https://cr-birding.org/>

FAO, 2009. *Oiseaux sauvages et influenza aviaire: une introduction à la recherche appliquée sur le terrain et les techniques d'échantillonnage épidémiologique*. Rome :

FAO. FAO Production et santé animales. Manuel, 5. ISBN 978-92-5-205908-0.

636.508 96203

FARNSWORTH, Andrew, 2005. Flight Calls and Their Value for Future Ornithological Studies and Conservation Research. *The Auk*. 1 juillet 2005. Vol. 122, pp. 733-746.

DOI 10.1093/auk/122.3.733.

FAUNE FRANCE, 2022a. Faune-France : pointage précis - www.faune-france.org.

[en ligne]. 2022. [Consulté le 17 novembre 2022]. Disponible à l'adresse :

https://www.faune-france.org/index.php?m_id=20052

FAUNE FRANCE, 2022b. Lire les bagues - www.faune-france.org. [en ligne]. 2022.

[Consulté le 4 septembre 2022]. Disponible à l'adresse : [https://www.faune-](https://www.faune-france.org/index.php?m_id=20193)

[france.org/index.php?m_id=20193](https://www.faune-france.org/index.php?m_id=20193)

GAIDET, Nicolas, CAPPELLE, Julien, TAKEKAWA, John Y., PROSSER, Diann J., IVERSON, Samuel A., DOUGLAS, David C., PERRY, William M., MUNDKUR, Taej

et NEWMAN, Scott H., 2010. Potential spread of highly pathogenic avian influenza H5N1 by wildfowl: dispersal ranges and rates determined from large-scale satellite

telemetry: Potential dispersal of H5N1 HPAI virus by wildfowl. *Journal of Applied Ecology*. octobre 2010. Vol. 47, n° 5, pp. 1147-1157. DOI 10.1111/j.1365-

2664.2010.01845.x.

GAIDET, Nicolas, CATTOLI, Giovanni, HAMMOUMI, Saliha, NEWMAN, Scott H.,

HAGEMEIJER, Ward, TAKEKAWA, John Y., CAPPELLE, Julien, DODMAN, Tim,

JOANNIS, Tony, GIL, Patricia, MONNE, Isabella, FUSARO, Alice, CAPUA, Ilaria,

MANU, Shiiwuua, MICHELONI, Pierfrancesco, OTTOSSON, Ulf, MSHELBWALA,

John H., LUBROTH, Juan, DOMENECH, Joseph et MONICAT, François, 2008.

Evidence of Infection by H5N2 Highly Pathogenic Avian Influenza Viruses in Healthy Wild Waterfowl. *PLoS Pathogens*. 15 août 2008. Vol. 4, n° 8, pp. e1000127. DOI 10.1371/journal.ppat.1000127.

GAST, Gaston, 2022. Ornithologie baguage scientifique. [en ligne]. 2022. [Consulté le 31 août 2022]. Disponible à l'adresse : <https://cb.naturalsciences.be/OrnithoWeb/index.htm>

GAUTHIER-CLERC, M, GENDNER, J P, RIBIC, C A, FRASER, W R, WOEHLER, E J, DESCAMPS, S, GILLY, C, LE BOHEC, C et LE MAHO, Y, 2004. Long-term effects of flipper bands on penguins. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 7 décembre 2004. Vol. 271, n° Suppl 6, pp. S423-S426. DOI 10.1098/rsbl.2004.0201.

GOVAERE, Arnaud, DEVOS, Sebastien, ELLEBOODE, Cédric, ANDRÉ, Yann, DELCOURT, Vincent et LAGRANGE, Hubert, 2008. Étude des mouvements d'oiseaux par radar en France – Analyse des données existantes –. In : *32e colloque francophone d'ornithologie* [en ligne]. 1 janvier 2008. [Consulté le 7 septembre 2022]. Disponible à l'adresse : https://eolien-biodiversite.com/IMG/pdf/biotope-lpo-analysebddd-radar-03_1239289245.pdf

GREPOM, 2020. Le suivi scientifique des vautours africains au Maroc – Groupe de Recherche pour la Protection des Oiseaux au Maroc (GREPOM). [en ligne]. 27 juin 2020. [Consulté le 4 novembre 2022]. Disponible à l'adresse : <https://www.grepom.org/le-suivi-scientifique-des-vautours-africains-au-maroc/>

HIRSCHINGER, Julien, 2020. *Evaluation des risques sanitaires associés à l'exposition des élevages avicoles à l'avifaune sauvage péri-domestique. Exemple des élevages conservatoires d'outardes houbara aux Emirats Arabes Unis*. Toulouse : Institut National Polytechnique de Toulouse.

