



HAL
open science

Les hémosporidae des rapaces et corvidés en centres de soins : enquête épidémiologique 2018-2019 au centre d'accueil de faune sauvage de l'École vétérinaire d'Alfort (CHUV-FS)

Sarah Hilka

► To cite this version:

Sarah Hilka. Les hémosporidae des rapaces et corvidés en centres de soins : enquête épidémiologique 2018-2019 au centre d'accueil de faune sauvage de l'École vétérinaire d'Alfort (CHUV-FS). Médecine vétérinaire et santé animale. 2022. dumas-03830592

HAL Id: dumas-03830592

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03830592v1>

Submitted on 26 Oct 2022

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.

Année 2022

**LES HÉMOSPORIDIES DES RAPACES ET CORVIDÉS EN
CENTRES DE SOINS : ENQUÊTE ÉPIDÉMIOLOGIQUE 2018-
2019 AU CENTRE D'ACCUEIL DE FAUNE SAUVAGE DE
L'ÉCOLE VÉTÉRINAIRE D'ALFORT (CHUV-FS)**

THÈSE

pour obtenir le diplôme d'État de

DOCTEUR VÉTÉRINAIRE

présentée et soutenue publiquement devant

la Faculté de Médecine de Créteil (UPEC)

le 16 février 2022

par

Sarah HILKA

sous la direction de

Véronica RISCO-CASTILLO

JURY

Président du jury :	M. Grégory JOUVION	Professeur à l'EnvA
Directrice de thèse :	Mme Veronica RISCO-CASTILLO	Maître de Conférences à l'EnvA
Examineur :	M. Pascal ARNÉ	Maître de Conférences à l'EnvA

Liste des personnes intervenant dans l'enseignement



Directeur : Pr Christophe Degueurce
 Directeur des formations : Pr Henry Chateau
 Directrice de la scolarité et de la vie étudiante : Dr Catherine Colmin

Professeurs émérites : Pr Pascal Fayolle, Pr Bernard Paragon
 Directeurs honoraires : MM. les Professeurs C. Pilet, B. Toma, A.-L. Parodi, R. Moraillon, J.-P. Cotard, J.-P. Mialot & M. Gogny

Département d'Élevage et de Pathologie des Équidés et des Carnivores (DEPEC)

Chef du département : Pr Grandjean Dominique - Adjoint : Pr Blot Stéphane

<p>Discipline : anesthésie, réanimation, urgences, soins intensifs - Pr Verwaerde Patrick</p> <p>Discipline : cardiologie - Pr Chetboul Valérie - Dr Saponaro Vittorio, Praticien hospitalier contractuel</p> <p>Discipline : nouveaux animaux de compagnie - Dr Pignon Charly, Ingénieur de recherche - Praticien hospitalier - Dr Volait Laetitia, Praticienne hospitalier contractuelle</p> <p>Discipline : dermatologie - Dr Cochet-Faivre Noëlle, Praticienne hospitalier contractuelle</p> <p>Discipline : ophtalmologie - Dr Chahory Sabine, Maître de conférences</p> <p>Unité pédagogique de clinique équine - Pr Audigié Fabrice - Dr Bertoni Lélia, Maître de conférences - Dr Coudry Virginie, Praticienne hospitalier contractuelle - Pr Denoix Jean-Marie - Dr Giraudet Aude, Ingénieure de recherche - Praticienne hospitalier - Dr Jacquet Sandrine, Ingénieure de recherche - Praticienne hospitalier - Dr Mespouhès-Rivière Céline, Ingénieure de recherche-Praticienne hospitalier* - Dr Moiroud Claire, Praticienne hospitalier contractuelle - Dr Tallaj Amélie, Praticienne hospitalier contractuelle - Dr Tanquerel Ludovic, Chargé d'enseignement contractuel</p>	<p>Unité pédagogique de médecine et imagerie médicale - Dr Benchekroun Ghita, Maître de conférences - Pr Blot Stéphane* - Dr Canonne-Guibert Morgane, Maître de conférences - Dr Freiche-Legros Valérie, Praticienne hospitalier contractuelle - Dr Maurey-Guénec Christelle, Maître de conférences - Dr Mortier Jérémie, Maître de conférences associé</p> <p>Unité pédagogique de médecine de l'élevage et du sport - Dr Cabrera Gonzales Joaquin, Chargé d'enseignement contractuel - Pr Fontbonne Alain - Pr Grandjean Dominique* - Dr Maenhoudt Cindy, Praticienne hospitalier contractuelle - Dr Nudelman Nicolas, Maître de conférences - Dr Ribeiro dos Santos Natalia, Praticienne hospitalier contractuelle</p> <p>Unité pédagogique de pathologie chirurgicale - Dr Decambon Adeline, Maître de conférences - Pr Manassero Mathieu - Dr Maurice Emeline, Assistante d'Enseignement et de Recherche Contractuelle - Pr Viateau-Duval Véronique*</p>
---	--

Département des Productions Animales et de Santé Publique (DPASP)

Chef du département : Pr Millemann Yves - Adjoint : Pr Dufour Barbara

<p>Unité pédagogique d'hygiène, qualité et sécurité des aliments - Dr Bolnot François, Maître de conférences* - Pr Carlier Vincent - Dr Gauthier Michel, Maître de conférences associé - Dr Mtimet Narjes, Chargée d'enseignement contractuelle</p> <p>Unité pédagogique de maladies réglementées, zoonoses et épidémiologie - Dr Crozet Guillaume, Chargé d'enseignement contractuel - Pr Dufour Barbara* - Dr Guélin Poirier Valentine, Chargée d'enseignement contractuelle - Pr Haddad/Hoang-Xuan Nadia - Dr Rivière Julie, Maître de conférences</p> <p>Unité pédagogique de pathologie des animaux de production - Pr Adjou Karim - Dr Belbis Guillaume, Maître de conférences* - Dr Delsart Maxime, Maître de conférences associé - Pr Millemann Yves - Dr Plassard Vincent, Praticien hospitalier contractuel - Dr Ravary-Plumioën Bérangère, Maître de conférences</p>	<p>Unité pédagogique de reproduction animale - Dr Constant Fabienne, Maître de conférences* - Dr Denis Marine, Chargée d'enseignement contractuelle - Dr Desbois Christophe, Maître de conférences (rattaché au DEPEC) - Dr Mauffré Vincent, Maître de conférences</p> <p>Unité pédagogique de zootechnie, économie rurale - Dr Arné Pascal, Maître de conférences - Dr Barassin Isabelle, Maître de conférences - Dr De Paula Reis Aline, Maître de conférences* - Pr Grimard-Ballif Bénédicte - Pr Ponter Andrew</p> <p>Rattachée DPASP - Dr Wolgust Valérie, Praticienne hospitalier contractuelle</p>
--	--

Département des Sciences Biologiques et Pharmaceutiques (DSBP)

Chef du département : Pr Desquilbet Loïc - Adjoint : Pr Pilot-Storck Fanny

<p>Unité pédagogique d'anatomie des animaux domestiques - Pr Chateau Henry - Pr Crevier-Denoix Nathalie - Pr Robert Céline*</p> <p>Unité pédagogique de bactériologie, immunologie, virologie - Pr Boulouis Henri-Jean - Pr Eloit Marc - Dr Lagrée Anne-Claire, Maître de conférences - Pr Le Poder Sophie - Dr Le Roux Delphine, Maître de conférences*</p> <p>Unité pédagogique de biochimie, biologie clinique - Pr Bellier Sylvain* - Dr Deshuillers Pierre, Maître de conférences</p> <p>Unité pédagogique d'histologie, anatomie pathologique - Dr Cordonnier-Lefort Nathalie, Maître de conférences - Pr Fontaine Jean-Jacques - Dr Jouvion Grégory, Professeur associé - Dr Reyes-Gomez Edouard, Maître de conférences*</p> <p>Unité pédagogique de management, communication, outils scientifiques - Mme Conan Muriel, Professeur certifié (Anglais) - Pr Desquilbet Loïc, (Biostatistique, Epidémiologie) - Dr Legrand Chantal, Maître de conférences associée - Dr Marignac Geneviève, Maître de conférences* - Dr Rose Hélène, Maître de conférences associée</p>	<p>Unité de parasitologie, mycologie - Dr Blaga Radu, Maître de conférences (rattaché au DPASP) - Pr Guillot Jacques - Dr Polack Bruno, Maître de conférences* - Dr Risco-Castillo Veronica, Maître de conférences</p> <p>Unité pédagogique de pharmacie et toxicologie - Dr Kohlhauer Matthias, Maître de conférences - Dr Perrot Sébastien, Maître de conférences* - Pr Tissier Renaud</p> <p>Unité pédagogique de physiologie, éthologie, génétique - Dr Chevallier Lucie, Maître de conférences (Génétique) - Dr Crépeaux Guillemette, Maître de conférences (Physiologie, Pharmacologie) - Pr Gilbert Caroline (Ethologie) - Pr Pilot-Storck Fanny (Physiologie, Pharmacologie) - Pr Tired Laurent (Physiologie, Pharmacologie)* - Dr Titeux Emmanuelle (Ethologie), Praticienne hospitalier contractuelle</p> <p>Rattachée DSBP - Mme Dalaine Stéphanie, Professeur agrégée (Sciences de la Vie et de la Terre)</p>
--	---

* responsable d'unité pédagogique

Remerciements

Au Président du Jury de cette thèse, Docteur Grégory Jouvion, Professeur à l'EnvA,

Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence de ce jury de thèse si promptement et avec autant d'enthousiasme,

Sincères remerciements

Au Docteur Veronica Risco-Castillo, Maitre de conférences à l'EnvA,

Pour m'avoir donné l'opportunité de réaliser mon travail de thèse sur un sujet si passionnant, Pour vos nombreux conseils, votre encadrement, votre réactivité et votre patience malgré le retard qu'a pris ce travail,

Sincères remerciements

Au Docteur Pascal Arné, Maitre de conférences à l'EnvA,

Pour votre extrême réactivité et votre aide précieuse, Pour avoir très gentiment accepté d'être mon assesseur,

Sincères remerciements

Au personnel du Biopôle et du Chuv-FS,

Pour toute votre aide dans la réalisation de la partie expérimentale de cette thèse,

Sincères remerciements

À ma famille,

Pour votre présence depuis le début, votre soutien au quotidien et votre patience durant cette longue quête. J'espère vous rendre fiers.