HIRSCHINGER, Julien, MARESCOT, Lucile, HINGRAT, Yves, GUERIN, Jean Luc, LE LOC'H, Guillaume et VERGNE, Timothée, 2021. Newcastle disease virus transmission dynamics in wild peridomestic birds in the United Arab Emirates. *Scientific Reports*. 10 février 2021. Vol. 11, n° 1, pp. 3491. DOI 10.1038/s41598-020-79184-3.

HOBSON, Keith A., 1999. Tracing origins and migration of wildlife using stable isotopes: a review. *Oecologia*. 20 août 1999. Vol. 120, n° 3, pp. 314-326. DOI 10.1007/s004420050865.

HODGSON, Jarrod C., BAYLIS, Shane M., MOTT, Rowan, HERROD, Ashley et CLARKE, Rohan H., 2016. Precision wildlife monitoring using unmanned aerial vehicles. *Scientific Reports*. 17 mars 2016. Vol. 6, pp. 22574. DOI 10.1038/srep22574.

HOI, Herbert, KRIŠTOFÍK, J, DAROLOVÁ, Alžbeta et HOI, C, 2012. Experimental evidence for costs due to chewing lice in the European bee-eater (*Merops apiaster*). *Parasitology*. 1 janvier 2012. Vol. 139, pp. 53-9. DOI 10.1017/S0031182011001727.

HOWE, Rebecca J, 2022. *Effects of Experimental Malaria Infection On Migration of Yellow-rumped Warblers (Setophaga coronata)* [en ligne]. Master of Science degree in Biology. Western Ontario. [Consulté le 30 septembre 2022]. Disponible à l'adresse : <https://ir.lib.uwo.ca/etd/8374>

HULL, Buzz et BLOOM, Pete, 2001. Manuel sur les techniques de baguage des oiseaux de proie en Amérique du Nord. *North American Banding Council*. avril 2001. pp. 28.

HUTCHINGS MUSEUM INSTITUTE, 2017. *Dho-Gazza Net* [en ligne]. 25 juillet 2017. [Consulté le 31 octobre 2022]. Disponible à l'adresse : <https://vimeo.com/226999006>

ISERBYT, Arne, GRIFFIOEN, Maaike, BORREMANS, Benny, EENS, Marcel et MÜLLER, Wendt, 2018. How to quantify animal activity from radio-frequency identification (RFID) recordings. *Ecology and Evolution*. 2 octobre 2018. Vol. 8, n° 20, pp. 10166-10174. DOI 10.1002/ece3.4491.

JAMAULT, Roland, 2007. *Petit guide illustré du lecteur de bague* [en ligne]. décembre 2007. [Consulté le 4 septembre 2022]. Disponible à l'adresse : http://seawatch.free.fr/go35/Guide_lecteur_bagues.pdf

JEONG, Sol, LEE, Dong-Hun, KIM, Yu-Jin, LEE, Sun-Hak, CHO, Andrew Y, NOH, Jin-Yong, TSEREN-OCHIR, Erdene-Ochir, JEONG, Jei-Hyun et SONG, Chang-Seon, 2019. Introduction of Avian Influenza A(H6N5) Virus into Asia from North

America by Wild Birds. *Emerging Infectious Diseases*. 11 novembre 2019. Vol. 25, n° 11, pp. 3. DOI 10.3201/eid2511.190604.

JUILLARD, Michel, 1983. La photographie sur pellicule infrarouge: une méthode pour l'étude du régime alimentaire des oiseaux cavicoles. *Revue d'Ecologie, Terre et Vie, Société nationale de protection de la nature*. 1983. Vol. 37, pp. 20.