À mes amis,

Parce que sans vous l'existence serait beaucoup plus fade. Je suis heureuse d'avoir un jour croisé votre chemin. *Et c'est assez curieux de se dire que les hasards, les rencontres, forment une destinée...*

Table des matières

Liste des abréviations.....	9
Introduction	11
Première partie : Hémosporidies des rapaces et corvidés : état des lieux bibliographique..	13
1. Hémosporidies : généralités et biologie	13
A. <i>Histoire et taxinomie</i>	13
a. Découverte et description des hémosporidies	13
b. Classification taxinomique des hémosporidies.....	14
B. <i>Biologie</i>	18
a. Cycle des hémosporidies	18
b. Particularités du genre <i>Haemoproteus</i>	20
c. Particularités du genre <i>Leucocytozoon</i>	22
d. Particularités du genre <i>Plasmodium</i>	24
e. Vecteurs.....	26
f. Hôtes vertébrés volatiles.....	31
g. Distribution géographique	35
2. Rapaces et corvidés.....	37
b. Classification et zoologie des corvidés.....	45
c. Population de rapaces et corvidés en île-de-France.....	48
3. Importance des hémosporidioses chez les rapaces et corvidés	52
A. <i>Epidémiologie des hémosporidioses aviaires</i>	52
a. Epidémiologie d' <i>Haemoproteus</i>	52
b. Epidémiologie de <i>Leucocytozoon</i>	53
c. Epidémiologie de <i>Plasmodium</i>	53
B. <i>Pouvoir pathogène et signes cliniques</i>	54
a. Pouvoir pathogène.....	54
b. Signes cliniques	56
B. <i>Conséquences des hémosporidioses</i>	59
a. <i>Haemoproteus</i>	59
b. <i>Leucocytozoon</i>	60
c. <i>Plasmodium</i>	60
C. <i>Diagnostic et contrôle</i>	61
a. Diagnostic	61
b. Traitement.....	62
c. Prévention.....	64
D. <i>Coévolution hôte-parasite</i>	65
a. Adaptations comportementales.....	65
b. Autres modalités de coévolution	67
Deuxième partie : Hémosporidies chez les rapaces et corvidés recueillis au Chuv-FS entre mai 2018 et mai 2019, étude expérimentale.....	69
1. Introduction	69
A. <i>Le Chuv- Faune sauvage : un centre de soins francilien</i>	69
a. Historique.....	69
b. Fonctionnement du centre	70
B. <i>Accueil des rapaces et corvidés au Chuv-Faune Sauvage</i>	70
a. Examen clinique.....	70
b. Installations : hospitalisations et réhabilitations.....	71
2. Matériels et méthodes	71
A. <i>Hôtes étudiés</i>	71
B. <i>Prélèvements sanguins</i>	72
C. <i>Analyse des prélèvements</i>	72
D. <i>Gestion des données</i>	76
E. <i>Analyse des données</i>	76

a. Analyse statistique descriptive	76
b. Analyse statistique inférentielle	77
3. Résultats	77
A. Description de l'échantillon global	77
B. Résultats épidémiologiques chez les rapaces	80
a. Analyse épidémiologique des infestations aux hémospories	82
b. Infestation à Haemoproteus spp	83
c. Infestation à Leucocytozoon spp	84
d. Infestation à Plasmodium spp	85
C. Résultats épidémiologiques chez les corvidés	86
a. Infestation à Haemoproteus spp	91
b. Infestation à Leucocytozoon spp	94
c. Infestation à Plasmodium spp	98
d. Coinfestations	102
4. Discussion	103
A. Autour des matériels et méthodes	103
a. Population examinée	103
b. Méthodes	104
B. Interprétation des résultats	105
a. Espèces concernées	105
b. Origine géographique	105
c. Saison d'arrivée	106
d. Hémospories chez les rapaces	106
e. Hémospories chez les corvidés	107
f. Co-infestations	108
C. Perspectives	108
Conclusion	111
Liste des références bibliographiques	113
Annexe 1 : Lexique	121
Annexe 2 : Protocole de prélèvement et frottis sanguin	124
Annexe 3 : Tableaux de contingence	126

Liste des figures

Figure 1 : Taxinomie simplifiée des Apicomplexa (adapté d'après Valkiūnas, 2005 ; Schoch <i>et al.</i> , 2020).....	15
Figure 2 : Morphologie des Apicomplexa (d'après Hollin, 2017)	15
Figure 3 : Cycle des <i>Haemoproteus</i> aviaires (adapté d'après Valkiūnas, 2005).....	22
Figure 4 : Cycle des <i>Leucocytozoon</i> aviaires (adapté d'après Valkiūnas, 2005).....	24
Figure 5 : Cycle des <i>Plasmodium</i> aviaires (adapté d'après Valkiūnas, 2005)	26
Figure 6 : Morphologie d'une <i>Lynchia maura</i> adulte (adapté de Valkiūnas, 2005)	28
Figure 7 : Morphologie d'un <i>Culicoides nubeculosus</i> adulte (adapté de Valkiūnas, 2005)	29
Figure 8 : Morphologie d'un <i>Culex pipiens</i> adulte (adapté de Valkiūnas, 2005)	30
Figure 9 : Morphologie d'un Simuliidé adulte (Valkiūnas, 2005).....	31
Figure 10 : Faucon crécerelle (© Marlis Börger)	38
Figure 11 : Faucon hobereau (© Theo Locher).....	38
Figure 12 : Faucon pèlerin (© Patrick Sabonnadière).....	39
Figure 13 : Autour des palombes (© Theo Locher).....	40
Figure 14 : Bondrée apivore (© Theo Locher)	41
Figure 15 : Buse variable (© Günther Klemens)	41
Figure 16 : Épervier d'Europe (© Theo Locher).....	42
Figure 17 : Chouette hulotte (© Jürgen)	43
Figure 18 : Effraie des clochers (© Peter Hammond)	43
Figure 19 : Chevêche d'Athéna (© Jürgen).....	44
Figure 20 : Hibou moyen-duc (© Marlis Börger)	45
Figure 21 : Choucas des tours (© Andreev Dmitrij).....	46
Figure 22 : Corneille noire (© Günther Klemens).....	46
Figure 23 : Corbeau freux (© Andreev Dmitrij).....	47
Figure 24 : Geai des chênes (© Günther Klemens)	47
Figure 25 : Pie bavarde (© Theo Locher)	48
Figure 26 : Protocole thérapeutique de la malaria aviaire (adapté d'après Remple, 2004).....	64

Figure 27 : Observation au microscope x100 d'un érythrocyte infesté par <i>Haemoproteus</i> (flèche noire) sur un frottis sanguin issu d'une Chouette hulotte (<i>Strix aluco</i>) et coloré au MGG (©Veronica RISCO-CASTILLO, Laboratoire de Parasitologie, Biopôle de l'EnvA).....	73
Figure 28 : Observation au microscope x100 d'un érythrocyte infesté par <i>Plasmodium</i> (flèche noire) sur un frottis sanguin issu d'une Pie bavarde (<i>Pica pica</i>) et coloré au MGG (©Veronica RISCO-CASTILLO, Laboratoire de Parasitologie, Biopôle de l'EnvA).....	74
Figure 29 : Observation au microscope x100 d'érythrocytes infestés par <i>Leucocytozoon</i> (flèches noires) sur un frottis sanguin issu d'une Chouette hulotte (<i>Strix aluco</i>) et coloré au MGG (©Veronica RISCO-CASTILLO, Laboratoire de Parasitologie, Biopôle de l'EnvA).....	75
Figure 30 : Nombre d'individus prélevés par espèce	78
Figure 31 : Répartition des résultats d'examen clinique au Chuv-FS des rapaces et corvidés prélevés par catégorie d'affection	78
Figure 32 : Répartition du devenir des rapaces et corvidés prélevés en fonction de leur cause d'entrée	79
Figure 33 : Nombre de rapaces et corvidés par type d'infestation (infestation simple par genre d'hémosporidie et co-infestation).....	79
Figure 34 : Répartition des rapaces accueillis au Chuv-FS en fonction de la saison et de la classe d'âge	80
Figure 35 : Origine géographique des rapaces prélevés et infestation.....	81
Figure 36 : Répartition des rapaces en fonction de leur devenir	81
Figure 37 : Répartition des infestations par genre chez les différentes espèces de rapaces	82
Figure 38 : Origine des rapaces infestés par <i>Haemoproteus</i> sp (bleu), <i>Leucocytozoon</i> sp (jaune) et <i>Plasmodium</i> sp (violet)	83
Figure 39 : Répartition géographique du degré d'infestation des rapaces infestés par <i>Haemoproteus</i>	83
Figure 40 : Répartition géographique du degré d'infestation des rapaces infestés par <i>Leucocytozoon</i>	84
Figure 41 : Infestation des rapaces par <i>Plasmodium</i> sp	85
Figure 42 : Répartition géographique du degré d'infestation des rapaces infestés par <i>Plasmodium</i>	86
Figure 43 : Répartition des corvidés en fonction de la saison et de la classe d'âge	87
Figure 44 : Origine géographique des corvidés et infestation	88
Figure 45 : Répartition des corvidés en fonction de leur devenir.....	88
Figure 46 : Répartition géographique des corvidés infestés à <i>Haemoproteus</i> (bleu), <i>Leucocytozoon</i> (jaune), <i>Plasmodium</i> (violet) et co-infestés (noir).....	90

Figure 47 : Infestation des corvidés par <i>Haemoproteus</i> sp	91
Figure 48 : Répartition géographique du degré d'infestation des corvidés par <i>Haemoproteus</i>	92
Figure 49 : Degré d'infestation par <i>Haemoproteus</i> sp par espèce de corvidés	92
Figure 50 : Degré d'infestation par <i>Haemoproteus</i> sp chez les corvidés en fonction de la classe d'âge	93
Figure 51 : Infestation des corvidés par <i>Leucocytozoon</i> sp	94
Figure 52 : Repartition des corvidés infestés par <i>Leucocytozoon</i> sp en fonction de la saison et de la classe d'âge	95
Figure 53 : Répartition géographique du degré d'infestation des corvidés par <i>Leucocytozoon</i>	95
Figure 54 : Répartition des degrés d'infestation par <i>Leucocytozoon</i> sp chez les corvidés en fonction de la saison.....	96
Figure 55 : Répartition du degré d'infestation par <i>Leucocytozoon</i> sp en fonction de l'espèce de corvidé	96
Figure 56 : Répartition du degré d'infestation par <i>Leucocytozoon</i> sp chez les corvidés en fonction de la classe d'âge.....	97
Figure 57 : Répartition de l'infestation par <i>Plasmodium</i> en fonction de l'espèce de corvidé.....	98
Figure 58 : Répartition de l'infestation par <i>Plasmodium</i> sp chez les corvidés en fonction de la saison et de la classe d'âge.....	99
Figure 59 : Répartition géographique du degré d'infestation des corvidés par <i>Plasmodium</i>	100
Figure 60 : Répartition du degré d'infestation par <i>Plasmodium</i> sp en fonction de la saison chez les corvidés.....	100
Figure 61 : Répartition du degré d'infestation par <i>Plasmodium</i> sp en fonction de l'espèce chez les corvidés.....	101
Figure 62 : Répartition des degrés d'infestation à <i>Plasmodium</i> sp chez les corvidés en fonction de la classe d'âge	101
Figure 63 : Répartition géographique des cas de co-infestations chez les corvidés.....	102
Figure 64 : Répartition des corvidés co-infestés par genre d'hémosporidie et par degré de parasitémie.....	103

Liste des tableaux

Tableau 1 : Bilan des espèces d' <i>Haemoproteus</i> retrouvées chez les rapaces et corvidés (synthèse d'après MalAvi 2022).....	32
Tableau 2 : Bilan des espèces de <i>Leucocytozoon</i> retrouvées chez les rapaces et corvidés (synthèse d'après MalAvi 2022).....	33
Tableau 3 : Bilan des espèces de <i>Plasmodium</i> retrouvées chez les rapaces et corvidés (synthèse d'après MalAvi, 2022).....	35
Tableau 4 : Populations de rapaces et corvidés franciliennes (LPO et Lessafire, 2016 ; LPO et Malher, 2017a ; LPO et Malher, 2017b ; LPO et Malher, 2018 ; « LPO Île-de-France », 2022).....	49
Tableau 5 : Nombre d'individus reçus au Chuv-FS par espèce de rapaces et corvidés depuis 2017 (communication personnelle Chuv-FS EnvA)	51
Tableau 6 : Individus prélevés par espèce.....	71
Tableau 7 : Critères pour la lecture des frottis	75
Tableau 8 : Devenir des rapaces en fonction du type d'infestation	82
Tableau 9 : Devenir des corvidés en fonction du type d'infestation.....	89

Liste des abréviations

- ADN** : *Acide désoxyribonucléique*
ASAT : *Aspartate-amino-transférase*
ATP : *Adénosine triphosphate*
BuChE : *Butyrylcholinestérase*
CEDAF : *Centre d'accueil de la faune sauvage*
Chuv-FS : *Centre hospitalier universitaire vétérinaire – Faune Sauvage*
Cytb : *Cytochrome b*
EDTA : *EthylèneDiamineTétraAcétique*
EnvA : *Ecole nationale vétérinaire d'Alfort*
Ht : *Hématocrite*
IMC : *Inner Membran Complex (Complexe Membranaire Interne)*
INPN : *Inventaire National du Patrimoine Naturel*
MGG : *May-Grünwald Giemsa*
MNHN : *Muséum National d'Histoire Naturelle*
MSP : *Merozoit Surface Protein, Protéine de Surface du Mérozoïte*
NCBI : *National Center for Biotechnology Information (Centre américain pour les informations biotechnologiques)*
PCR : *Polymérase chain reaction (Réaction en Chaîne de la Polymérase)*
RBP : *Reticulocyte Binding Protein, Protéine d'Attachement au Réticulocyte*
USA : *United States of America (États-Unis d'Amérique)*

Introduction

Les hémospories sont des protozoaires parasites sanguins des oiseaux, mammifères et reptiles appartenant à l'embranchement des *Apicomplexa*. De nombreuses espèces d'hémospories parasitent les oiseaux et appartiennent pour la quasi-totalité aux genres *Haemoproteus*, *Leucocytozoon* et *Plasmodium*.

Très étudiées au XX^e siècle chez les oiseaux jusqu'à ce que leur modèle pour la malaria humaine tombe en désuétude, l'étude des hémospories aviaires bénéficie d'un regain d'intérêt de la part de la communauté scientifique. De nombreuses études indiquent leurs conséquences parfois dramatiques sur les populations d'oiseaux natives au parasite, qu'elles soient sauvages ou captives, l'exemple le plus connu étant l'introduction accidentelle de *Plasmodium relictum* sur les îles hawaïennes résultant en l'extinction de presque toutes leurs espèces d'oiseaux natives.

Les hémospories font notamment parties des infestations subcliniques les plus prévalentes chez les oiseaux de proie. Les rapaces et corvidés ont, par leur présence au sommet de la chaîne alimentaire, un rôle de régulation de populations. Leur préservation est donc importante. Bien que des études récentes portent sur l'hémoparasitisme chez ces espèces à l'étranger (Iran, Thaïlande), sur la situation des strigiformes en parc zoologique et dans un centre de soins dans le sud de la France, il n'existe pas de données équivalentes dans le nord de la France (Shokrani *et al.*, 2021 ; Pornpanom *et al.*, 2021 ; Giorgiadis, 2017 ; Jacquesson, 2019).

L'intérêt croissant de la société pour la protection de la faune sauvage pousse d'autant plus à l'étude des hémospories chez les oiseaux, notamment en centre de soins. Ces structures accueillent des animaux souvent blessés, faibles ou soumis au stress et donc plus susceptibles d'être infestés. Par leur caractère à la fois spécialisé et généraliste vis-à-vis de leurs hôtes vecteurs comme volatiles, les hémospories peuvent profiter des conditions de réhabilitation dans les centres de soins pour leur dissémination. De même, le risque de dissémination des hémospories à partir des oiseaux relâchés potentiellement porteurs, est une possibilité à prendre en compte lors de l'établissement des mesures sanitaires.

L'objectif de cette étude est de faire un état des lieux de la situation épidémiologique des rapaces et corvidés admis au Centre hospitalier universitaire vétérinaire de la Faune Sauvage (Chuv-FS) de l'école nationale vétérinaire d'Alfort vis-à-vis des hémospories. Le but est aussi d'identifier des liens potentiels entre variables épidémiologiques et infestation des animaux étudiés, pour ensuite proposer des mesures applicables en centre de soins dans le but de réduire les risques de transmissions d'hémospories en leur sein et donc diminuer les risques écologiques imputables à l'hémoparasitisme dans les régions de relâchés.

Pour atteindre ces objectifs, un travail bibliographique a d'abord été réalisé afin de présenter les différentes hémospories et leurs vecteurs, de mesurer leur impact chez les rapaces et corvidés, de faire un état des lieux de ces populations présentes en France métropolitaine et particulièrement en région francilienne, et de présenter les méthodes de diagnostic et des possibilités de prise en charge. Une étude épidémiologique a ensuite été réalisée chez les rapaces et corvidés reçus au Chuv-FS de l'EnvA entre mai 2018 et mai 2019. Ce dernier est le plus grand centre d'accueil de faune sauvage en France en terme de nombre d'animaux accueillis par an. Il reçoit une grande diversité d'espèces de rapaces et corvidés provenant d'île de France et des régions alentours.

Première partie : Hémosporidies des rapaces et corvidés : état des lieux bibliographique

1. Hémosporidies : généralités et biologie

A. Histoire et taxinomie :

a. Découverte et description des hémosporidies

Les hémosporidies sont un groupe de parasites particulièrement bien étudiés puisque certaines espèces du genre *Plasmodium* sont les agents du paludisme -la malaria humaine-, maladie majeure dans les pays chauds et toujours de grande importance de nos jours avec plus de 229 millions de cas en 2019 (World health organisation, 2021).

Les hémosporidies ont d'abord été découvertes chez l'espèce humaine en 1880, par Laveran, un médecin français, récompensé pour cette raison par le prix Nobel de médecine et de physiologie en 1907 (Nobel Prize, 1907). Il contribuera aussi à l'étude des hémosporidies aviaires par sa découverte de *Leucocytozoon smithi* et d'autres hémosporidies largement répandues telles que *L. majoris* ou *Haemoproteus majoris*. L'attention portée sur les hémosporidies aviaires par un scientifique d'une telle notoriété stimula l'intérêt d'autres médecins et vétérinaires pour ces parasites.

Les hémosporidies ont été observées pour la première fois chez les oiseaux en 1884 par le physiologiste russo-ukrainien Vassili Iakovlevich Danilewsky. Ses travaux confirment la large distribution des hémosporidies au sein des hôtes vertébrés. Bien que n'ayant pas pris part à la construction de la classification des hémosporidies, il évoque déjà un lien avec les agents du paludisme découverts quelques années plus tôt. Ses découvertes et publications sont fondatrices pour l'étude des hémosporidies aviaires, pour la compréhension de leur cycle évolutif et des lésions associées à l'infection.