KEAWCHAROEN, Juthatip, VAN RIEL, Debby, VAN AMERONGEN, Geert, BESTEBROER, Theo, BEYER, Walter E., VAN LAVIEREN, Rob, OSTERHAUS, Albert D.M.E., FOUCHIER, Ron A.M. et KUIKEN, Thijs, 2008. Wild Ducks as Long-Distance Vectors of Highly Pathogenic Avian Influenza Virus (H5N1). *Emerging Infectious Diseases*. avril 2008. Vol. 14, n° 4, pp. 600-607. DOI 10.3201/eid1404.071016.

KÖLZSCH, Andrea, NEEFJES, Marjolein, BARKWAY, Jude, MÜSKENS, Gerhard J. D. M., VAN LANGEVELDE, Frank, DE BOER, Willem F., PRINS, Herbert H. T., CRESSWELL, Brian H. et NOLET, Bart A., 2016. Neckband or backpack? Differences in tag design and their effects on GPS/accelerometer tracking results in large waterbirds. *Animal Biotelemetry*. décembre 2016. Vol. 4, n° 1, pp. 13. DOI 10.1186/s40317-016-0104-9.

KOPRIVNIKAR, Janet et LEUNG, Tommy L. F., 2015. Flying with diverse passengers: greater richness of parasitic nematodes in migratory birds. *Oikos*. avril 2015. Vol. 124, n° 4, pp. 399-405. DOI 10.1111/oik.01799.

KREMER, Annabelle, 2017. Les manchots: sentinelles de notre planète. . 13 février 2017. pp. 33.

LE GALL LADEVÈZE, Chloé, 2022. *Caractérisation des interfaces entre avifaune sauvage et élevages avicoles par l'étude des contacts et du partage d'agents infectieux entre compartiments* [en ligne]. Toulouse : Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse. [Consulté le 10 juillet 2022]. Disponible à l'adresse : <http://thesesups.ups-tlse.fr/5332/1/2022TOU30067.pdf>

LE GALL-LADEVÈZE, Chloé, GUINAT, Claire, FIEVET, Pierre, VOLLOT, Benjamin, GUÉRIN, Jean-Luc, CAPPELLE, Julien et LE LOC'H, Guillaume, 2022. Quantification and characterisation of commensal wild birds and their interactions

with domestic ducks on a free-range farm in southwest France. *Scientific Reports*. décembre 2022. Vol. 12, n° 1, pp. 9764. DOI 10.1038/s41598-022-13846-2.

LPO, 2022a. La migration des oiseaux. [en ligne]. 28 mars 2022.

[Consulté le 13 septembre 2022]. Disponible à l'adresse :

<https://www.lpo.fr/decouvrir-la-nature/loisirs-nature/grands-rendez-vous/journees-europeennes-de-la-migration/la-migration-des-oiseaux>

LPO, 2022b. Comptage national Oiseaux des jardins. [en ligne]. janvier 2022.

[Consulté le 3 septembre 2022]. Disponible à l'adresse : <https://www.lpo.fr/decouvrir-la-nature/loisirs-nature/agenda-nature/agenda-lpo-france/2022/comptage-national-oiseaux-des-jardins2>

LPO, 2022c. Projet Vol de Nuit - LPO (Ligue pour la Protection des Oiseaux).

[en ligne]. janvier 2022. [Consulté le 7 septembre 2022]. Disponible à l'adresse :

<https://www.lpo.fr/la-lpo-en-actions/connaissance-des-especes-sauvages/suivis-ornithologiques/oiseaux-migrateurs/projet-vol-de-nuit>

LPO, 2022d. J'ai trouvé un oiseau bague : que faire ? *LPO* [en ligne]. 2022.

[Consulté le 31 août 2022]. Disponible à l'adresse : <https://www.lpo.fr/decouvrir-la-nature/conseils-biodiversite/conseils-biodiversite/accueillir-la-faune-sauvage/j-ai-trouve-un-oiseau-bague-que-faire>

LPO MISSION RAPACES, 2010. *Cahier technique du milan royal* [en ligne].

décembre 2010. [Consulté le 4 novembre 2022]. Disponible à l'adresse :

https://occitanie.lpo.fr/wp-content/uploads/2020/04/cahier_technique_milan_royal.pdf

MCCOY, Karen et LPO, 2021. *La dispersion des pathogènes par les oiseaux en migration : source d'information et de risque* [en ligne]. [Colloque migration LPO 2020].