En 1885, E. Marchiafava et A. Celli nomment *Plasmodium* le parasite découvert par Laveran, qui devient aussi le nom du genre associé. Grassi et Feletti placeront ensuite les agents de la malaria humaine et aviaire dans ce même genre et décriront les deux premières espèces de la malaria aviaires : *Haemamoeba relicta* et *Haemamoeba subpraecox*.

En 1887, Metchnikov établit la position taxinomique des hémosporidies comme proche des coccidies.

Le deuxième genre connu des hémosporidies, *Haemoproteus*, est construit en 1890 par W. Kruse, qui décrit aussi ses 3 premières espèces : *H. danilewskii*, *H. colombae* et *H. passeris*.

En 1890, Romanovsky découvre une nouvelle méthode de coloration des stades intraérythrocytaires des hémosporidies : le propylène bleu de méthylène, qui colore le noyau des hémosporidies en bleu

et leur cytoplasme en rose, permettant de les distinguer. Cette découverte a permis d'initier une investigation plus précise de la morphologie des hémospories, dont F. Schaudinn élaborera la terminologie des différents stades de développement en 1900.

En 1891, Celli et Sanfelice découvrent deux nouvelles espèces : *H. alaudae* et *H. noctuae*. Ils sont aussi les premiers à réussir à infecter des oiseaux en leur inoculant du sang infecté. Plus tard, en 1898, Ross découvre l'insecte vecteur de *Plasmodium*, du genre *Culex*, et décrit le cycle de *Plasmodium relictum*. Il confirme alors l'hypothèse déjà émise par Danilewsky, qui pensait déjà à l'intervention d'un vecteur dans la transmission de ces parasites. Le modèle oiseaux gagna ainsi en intérêt pour étudier la malaria humaine.

Le modèle oiseau tomba en désuétude après la découverte du modèle rongeur en 1950, puis l'infection en 1966 d'un primate par la malaria humaine. Au cours du XX^e siècle, les scientifiques précisèrent encore la morphologie et les cycles biologiques des hémospories, et remanièrent la taxonomie de ces parasites. On peut citer notamment la famille des Garniidae découverte en 1985 par A. Gabaldon dont *Falissia neotropicalis* est la seule espèce connue touchant les oiseaux (Valkiūnas, 2005).

La classification des hémospories a évolué au cours du temps : d'abord basée sur des critères morphologiques, les découvertes et les nouvelles techniques ont remis en cause plusieurs fois leur position phylogénétique.

b. Classification taxinomique des hémospories

Les hémospories sont des sporozoaires parasites sanguins à cycle hétéroxène obligatoire ayant pour cible des nombreuses espèces des vertébrés, telles que les amphibiens, reptiles, oiseaux et mammifères, et utilisant des diptères hématophages comme vecteurs. Au moins une phase de leur cycle est intracellulaire, et leur reproduction sexuée, c'est-à-dire la maturation des gamétocytes et la multiplication sexuée, se fait chez l'hôte invertébré (Valkiūnas, 2005).

Les hémospories possèdent un complexe membranaire interne (IMC : inner membran complex), ce qui les placent dans le supergroupe monophylétique des *Alveolata* qui comprend aussi les ciliés et les dinoflagellés (Adl *et al.*, 2019). Ils font aussi partie de l'embranchement des *Apicomplexa* car ils possèdent un ensemble d'organites aussi appelé complexe apical, ainsi qu'une organelle de type plaste non photosynthétique nommée apicoplaste (Figure 1). Le complexe apical est constitué d'au moins un anneau polaire, rhoptries, micronèmes, conoïde et de microtubules sous-pelliculaires (Figure 2) (Adl *et al.*, 2019).

Figure 1 : Taxinomie simplifiée des Apicomplexa (adapté d'après Valkiūnas, 2005 ; Schoch et al., 2020)

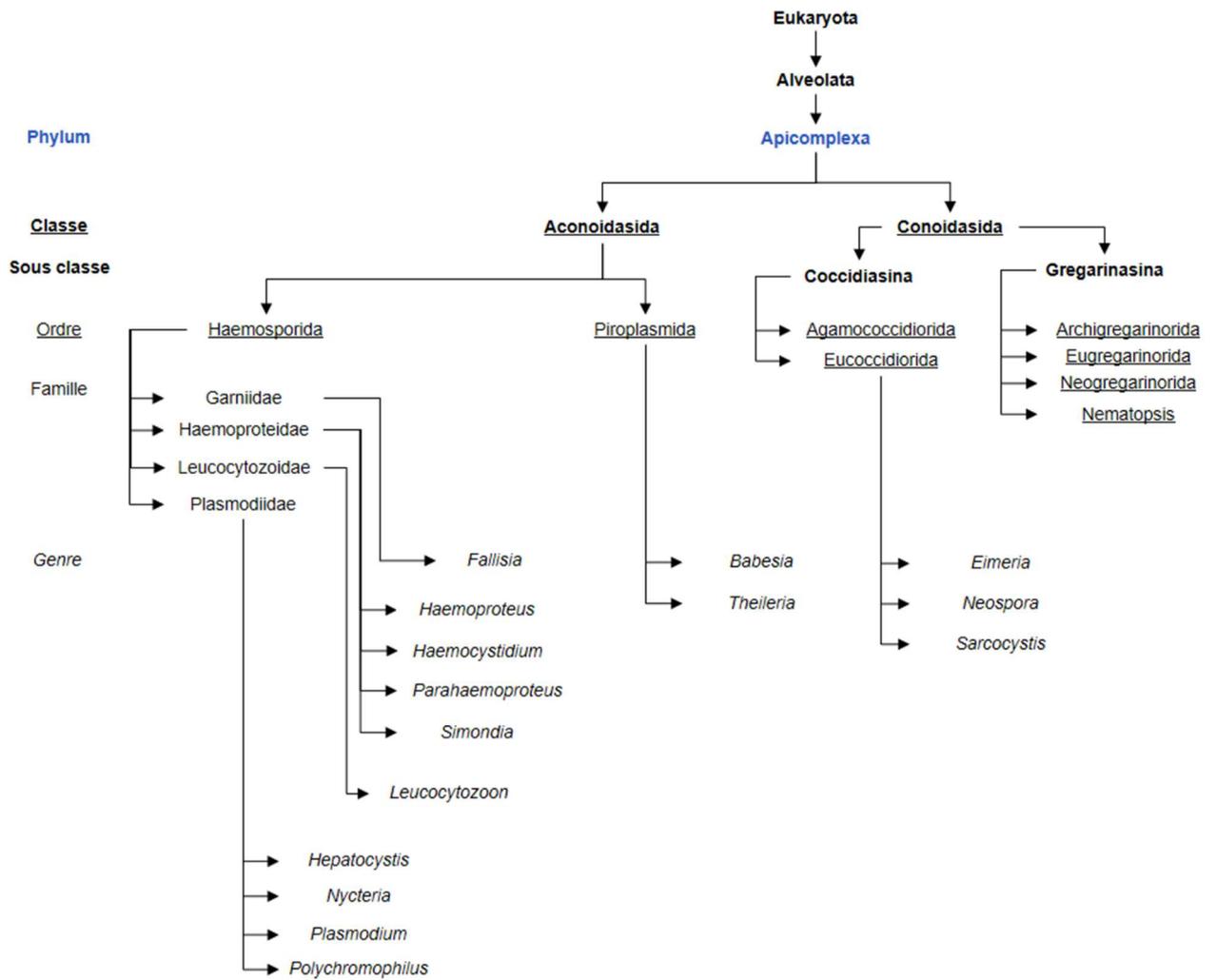
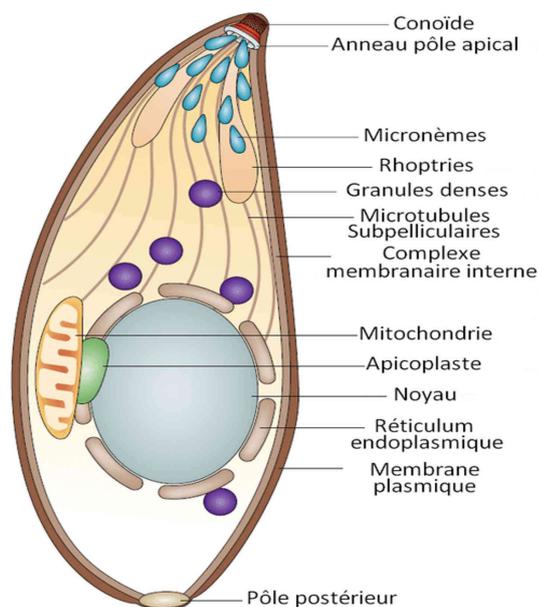


Figure 2 : Morphologie des Apicomplexa (d'après Hollin, 2017)



Les parasites du genre *Apicomplexa* semblent descendre d'un organisme « à vie libre » ayant un pouvoir photosynthétique : ils possèdent une organelle, l'apicoplaste, d'origine endosymbiotique secondaire et qui serait le vestige d'un plastide. Cette organelle permettrait d'assurer le métabolisme essentiel avec la mitochondrie qui est aussi retrouvée dans ces organismes (Wilson *et al.*, 1996 ; Lim et McFadden, 2010).

Les hémospories se distinguent des autres ordres appartenant à la classe Aconoidasida par un zygote motile, un ookynète possédant un conoïde, des microgamètes ciliés produit par schizogonie et un développement intra-oocyste des sporozoïtes (Adl *et al.*, 2019). Les hémospories sont réparties dans plusieurs familles au sein de l'ordre des *Haemosporida* : Haemoproteidae, Plasmodiidae, Leucocytozoidae, Garniidae.

Les Haemoproteidae se composent de 4 genres connus : *Haemoproteus*, *Haemocystidium*, *Parahaemoproteus*, et *Simondia*. Les Plasmodiidae comprennent aussi 4 genres : *Hepatocystis*, *Nycteria*, *Plasmodium* et *Polychromophilus*. Les familles des Leucocytozoidae et des Garniidae ne contiennent qu'un seul genre chacune, respectivement *Leucocytozoon* et *Fallisia* (Valkiūnas, 2005).

Les espèces d'hémospories parasitant les oiseaux appartiennent aux genres *Haemoproteus*, *Plasmodium* et *Leucocytozoon*. Une seule espèce infestant les oiseaux et n'appartenant pas à ces 3 genres a été répertoriée : *Fallisia neotropicalis*, qui appartient au genre *Garniidae* et qui est capable d'infester le pigeon biset (*Columba livia*) et plusieurs espèces de Ciconiiformes, mais qui à ce jour n'a pas été décrit chez les rapaces ou les corvidés (Gabaldon *et al.*, 1985).

Pour construire des arbres phylogénétiques de plus en plus précis, les études de phylogénie moléculaire utilisent des séquences d'ADN extraites du noyau, de la mitochondrie et de l'apicoplaste (Arisue et Hashimoto, 2015). Trois groupes d'*Apicomplexa* sont ainsi identifiés : les grégarines, les coccidies et les hématozoaires. Ils se différencient par leur cycle de développement et leur tropisme tissulaire (O'Donoghue, 2017).

De nombreuses études phylogénétiques ont concerné les espèces du genre *Plasmodium* responsables du paludisme chez l'homme dans le but d'identifier leurs origines évolutives. En découle une séparation des espèces infestant les primates et celles infestant les autres mammifères, oiseaux et reptiles (Keeling et Rayner, 2015). Les espèces de *Plasmodium* infestant les mammifères peuvent être regroupées dans un groupe monophylétique et celles infestant les oiseaux et reptiles dans un groupe paraphylétique constitué de plusieurs clades (Perkins et Schall, 2002), (Yotoko et Elisei, 2006) (Outlaw et Ricklefs, 2010 ; 2014). Au cours de l'évolution, ces clades se sont séparés au point que certaines espèces de *Plasmodium* infestant les oiseaux sont plus proches phylogénétiquement d'autres espèces infestant des lézards (squamates) que d'autres espèces infestant les oiseaux (Pineda-Catalan *et al.*, 2013).

Lorsque les genres d'hémospories autres que *Plasmodium* ont été inclus dans les analyses biomoléculaires, il est apparu que les genres infestant les chauves-souris forment un groupe paraphylétique : les espèces d'*Hepatocystis* infestant les chauves-souris sont ainsi regroupées avec les espèces de *Plasmodium* infestant les mammifères (Thurber *et al.*, 2013). Les genres *Haemoproteus* et *Leucocytozoon* sont pléiomorphes, i.e. phylogénétiquement plus anciens et forment des clades indépendants (O'Donoghue, 2017). L'antériorité d'*Haemoproteus*, *Paraharmoproteus*, *Leucocytozoon* par rapport à *Plasmodium* a été démontrée (Balasubramaniam *et al.*, 2013).

L'étude de co-évolution entre hôte et vecteurs pourrait être une aide supplémentaire à la construction d'arbre phylogénétique des hémospories : Martinsen met en évidence dans son étude une relation entre le genre d'hémosporie, son hôte vertébré et son vecteur (Martinsen *et al.*, 2008). Il y aurait une transition entre les hémospories ne formant pas d'hémozoïne (les *Leucocytozoon* dans les globules blancs) et ceux digérant l'hémoglobine dans les globules rouges (*Haemoproteus*, *Parahaemoproteus*, *Plasmodium*, *Hepatocystis*). Il y aurait eu ensuite une autre transition entre les hémospories subissant une schizogonie exclusivement dans les tissus de l'hôte vertébré (*Leucocytozoon*, *Haemoproteus*, *Parahaemoproteus*) jusqu'à ceux présentant une schizogonie dans les cellules sanguines (*Plasmodium*, *Hepatocystis*) (O'Donoghue, 2017).

Une combinaison de critères morphologiques et moléculaire (ADN mitochondrial) a permis de résoudre la majorité des polytomies et d'augmenter la « probabilité postérieure ». C'est la meilleure alternative pour reconstruire les relations entre hémospories aviaires, avec la même résolution que si l'on utilisait l'ensemble de la séquence mitochondriale sur 100 lignés. Cette phylogénie place le gain de pigment hémozoïne à la base de *Plasmodium* et *Haemoproteus*, et la mérogonie dans le sang à l'origine de *Plasmodium*. La structure tridimensionnelle des hémospories est perdue au microscope, l'identification des espèces requiert de l'expérience et du temps, mais les critères morphologiques sont informatifs, intéressants à combiner et peu chers. Ils sont donc une bonne alternative quand on n'a pas accès à la PCR (Hernández-Lara *et al.*, 2018).

Il est possible d'assister, dans les années futures, à une diffusion des hémospories dans des régions jusqu'à présent épargnées, à cause du changement climatique. Prévoir des maladies émergentes nécessite de connaître les caractéristiques des hôtes pouvant permettre au pathogène de changer d'hôte. Le vecteur est le maillon faible en termes de connaissance sur les hémospories. Une meilleure connaissance de l'histoire évolutive des hémospories au sein des diptères vecteurs, hôte définitif, contribuerait à une meilleure compréhension de la triade parasite-hôte vertébré-vecteur (Fecchio *et al.*, 2020).

Le gène du cytochrome b (*cytb*) est la base du savoir actuel sur l'histoire évolutive des hémospories. Ce gène code une protéine impliquée dans le métabolisme énergétique de phosphorylation oxydative, qui a lieu dans l'hôte vecteur par absence de glucose pour la production d'ATP. Il est donc possible que les conclusions phylogénétiques basées sur l'étude de ce gène reflètent plus le développement des parasites dans le vecteur que dans l'hôte vertébré (Fecchio *et al.*, 2020).

Les études actuelles suggèrent que les hémospories auraient évolué à partir des coccidies chez les vertébrés pour ensuite incorporer les invertébrés dans leur cycle de développement. Ceci est d'autant plus remarquable que ces derniers sont devenus le lieu de la reproduction sexuée. Pour le moment, les mécanismes évolutifs expliquant le passage des vertébrés aux invertébrés comme hôte définitif ne sont pas encore connus.

B. Biologie

Les hémospories ont un cycle évolutif strictement hétéroxène. Elles se développent dans deux types d'hôtes : un vertébré (oiseau dans cette étude) et un vecteur (arthropode hématophage).

La reproduction sexuée des hémospories se fait au sein du vecteur. Un microgamète mâle fusionne avec un macrogamète femelle pour former un zygote qui donnera un oocyste très résistant grâce à une paroi épaisse. La sporogonie de cet oocyste conduit à la formation de nombreux sporozoïtes, formes infestantes transmises à l'hôte vertébré par pique. Ces derniers envahissent les différents tissus de l'hôte et forment des mérontes après multiplication asexuée, qui libéreront à leur tour des mérozoïtes dans la circulation sanguine et sont la forme infestant le vecteur après son repas sanguin.

a. Cycle des hémospories

Hormis le stade zygote, toutes les phases du cycle des hémospories sont haploïdes. Leur cycle de développement peut impliquer jusqu'à trois processus de division différents (Valkiūnas, 2005 ; O'Donoghue, 2017 ; Giorgiadis, 2017) :

- La mérogonie (ou schizogonie), division asexuée soit par fission (division de la cellule mère) soit par endogénie (formation de cellules filles dans la cellule mère). La mérogonie transforme un trophozoïte, stade adulte asexué, en méronite (aussi appelé schizonte) qui contient plusieurs noyaux. Suite à sa rupture, le méronite donne des cellules filles uninuclées : les mérozoïtes.
- La gamétogonie, formation des gamétocytes à partir de mérozoïtes qui deviendront à terme des gamètes. Les gamétocytes sont soit mâle (microgamétocyte) soit femelle (macrogamétocyte). Ils donneront respectivement le microgamète mâle et le macrogamète femelle, impliqués par la suite dans une fécondation par fusion. L'ookinète est le stade d'œuf mobile succédant au zygote qui résulte de la fusion des gamètes. Une fois enkysté, il deviendra un oocyste.
- La sporogonie, succession de divisions asexuées au sein d'un oocyste, et aboutissant à la formation de sporozoïtes unicellulaires de forme allongée qui sont la forme infestante dans l'hôte vecteur.

- *Inoculation*

La forme des hémospories pouvant infecter les oiseaux est le sporozoïte. Cette forme est stockée dans les glandes salivaires de l'insecte vecteur et est inoculée aux oiseaux par pique à l'occasion d'un repas sanguin. Les sporozoïtes rejoignent ensuite le sang périphérique pour migrer vers les organes cibles via la circulation sanguine ou lymphatique (Valkiūnas, 2005).

- *Invasion*

- Invasion exo-érythrocytaire

Les sporozoïtes envahissent les différents tissus cibles de l'hôte, avec parfois des étapes de transmigration préalable à travers des cellules endothéliales ou autre pour atteindre les cellules cibles. Pour infester une cellule hôte, le sporozoïte reconnaît d'abord la cellule grâce à son glideostome et à son complexe apical. Il forme ensuite une vacuole parasitophore et se transforme en trophozoïte. Il s'en suit une première mérogonie qui correspond à une étape de multiplication

asexuée des trophozoïtes dans les cellules hôtes. Cette mérogonie conduit à la formation des mérontes puis de mérozoïtes mobiles capables de ré-envahir des cellules, de répéter une mérogonie exo-érythrocytaire ou de rejoindre la circulation sanguine pour aller envahir d'autres cellules cibles (Valkiūnas, 2005).

□ Invasion érythrocytaire et transmission au vecteur

La mérogonie érythrocytaire a lieu au sein des globules rouges. Elle peut être suivie d'une ou plusieurs mérogonies exo-érythrocytaires. Ces multiplications asexuées sont importantes pour la dissémination du parasite au sein de l'organisme de l'hôte vertébré et pour l'infection d'un prochain vecteur.