15 février 2021. [Consulté le 14 septembre 2022]. Disponible à l'adresse :

<https://www.youtube.com/watch?v=TcH4zPCWjVo>

MCDUIE, Fiona, MATCHETT, Elliott L, PROSSER, Diann J, TAKEKAWA, John Y,

PITESKY, Maurice E, LORENZ, Austen A, MCCUEN, Madeline M, T, Overton Cory,

ACKERMAN, Joshua T, DE LA CRUZ, Susan E. W. et CASAZZA, Michael L, 2022.

Pathways for avian influenza virus spread: GPS reveals wild waterfowl in commercial livestock facilities and connectivity with the natural wetland landscape.

Transboundary and Emerging Diseases [en ligne]. 2 janvier 2022. Vol. n/a, n° n/a. [Consulté le 13 septembre 2022]. DOI 10.1111/tbed.14445. Disponible à l'adresse : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/tbed.14445>

MEZIER, Justine et VOLLOT, Benjamin, 2018. *Utilisation du piège photo pour augmenter les contrôles d'oiseaux porteurs de marques colorées/gravées*. 2018.

MICHLER, Stephanie P M, LAESSER, Jacques, SPIESS, Martin et SPAAR, Reto, 2016. *Projet de conservation et monitoring intégré des populations de faucon crécerelle et d'effraie des clochers - Résultats de 14 ans de projet*. [en ligne]. 2016. [Consulté le 31 octobre 2022]. DOI 10.13140/RG.2.1.3838.2328. Disponible à l'adresse : <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.1.3838.2328>

MINE, Junki, UCHIDA, Yuko, SHARSHOV, Kirill, SOBOLEV, Ivan, SHESTOPALOV, Alexander et SAITO, Takehiko, 2019. *Phylogeographic evidence for the inter- and intracontinental dissemination of avian influenza viruses via migration flyways*. RUSSELL, Charles J. (éd.), *PLOS ONE*. 26 juin 2019. Vol. 14, n° 6, pp. e0218506. DOI 10.1371/journal.pone.0218506.

MINERVA CENTER FOR MOVEMENT ECOLOGY, 2019. *The ATLAS project*. *Minerva Center for Movement Ecology* [en ligne]. février 2019. [Consulté le 10 novembre 2022]. Disponible à l'adresse : <http://move-ecol-minerva.huji.ac.il/page/3>

MISSION MIGRATION, 2022. *Les programmes de baguage* - www.migraction.net. [en ligne]. 2022. [Consulté le 2 septembre 2022]. Disponible à l'adresse : https://www.migraction.net/index.php?m_id=22008&item=8

MOLLET, Pierre, ESTOPPEY, François, KORNER, Pius et LANZ, Michael, 2021. *Analyse des émissions vocales de la Bécasse des bois Scolopax rusticola et estimation du nombre de mâles en croule : un test pratique*. *Nos Oiseaux*. juin 2021. N° 544, pp. 17.

MORGANTI, Michelangelo, RUBOLINI, Diego, ÅKESSON, Susanne, BERMEJO, Ana, DE LA PUENTE, Javier, LARDELLI, Roberto, LIECHTI, Felix, BOANO, Giovanni, TOMASSETTO, Erika, FERRI, Mauro, CAFFI, Mario, SAINO, Nicola et AMBROSINI, Roberto, 2018. *Effect of light-level geolocators on apparent survival of*

two highly aerial swift species. *Journal of Avian Biology*. janvier 2018. Vol. 49, n° 1, pp. jav-01521. DOI 10.1111/jav.01521.

MUNRO, Margaret, 2017. What's killing the world's shorebirds? *Nature*. 1 janvier 2017. Vol. 541, n° 7635, pp. 16-20. DOI 10.1038/541016a.

MUNRO, Margaret, MONASTERSKY, Richard et KRZYSZTOFIK, Design Jasiek, 2017. Tracking trouble in the Arctic. *Nature*. 5 janvier 2017. Vol. 541, pp. 1.