Les mérozoïtes présents dans les cellules sanguines (ciblent les globules rouges), se transforment en trophozoïtes pour former d'autres mérontes ou pour former des gamétocytes (cellules pouvant produire des gamètes).

Les gamétocytes sont les formes infectant le vecteur (Valkiūnas, 2005). Les macrogamétocytes produisant les macrogamètes se distinguent morphologiquement des microgamétocytes produisant les microgamètes : le noyau des macrogamètes possède un nucléole, ce qui n'est pas le cas des microgamètes. Les macrogamètes ont aussi un noyau plus compact et un cytoplasme plus dense.

Le déclenchement de la gamétocytogenèse est dépendant de mécanismes non connus dans leur intégralité. Parmi ces derniers on peut citer le stress lié à un changement d'environnement (concentration en O₂ et CO₂ variant entre le sang de l'hôte et celui du vecteur), l'action d'une protéine G, l'inhibition d'un rétrocontrôle négatif au-delà d'un certain seuil de molécules produites par les phases asexuées du parasite. Il n'y a probablement pas un seul mécanisme à l'œuvre mais plusieurs facteurs simultanés (Baker, 2010).

Ainsi, les gamétocytes intra-érythrocytaires formés n'évoluent plus jusqu'au prochain repas sanguin du vecteur. Une fois dans ce dernier, ils sortent des globules rouges pour pénétrer dans les cellules du tube digestif du vecteur (Valkiūnas, 2005).

• *Reproduction*

Après le repas sanguin du vecteur sur un oiseau infecté, le gamétocyte entre en gamétogenèse dans l'estomac du vecteur. L'oogamie résulte de la rencontre entre un microgamète mâle et un macrogamète femelle. Pour cela, les gamétocytes se libèrent des cellules hôtes. Le changement de concentration en dioxygène et en dioxyde de carbone lors du transfert du sang de l'oiseau au vecteur est un des stimuli initiant la gamétogenèse. Un macrogamétocyte produit un macrogamète rond, tandis que les microgamétocytes subissent une exflagellation et produisent chacun 8 microgamètes motiles et filiformes (Valkiūnas, 2005 ; Atkinson *et al.*, 2008).

La fécondation a lieu dans le lumen de l'intestin moyen du vecteur, c'est-à-dire en milieu extracellulaire. Elle produit un zygote qui subit rapidement une division méiotique et devient un ookinète allongé et motile. Ce dernier pénètre dans la paroi de l'estomac du vecteur, se loge sous la lame basale pour s'arrondir et former un oocyste, en s'entourant d'une capsule. Après maturation de l'oocyste par sporogonie, il se rompt et les sporozoïtes relâchés migrent dans l'hématocèle puis

dans les glandes salivaires de l'hôte vecteur pour être inoculés dans un nouvel hôte vertébré lors d'un prochain repas sanguin (Valkiūnas, 2005 ; Atkinson *et al.*, 2008).

b. *Particularités du genre Haemoproteus*

Les cycles évolutifs complets ne sont connus que pour certaines espèces de parasites, en particulier celles qui ont été le plus documentées et pour lesquelles le plus d'expériences a été réalisée : *H. colombae* pour les Colombinés (pigeons et colombes), *H. meleagridis* pour les dindons sauvages (*Meleagris gallopavo*) et *H. danilewski* pour les geais bleus (*Cyanocitta cristata*) (Atkinson *et al.*, 2008).

Les vecteurs utilisés par le genre *Haemoproteus* appartiennent aux familles des Ceratopogonidae et Hippoboscidae. Les sporozoïtes transmis à l'oiseau à l'occasion d'un repas sanguin par ses vecteurs ne réalisent aucune mérogonie dans les cellules sanguines. Cependant, le parasite se développe dans les cellules endothéliales des capillaires, dans les cellules du système des phagocytes mononucléaires et/ou dans les myofibroblastes : ils y commencent leurs mérogonies exoérythrocytaires.

Si l'on prend l'exemple de *H. meleagridis*, il y a dans cette espèce deux mérogonies dans les cellules endothéliales des capillaires et dans les myofibroblastes des muscles squelettiques et cardiaque. La première mérogonie produit des mérontes ronds ou ovales à paroi fine mesurant 12 à 20 micromètres de diamètre. La seconde mérogonie produit des mégalomérontes plus larges, fusiformes à paroi épaisse et mesurant plus de 500 micromètres de long. Ces derniers deviennent matures au bout de 17 jours après infestation et se rompent pour libérer de petits mérozoïtes sphériques qui envahissent les érythrocytes et se transforment en gamétocytes (Atkinson *et al.*, 1986).

Le nombre de mérogonies exoérythrocytaires précédant l'infestation des érythrocytes n'est pas défini pour *H. colombae* et *H. danilewski* (mais doit probablement être de 2 ou 3). Pour ces espèces, le parasite envahit les cellules endothéliales des capillaires des poumons où se forment des mérontes ovales ou ramifiés à paroi fine (Ahmed et Mohammed, 1978 ; Garvin *et al.*, 2003).

Les mérontes extra-érythrocytaires qui se développent sont ensuite retrouvés dans divers organes (poumons, foie, muscles squelettiques, myocarde, reins ou rate) (Karadjian *et al.*, 2013). Leur forme est variable. Il y a toujours au moins deux générations de mérontes avant la formation des gamétocytes. La première se développe dans l'endothélium des capillaires sanguins et dans les myofibroblastes. Ces mérontes peuvent atteindre 20 micromètres de diamètres et produisent des mérozoïtes allongés (environ 6 micromètres de long). Leur développement prend 5 jours à partir de l'innoculation du parasite dans l'hôte vertébré (Valkiūnas, 2005 ; Atkinson *et al.*, 2008).

La deuxième génération de mérontes deviendra mature à 17 jours post inoculation. Cette deuxième génération de mérontes produit des mérozoïtes ronds d'un micromètre de diamètre. Ces derniers se transforment en mégalomérontes qui pénètrent dans les érythrocytes pour donner des gamétocytes. Une double membrane est formée dans les érythrocytes. Seuls les gamétocytes se développent dans les érythrocytes matures. Des granules d'hémozoïne (brun doré à noir) sont formés au sein des gamétocytes. Les gamétocytes capables de produire des gamètes apparaissent entre 2 et 5 jours après la pénétration des mérozoïtes dans le globule rouge. Au-delà, la capacité de gamétogenèse décroît (Valkiūnas, 2005 ; Atkinson *et al.*, 2008).

Au total, la période prépatente des hémospories appartenant au genre *Haemoproteus* varie entre 11 jours et 3 semaines. Le pic d'intensité de parasitémie est atteint à 21 jours post infestation environ, puis chute rapidement en 7 jours pour atteindre des parasitémies basses. Un second pic peut avoir lieu 35 jours post infestation (Atkinson *et al.*, 1986).

Lors d'une nouvelle pique, les gamétocytes sont ingérés par le vecteur. La variation des concentrations en dioxygène et en dioxyde de carbone lors du passage du sang de l'hôte au tube digestif du vecteur induit la formation des gamètes : chaque macrogamétocyte donne un macrogamète rond, et chaque microgamétocyte donne plusieurs microgamètes filiformes munis de flagelles. La taille des microgamètes varie entre 10 et 18 micromètres, celle des macrogamètes est plus homogène, entre 6 et 7 micromètres.

La sporogonie varie ensuite selon la famille du vecteur. Chez les Cératopogonidés, des petits oocystes (moins de 20 micromètres) avec un centre germinatif sont formés et en petit nombre (en moyenne 100). La sporogonie est réalisée en moins de 10 jours, durée qui correspond aussi au cycle relativement court (7-10 jours) des Cératopogonidés. Au moment du repas sanguin, les sporozoïtes migrent dans les glandes salivaires du vecteur.

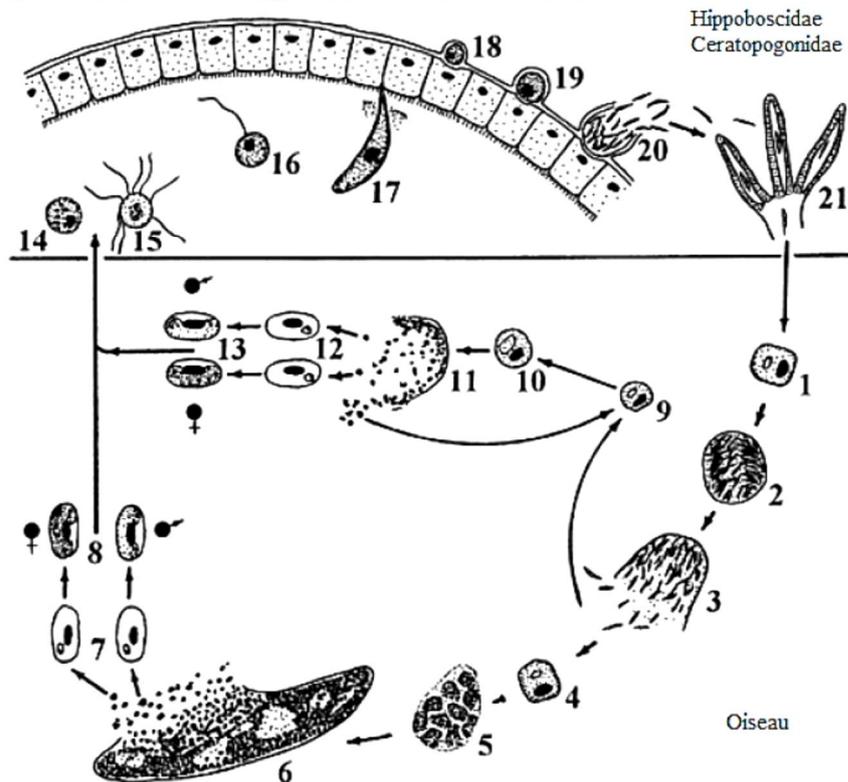
Chez les Hippoboscidés, le développement est plus long (supérieure à 10 jours), les oocystes sont plus gros (20 micromètres au moins) ont plusieurs centres germinatifs, et les sporozoïtes sont formés en grand nombre (plusieurs centaines). Cette plus grande prolificité des parasites chez les Hippoboscidés est permise par le temps de vie plus long de ces vecteurs. Chez ces vecteurs, la migration des sporozoïtes n'est pas synchronisée au repas sanguin, cependant ces mouches passent la plupart de leur cycle de vie sur l'oiseau (Valkiūnas, 2005).