MUNSTER, Vincent J., BAAS, Chantal, LEXMOND, Pascal, WALDENSTRÖM, Jonas, WALLENSTEN, Anders, FRANSSON, Thord, RIMMELZWAAN, Guus F., BEYER, Walter E. P., SCHUTTEN, Martin, OLSEN, Björn, OSTERHAUS, Albert D. M. E. et FOUCHIER, Ron A. M., 2007. Spatial, Temporal, and Species Variation in Prevalence of Influenza A Viruses in Wild Migratory Birds. *PLOS Pathogens*. 11 mai 2007. Vol. 3, n° 5, pp. e61. DOI 10.1371/journal.ppat.0030061.

MUNSTER, V.J. et FOUCHIER, R.A.M., 2009. Avian influenza virus: Of virus and bird ecology. *Vaccine*. octobre 2009. Vol. 27, n° 45, pp. 6340-6344. DOI 10.1016/j.vaccine.2009.02.082.

NESTEROVA, Anna, LE BOHEC, Celine, BEAUNE, David, PETTEX, Emeline, LE MAHO, Yvon et BONADONNA, Francesco, 2010. Do penguins dare to walk at night? Visual cues influence king penguin colony arrivals and departures. *Behavioral Ecology and Sociobiology*. 1 juillet 2010. Vol. 64, pp. 1145-1156. DOI 10.1007/s00265-010-0930-3.

NUSSBAUMER, Raphaël, BAUER, Silke, BENOIT, Lionel, MARIETHOZ, Grégoire, LIECHTI, Felix et SCHMID, Baptiste, 2021. Quantifying year-round nocturnal bird migration with a fluid dynamics model. *Journal of The Royal Society Interface*. juin 2021. Vol. 18, n° 179, pp. 20210194. DOI 10.1098/rsif.2021.0194.

NUSSBAUMER, Raphaël, BENOIT, Lionel, MARIETHOZ, Gregoire, LIECHTI, Felix, BAUER, Silke et SCHMID, Baptiste, 2019. A Geostatistical Approach to Estimate High Resolution Nocturnal Bird Migration Densities from a Weather Radar Network. *Remote Sensing*. 25 septembre 2019. Vol. 2019, pp. 19. DOI 10.3390/rs11192233.

O'BRIEN, Timothy et KINNAIRD, Margaret, 2008. A picture is worth a thousand words: The application of camera trapping to the study of birds. *Bird Conservation International*. 1 septembre 2008. Vol. 18. DOI 10.1017/S0959270908000348.

OISEAUX DES JARDINS, 2022. Toutes les fiches espèces - www.oiseauxdesjardins.fr. [en ligne]. 2022. [Consulté le 4 novembre 2022]. Disponible à l'adresse : https://www.oiseauxdesjardins.fr/index.php?m_id=20112

OLSEN, Björn, MUNSTER, Vincent J., WALLENSTEN, Anders, WALDENSTRÖM, Jonas, OSTERHAUS, Albert D. M. E. et FOUCHIER, Ron A. M., 2006. Global Patterns of Influenza A Virus in Wild Birds. *Science*. 21 avril 2006. Vol. 312, n° 5772, pp. 384-388. DOI 10.1126/science.1122438.

ONCFS, 2018. *Le baguage : un outil pour suivre les populations d'oiseaux*. Transfaire. Fiches éclairages. ISBN 978-2-85692-089-3.

ONIRIS et CVFSE, 2014. *La poxvirose de la Mésange Charbonnière (Parus Major)* [en ligne]. 10 novembre 2014. [Consulté le 3 septembre 2022]. Disponible à l'adresse : https://crbpo.mnhn.fr/IMG/pdf/protocole_2014_poxvirose_parus_major_cvfse_oniris_crbpo.pdf

PEYCRU, Pierre, GRANDPERRIN, Didier, PERRIER, Christiane, AUGÈRE, Bernard, BEAUX, Jean-François, CARIOU, François, CARRÈRE, Pascal, DARRIBÈRE, Thierry, DUPIN, Jean-Michel, ESCUYER, Caroline, FOGELGESANG, Jean-François, MAURY, Stéphane, QUIÉNNÉC, Eric, SALGUEIRO, Elena et VAN DER REST, Cécile, 2014. Chapitre 10 - Les populations et leur dynamique. In : *Biologie tout-en-un BCPST 2e année*. DUNOD. J'intègre. ISBN 978-2-10-071145-1.

POULET, Nicolas et OFB, 2017. L'ADN environnemental : une technique innovante pour l'étude de la biodiversité. *Le portail technique de l'OFB* [en ligne]. 2017. [Consulté le 22 septembre 2022]. Disponible à l'adresse : <https://professionnels.ofb.fr/fr/node/372>

ROSENBERG, Kenneth V., DOKTER, Adriaan M., BLANCHER, Peter J., SAUER, John R., SMITH, Adam C., SMITH, Paul A., STANTON, Jessica C., PANJABI, Arvind, HELFT, Laura, PARR, Michael et MARRA, Peter P., 2019. Decline of the

North American avifauna. *Science*. 4 octobre 2019. Vol. 366, n° 6461, pp. 120-124. DOI 10.1126/science.aaw1313.

ROVERO, Francesco, TOBLER, Mathias et SANDERSON, James, 2010. Camera trapping for inventorying terrestrial vertebrates. *Manual on field recording techniques and protocols for All Taxa Biodiversity Inventories and Monitoring*. 1 janvier 2010.

SALLÉ, Louis, PONTALIER, Hugo et COIFFARD, Paul, 2020. *Suivi acoustique de la migration nocturne : perspectives* [en ligne]. [Youtube]. 2020.

[Consulté le 7 septembre 2022]. Disponible à l'adresse :

<https://www.youtube.com/watch?v=imiZBMWFMQw>

SARAUX, Claire, LE BOHEC, Céline, DURANT, Joël M., VIBLANC, Vincent A., GAUTHIER-CLERC, Michel, BEAUNE, David, PARK, Young-Hyang, YOCCOZ, Nigel G., STENSETH, Nils C. et LE MAHO, Yvon, 2011. Reliability of flipper-banded penguins as indicators of climate change. *Nature*. 13 janvier 2011. Vol. 469, n° 7329, pp. 203-206. DOI 10.1038/nature09630.

SCOTT, Angela, PHALEN, David, HERNÁNDEZ-JOVER, Marta, SINGH, Mini, GROVES, Peter et TORIBIO, Jenny-Ann, 2018. Wildlife Presence and Interactions with Chickens on Australian Commercial Chicken Farms Assessed by Camera Traps. *Avian Diseases* [en ligne]. 4 janvier 2018. Vol. 62. [Consulté le 7 novembre 2022]. DOI 10.1637/11761-101917-Reg.1. Disponible à l'adresse :

Disponible à l'adresse :

https://www.researchgate.net/publication/323747418_Wildlife_Presence_and_Interactions_with_Chickens_on_Australian_Commercial_Chicken_Farms_Assessed_by_Camera_Traps

SERGIO, Fabrizio, TAVECCHIA, Giacomo, TANFERNA, Alessandro, LÓPEZ JIMÉNEZ, Lidia, BLAS, Julio, DE STEPHANIS, Renaud, MARCHANT, Tracy A., KUMAR, Nishant et HIRALDO, Fernando, 2015. No effect of satellite tagging on survival, recruitment, longevity, productivity and social dominance of a raptor, and the provisioning and condition of its offspring. *Journal of Applied Ecology*. 2015. Vol. 52, n° 6, pp. 1665-1675. DOI 10.1111/1365-2664.12520.

SNOW, D.W et PERRINS, C.M, 1998. *The birds of the western palaeartic*. Concise Edition. Oxford University Press, Oxford, United Kingdom. ISBN 978-0-19-854099-1.

STOFFOLANO, J.G. et GEDEN, C.J., 1987. Succession of Manure Arthropods at a Poultry Farm in Massachusetts, USA, With Observations on *Carcinops Pumilio* (Coleoptera: Histeridae) Sex Ratios, Ovarian Condition, And Body Size¹. *Journal of Medical Entomology*. 1 mars 1987. Vol. 24, n° 2, pp. 212-220.

DOI 10.1093/jmedent/24.2.212.