Les facteurs déterminant les préférences des différentes espèces d'*Haemoproteus* à infester préférentiellement un genre ou l'autre de vecteurs sont méconnus. Il semblerait que les espèces transmises par un genre de vecteur puissent l'être par l'autre, même si cela n'a jamais été expérimentalement démontré : par exemple *H. lophortyx* infestant les colins de Virginie (*Colinus virginianus*) est retrouvé à la fois chez les vecteurs *Culicoides bottimeri* (Ceratopogonidae), *Stilbometopa impressa* (Hippoboscidae) et *Lynchia hirsuta* (Hippoboscidae) (Atkinson *et al.*, 2008).

La figure 3 ci-dessous illustre le cycle biologique général des *Haemoproteus* aviaires.

Figure 3 : Cycle des *Haemoproteus* aviaires (adapté d'après Valkiūnas, 2005)

1 : sporozoïte dans une cellule endothéliale ; 2 : schizonte tissulaire primaire produisant des mérozoïtes allongés ; 3 : rupture du schizonte tissulaire primaire ; 4 : mérozoïte dans une cellule endothéliale ; 5 : jeune mégaloszizonte musculaire ; 6 : mégaloszizonte musculaire mûr ; 7 : mérozoïtes intraérythrocytaires et gamétocytogènes ; 8 : gamétocytes ; 9 : mérozoïte dans une cellule réticulo-endothéliale splénique ; 10 : schizonte tissulaire secondaire splénique ; 11 : rupture schizonte tissulaire secondaire splénique ; 12 : mérozoïtes intraérythrocytaires gamétocytogènes ; 13 : gamétocytes ; 14 : macrogamète ; 15 : exflagellation des microgamètes ; 16 : fécondation ; 17 : ookinète pénétrant dans la membrane péritrophique ; 18 : jeune oocyste ; 19 : sporogonie ; 20 : rupture de l'oocyste, libération des sporozoïtes et migration vers les glandes salivaires ; 21 : accumulation de sporozoïtes dans les glandes salivaires du vecteur.



c. Particularités du genre *Leucocytozoon*

Les hémospodidies du genre *Leucocytozoon* ont pour vecteur des arthropodes hématophages appartenant aux familles des Simulidés et Cératopogonidés. De même que chez *Haemoproteus*, il n'y a pas chez *Leucocytozoon* de mérogonies dans les cellules sanguines. Une infestation d'un l'hôte vertébré par subinnoculation est donc impossible. Le cycle de *L. simondi* est le mieux connu.

Les sporozoïtes provenant d'un vecteur Simuliidae ne peuvent se développer que dans les hépatocytes. Les sporozoïtes peuvent persister de manière viable pendant plusieurs jours chez les oiseaux, sans que le rôle de cette persistance ne soit compris. Les sporozoïtes donnent la première génération de mérontes hépatiques. Cette mérogonie exoerythrocytaire se fait dans les cellules parenchymateuses du foie (c'est-à-dire les hépatocytes), dans les macrophages et dans d'autres cellules réticuloendothéliales, dont les cellules endothéliales des capillaires sanguins.

La première génération de mérontes se développe dans le parenchyme hépatique pour tous les *Leucocytozoon* étudiés sauf *L. caulleryi* qui se développe dans les cellules endothéliales de nombreux organes, *L. dubreuilii* dans le foie et les cellules endothéliales rénales et *L. smithi* uniquement dans le foie (Valkiūnas, 2005 ; Atkinson *et al.*, 2008).

La croissance des mérontes est accompagnée par une augmentation de la quantité de cytoplasme et de multiples divisions du noyau. Le cytoplasme réalise alors de multiples invaginations, se divise en plusieurs parties (cytomères) contenant chacune des nuclei. A moindre échelle, des invaginations au sein des cytomères forment des mérozoïtes unicellulaires mesurant 1-2 micromètre de diamètre. Ces fragments de cytoplasmes plurinucléaires entourés d'une membrane plasmique se développent simultanément et sont appelés syncytia. Le développement des mérontes hépatiques prend entre 4 et 5 jours.

Le syncytia se disperse dans le sang en direction d'autres organes cibles. Les mérontes sont phagocytés par les macrophages et d'autres cellules réticuloendothéliales, donnant la deuxième génération de mérontes, appelés mégalomérontes par leur grande taille. Ils peuvent être observés partout dans l'organisme des oiseaux, mais la majorité se trouve dans la rate. Ils deviennent matures en 4 à 5 jours. Ils contiennent des centaines de milliers de mérozoïtes uninuclées de 1 micromètre de diamètre environ. Ces derniers pénètrent dans les lymphocytes et autres leucocytes mononucléés et donnent ensuite des gamétocytes. Les cellules infectées deviennent fusiformes, leur noyau est déporté en périphérie.

Une partie des mérozoïtes issus des mégalomérontes est absorbée par les cellules réticuloendothéliales et ralentissent leur développement, forment périodiquement des mégalomérontes, maintenant ainsi une parasitémie chronique. Certains mérozoïtes issus des mérontes hépatiques font une seconde mérogonie.

La forme des gamétocytes de *Leucocytozoon* est ronde, ovale, ou ovale allongée. Il y a deux types de gamétocytes : ceux de forme ronde se développant dans les érythrocytes, et de forme allongée ou fusiforme qui se développent dans les leucocytes. Les cellules hôtes peuvent être fusiformes pendant le développement des gamétocytes, mais pas lorsqu'ils sont à leur taille maximale. Dans certaines espèces comme *L. simondi* et *L. smithi*, la parasitémie suit un cycle nyctéméral : le pic est atteint en journée, coïncidant avec la période d'activité des simuliidés pour le repas sanguin (Atkinson *et al.*, 2008).

Aucun stade du cycle de *Leucocytozoon* ne produit le pigment hémozoïne, car le parasite digère totalement l'hémoglobine quand il se développe dans les globules rouges. Par contre, dans certaines espèces, on peut retrouver de la valutine, un pseudopigment (sa nature est peu étudiée), qui réfracte faiblement la lumière contrairement à l'hémozoïne (Atkinson *et al.*, 2008).

La sporogonie se fait après 3 à 5 jours à 20°C (avec des variations selon les espèces). Peu de sporozoïtes sont produits par oocyste (moins de 100). Ils se libèrent des oocystes, puis migrent dans l'haemocoel et pénètrent dans les glandes salivaires. Ils sont allongés avec une extrémité plus ronde et une pointue, mesurant 8 micromètres de long pour 1 micromètre de large en moyenne.

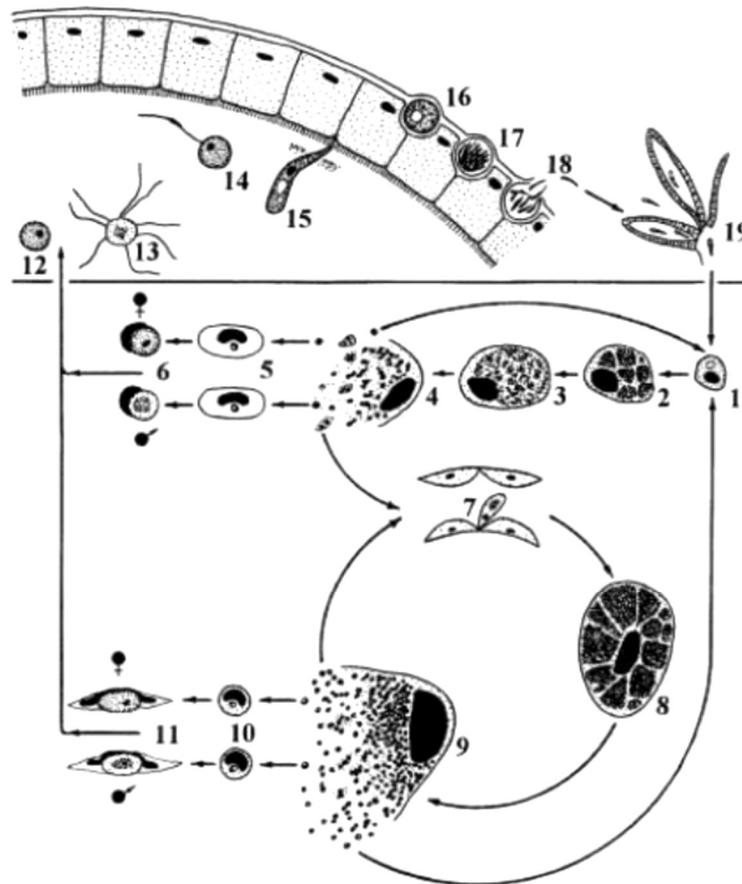
Il est probable que la restriction pour le développement d'un parasite dans un vecteur simuliidae plutôt qu'un autre est question d'écologie plutôt que de physiologie. Certaines espèces de *Leucocytozoon* peuvent être transmises par plusieurs espèces de Simuliidae et inversement (Valkiūnas, 2005 ; Atkinson *et al.*, 2008).

Une étude d'infection expérimentale de poussins avec *L. sabrazesi* montre que la gamétocytémie peut persister 4 à 5 jours post inoculation du parasite (Zhao *et al.*, 2014).

La figure 4 ci-dessous illustre le cycle biologique général des *Leucocytozoon* aviaires.