STOKSTAD, Erik, 2004. Songbirds Check Compass Against Sunset to Stay on Course. *Science*. 16 avril 2004. Vol. 304, n° 5669, pp. 373-373.

DOI 10.1126/science.304.5669.373a.

SWISS BIRD RADAR, 2021. Systems | Swiss Birdradar Solution AG. [en ligne]. 14 décembre 2021. [Consulté le 8 novembre 2022]. Disponible à l'adresse :

<https://swiss-birdradar.com/systems/>

SYSTÈME DE SURVEILLANCE FAUNISTIQUE MOTUS et ETUDES D'OISEAUX CANADA, 2014. Motus Wildlife Tracking System. [en ligne]. 2014.

[Consulté le 29 septembre 2022]. Disponible à l'adresse : <https://motus.org/?lang=fr>

TAKEKAWA, John Y, NEWMAN, Scott H, XIAO, Xiangming, PROSSER, Diann J, SPRAGENS, Kyle A, PALM, Eric C, YAN, Baoping, LI, Tianxian, LEI, Fumin, ZHAO, Delong, DOUGLAS, David C, MUZAFFAR, Sabir Bin et JI, Weitao, 2010. Migration of Waterfowl in the East Asian Flyway and Spatial Relationship to HPAI H5N1 Outbreaks. *Avian Diseases*. mars 2010. pp. 26. DOI 10.1637/8914-043009-Reg.1.

TUCOULET, Julie, 2015. *Suivi spatio-temporel de la poxvirose de la Mésange Charbonnière (Parus Major) en France Métropolitaine au cours des hivers 2012-2013 et 2014-2015*. rapport de stage M2 surveillance épidémiologique des maladies humaines et animales.

TVA NOUVELLES, 2015. Pluie d'oies mortes sur l'Idaho. *TVA Nouvelles* [en ligne]. 18 mars 2015. [Consulté le 18 septembre 2022]. Disponible à l'adresse :

<https://www.tvanouvelles.ca/2015/03/18/pluie-doies-mortes-sur-lidaho>

USGS, 2010. List of Species Affected by H5N1 (Avian Influenza) | U.S. Geological Survey. [en ligne]. 1 janvier 2010. [Consulté le 2 octobre 2022]. Disponible à l'adresse : <https://www.usgs.gov/media/files/list-species-affected-h5n1-avian-influenza>

VAN GILS, Jan A., MUNSTER, Vincent J., RADERSMA, Reinder, LIEFHEBBER, Daan, FOUCHIER, Ron A. M. et KLAASSEN, Marcel, 2007. Hampered Foraging and Migratory Performance in Swans Infected with Low-Pathogenic Avian Influenza A Virus. *PLOS ONE*. 31 janvier 2007. Vol. 2, n° 1, pp. e184.

DOI 10.1371/journal.pone.0000184.

VAS, Elisabeth, LESCROËL, Amélie, DURIEZ, Olivier, BOGUSZEWSKI, Guillaume et GRÉMILLET, David, 2015. Approaching birds with drones: first experiments and ethical guidelines. *Biology Letters*. février 2015. Vol. 11, n° 2, pp. 20140754.

DOI 10.1098/rsbl.2014.0754.

VOGELWARTE, 2022. Radar ornithologique – BirdScan MR1 | Station ornithologique suisse. *vogelwarte.ch* [en ligne]. 2022. [Consulté le 8 novembre 2022]. Disponible à l'adresse : <https://www.vogelwarte.ch/fr/projets/migration-des-oiseaux/radar-ornithologique-birdscan-mr1>

WEISER, Emily L., LANCTOT, Richard B., BROWN, Stephen C., ALVES, José A., BATTLE, Phil F., BENTZEN, Rebecca, BÉTY, Joël, BISHOP, Mary Anne, BOLDENOW, Megan, BOLLACHE, Loïc, CASLER, Bruce, CHRISTIE, Maureen, COLEMAN, Jonathan T., CONKLIN, Jesse R., ENGLISH, Willow B., GATES, H. River, GILG, Olivier, GIROUX, Marie-Andrée, GOSBELL, Ken, HASSELL, Chris, HELMERICKS, Jim, JOHNSON, Andrew, KATRÍNARDÓTTIR, Borgný, KOIVULA, Kari, KWON, Eunbi, LAMARRE, Jean-Francois, LANG, Johannes, LANK, David B., LECOMTE, Nicolas, LIEBEZEIT, Joe, LOVERTI, Vanessa, MCKINNON, Laura, MINTON, Clive, MIZRAHI, David, NOL, Erica, PAKANEN, Veli-Matti, PERZ, Johanna, PORTER, Ron, RAUSCH, Jennie, RENEERKENS, Jeroen, RÖNKÄ, Nelli, SAALFELD, Sarah, SENNER, Nathan, SITTLER, Benoît, SMITH, Paul A., SOWL, Kristine, TAYLOR, Audrey, WARD, David H., YEZERINAC, Stephen et SANDERCOCK, Brett K., 2016. Effects of geolocators on hatching success, return rates, breeding movements, and change in body mass in 16 species of Arctic-breeding shorebirds. *Movement Ecology*. 29 avril 2016. Vol. 4, n° 1, pp. 12.

DOI 10.1186/s40462-016-0077-6.

WETLANDS INTERNATIONAL, 2006. *Waterbird population estimates -Fourth Edition*. 2006. Wetlands International.

WIKELSKI, Martin, TARLOW, Elisa M., RAIM, Arlo, DIEHL, Robert H., LARKIN, Ronald P. et VISSER, G. Henk, 2003. Costs of migration in free-flying songbirds. *Nature*. juin 2003. Vol. 423, n° 6941, pp. 704-704. DOI 10.1038/423704a.

ZIMMERMANN, Lou et SANTIAGO, Serge, 2019. Contribution au suivi démographique de la Bécasse des bois *Scolopax rusticola* dans le canton de Neuchâtel (Suisse). *AVES*. 2019. pp. 27.

Toulouse, 2022

NOM : GLESSER

PRENOM : MARGAUX

TITRE : Intérêts et méthodes de suivi des populations d'oiseaux sauvages, application en épidémiologie et exemple du suivi de *Motacilla Alba* autour d'un élevage de canards gras pour étudier le risque d'influenza aviaire

Résumé :

Les oiseaux sont des animaux fugaces et leur observation peut se révéler difficile. C'est pourquoi de nombreuses méthodes de suivi ont été élaborées afin de pouvoir les étudier au mieux. Les intérêts du suivi des oiseaux sont nombreux, tels que l'étude de leurs déplacements, de la dynamique des populations, ou encore la surveillance ou l'étude d'évènements sanitaires. Cette thèse passe en revue les différents systèmes de marquage, leurs mises en œuvre, leurs qualités et leurs inconvénients ainsi que des exemples relatant leurs apports lors de suivis épidémiologiques. Dans une seconde partie, un suivi télémétrique, effectué dans le cadre de la thèse d'université du Dr Le Gall-Ladevèze, a été réalisé sur le terrain sur des bergeronnettes grises autour d'un élevage de canards gras du Gers, afin de connaître leur possible rôle épidémiologique vis-à-vis d'agents pathogènes aviaires. Les premiers résultats ont permis de montrer que *Motacilla Alba* peut se déplacer entre un élevage et d'autres zones d'intérêt épidémiologiques (zones humides et autres élevages).

Mots-clés : Oiseaux – Suivi – Déplacements – Télémétrie – Bergeronnette grise (*Motacilla Alba*) - Gers

Abstract :

Birds are fleeting animals and can be difficult to observe. For this reason, several monitoring methods have been developed in order to better study birds. There are many interests in bird monitoring, such as the study of their movements, their population dynamics, or health events and epidemiological surveillance. This thesis reviews the different marking systems, their implementation, their qualities and drawbacks, as well as examples of their contributions during epidemiological follow-up. In the second part, telemetric monitoring, carried out as part of Dr. Le Gall-Ladevèze university thesis, was conducted in the field, on white wagtails living around a farm of fatty ducks in the Gers (France). The objective was to determine their possible epidemiological role in relation to avian pathogens. Initial results have shown that *Motacilla Alba* can move between a farm and other areas of epidemiological interest (wetlands and other farms).

Keywords : Birds - Monitoring - Movements - Telemetry - White Wagtail (*Motacilla Alba*) - Gers