Figure 4 : Cycle des *Leucocytozoon* aviaires (adapté d'après Valkiūnas, 2005)

1 : sporozoïte ou mérozoïte dans un hépatocyte ; 2 : jeune schizonte hépatique ; 3 : schizonte hépatique mûr ; 4 : rupture du schizonte hépatique ; 5 : mérozoïtes intraérythrocytaires gamétocytogènes ; 6 : gamétocytes ; 7 : mérozoïte dans une cellule réticuloendothéliale ; 8 : mégaloschizonte ; 9 : rupture du mégaloschizonte ; 10 : mérozoïtes intraleucocytaires gamétocytogènes ; 11 : gamétocytes dans un leucocyte fusiforme ; 12 : macrogamète ; 13 : exflagellation des microgamètes ; 14 : fécondation ; 15 : ookinète pénétrant dans la membrane péritrophique ; 16 : jeune oocyste ; 17 : sporogonie ; 18 : rupture de l'oocyste, libération des sporozoïtes et migration vers les glandes salivaires ; 19 : accumulation de sporozoïtes dans les glandes salivaires du vecteur.



d. Particularités du genre *Plasmodium*

Les hémospories du genre *Plasmodium* ont pour vecteur les Culicidae (genres *Culex*, *Culiseta*, *Aedes*, *Anopheles*). Seule la femelle se nourrit de sang et participe donc à la transmission du parasite.

Les sporozoïtes injectés par le vecteur envahissent les macrophages et fibroblastes à proximité du lieu de pique et donnent une première génération de mérontes exoérythrocytaires primaires. Cette première génération de mérontes est appelée cryptozoïtes, et se développent principalement dans les cellules réticulées de plusieurs organes, y compris la peau, mais aussi fréquemment dans les hépatocytes. Les mérontes exo-érythrocytaires de seconde génération se nomment métacryptozoïtes (Valkiūnas, 2005 ; Atkinson *et al.*, 2008). Les mérontes exoérythrocytaires peuvent être ovales, allongés ou ramifiés et ont une morphologie semblable aux mérontes à paroi fine d'*Haemoproteus*. Ils se répliquent et forment des mérozoïtes capables d'envahir les cellules mononucléées du système

des phagocytes dans le cerveau, la rate, les reins et les poumons, et réalisent alors une 2^e mérogonie exoérythrocytaire formant des métacryptozoïtes (Valkiūnas, 2005 ; Atkinson *et al.*, 2008).

Les mérozoïtes formés dans les métacryptozoïtes sont eux-mêmes capables d'infecter une cellule de la lignée érythrocytaire. Une partie se développe dans les métacryptozoïtes pour donner la prochaine génération de métacryptozoïtes (appelée phanerozoïte), l'autre partie part infecter les érythrocytes et engendrer les gamétocytes. Les mérontes érythrocytaires se développent dans les cellules de la lignée érythrocytaire, les gamétocytes dans les érythrocytes matures. Le cycle de *P. gallinaceum* est le plus connu (Atkinson *et al.*, 2008).

La période prépatente est la durée entre l'inoculation et la détection du parasite. Elle n'excède pas 120 heures pour *Plasmodium relictum*. Une fois dans les érythrocytes, le parasite prend une forme ronde et engendre les trophozoïtes (forme en croissance non fissionable), parfois en forme d'anneau avec une large vacuole et un noyau excentré. La quantité de cytoplasme augmente avec la croissance du parasite et l'hémozoïne apparaît ensuite. Contrairement au genre *Haemoproteus* et *Leucocytozoon*, *Plasmodium* présente un stade de méronite intraérythrocytaire dans son cycle. Il peut donc y avoir infection de l'hôte vertébré par subinoculation de sang infecté. Le cycle des mérogonies intraérythrocytaire dure entre 24 et 36 heures.

L'apparition des gamétocytes a lieu en général dans les érythrocytes matures, contrairement aux mérontes érythrocytaires qui peuvent se développer dans toutes les cellules de la lignée rouge. Les gamétocytes sont issus de la transformation intraérythrocytaire d'un mérozoïte. On distingue macrogamétocyte et microgamétocyte (qui donnent respectivement les gamètes femelles et mâles). (Valkiūnas *et al.*, 2018).

À la faveur d'un repas sanguin, les gamétocytes sont ingérés par le vecteur. S'en suit alors la gamétogénèse, la fécondation et le développement des ookinètes. Ces derniers migrent dans le mésentéron du vecteur en prenant une forme de vers contenant des vacuoles. Une fois la lame basale atteinte, ils deviennent ronds et se transforment en oocystes. Ils grossissent beaucoup durant leur développement. Plusieurs centres germinatifs sont formés et plusieurs centaines de sporozoïtes se développent pendant la sporogonie.

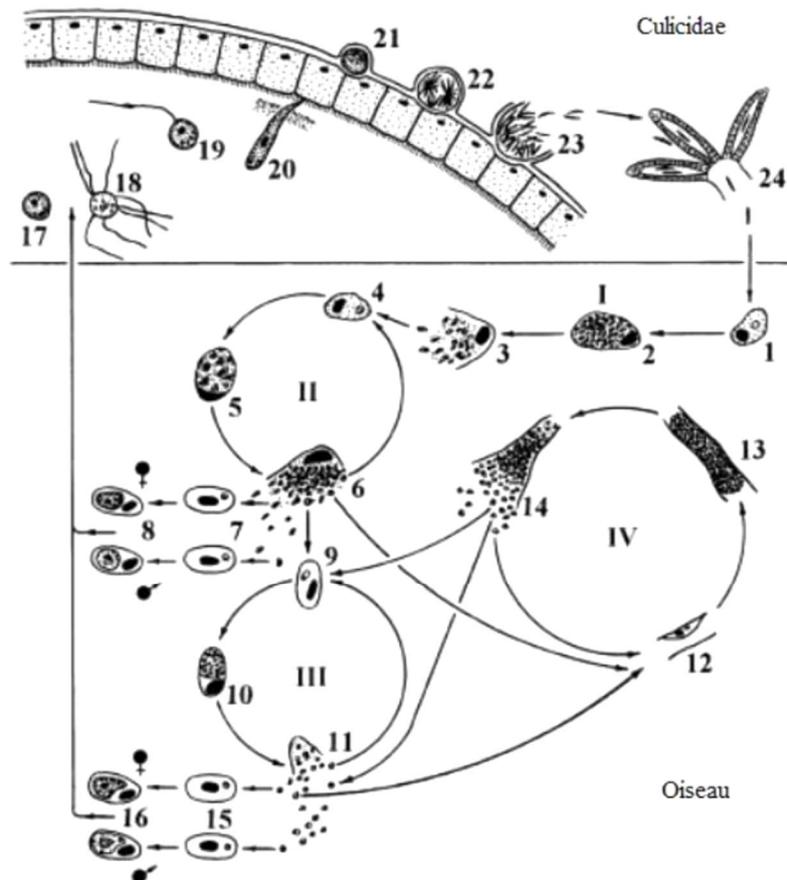
La température est un facteur important pour le développement et la viabilité des sporozoïtes (Valkiūnas, 2005).

L'expression de certains gènes de *Plasmodium* pourrait avoir une importance pour son développement au sein de son vecteur *Culex*. Une étude s'est intéressée au transcriptome de *P. relictum* à plusieurs moments cruciaux de son développement au sein du vecteur *Culex pipiens quinquefasciatus* : quelques minutes après le repas sanguin, durant la production d'oocystes et de sporozoïtes et quelques temps après. Parmi les gènes surexprimés se trouvent des gènes impliqués dans une interaction avec le système immunitaire de l'hôte, des gènes multifonctionnels dont un associé avec la conservation d'une membrane protéique chez *Plasmodium* dont la fonction est inconnue mais dont la surexpression suggère un rôle important dans la réalisation du cycle sporogonique du parasite. D'autres gènes sont aussi surexprimés de manière significative avec une fonction inconnue, et d'autres codant pour des protéines d'attachement aux réticulocytes (RBP), qui pourraient donc avoir une autre fonction que celle déjà connue (Sekar *et al.*, 2021).

La figure 5 ci-dessous illustre le cycle biologique général des *Plasmodium* aviaires.

Figure 5 : Cycle des *Plasmodium* aviaires (adapté d'après Valkiūnas, 2005)

I : schizogonie exoérythrocytaire primaire ; II : schizogonie exoérythrocytaire secondaire ; III : schizogonie érythrocytaire ; IV : schizogonie postérythrocytaire ; 1 : sporozoïte dans une cellule réticulo-endothéliale dermique ; 2 : cryptozoïte ; 3 : rupture du cryptozoïte ; 4 : mérozoïte intramacrophagique ; 5 : métacryptozoïtes ; 6 : rupture des métacryptozoïtes ; 7 : mérozoïtes intraérythrocytaires gamétocytogènes ; 8 : gamétocytes ; 9 : mérozoïte intraérythrocytaire ; 10 : schizonte érythrocytaire ; 11 : rupture du schizonte érythrocytaire ; 12 : mérozoïte dans une cellule endothéliale des capillaires ; 13 : phanérozoïtes ; 14 : rupture du phanérozoïte ; 15 : mérozoïtes intraérythrocytaires gamétocytogènes ; 16 : gamétocytes ; 17 : macrogamète ; 18 : exflagelation des microgamètes ; 19 : fécondation ; 20 : ookinète pénétrant dans la membrane péritrophique ; 21 : jeune oocyste ; 22 : sporogonie ; 23 : rupture de l'oocyste, libération des sporozoïtes et migration vers les glandes salivaires ; 24 : accumulation de sporozoïtes dans les glandes salivaires du vecteur.



e. Vecteurs

Les trois genres d'hémosporidies ont des vecteurs diptères différents :

Les Ceratopogonidae (*Culicoides* sp) et les Hippoboscidae (*Ornithomyia* sp), aussi dénommées « mouches plates », sont les vecteurs d'*Haemoproteus*. Les Simuliidae (*Simulium* sp), et plus rarement des Ceratopogonidae, sont les vecteurs de *Leucocytozoon*. Les Culicidae (*Culex*, *Aedes*, *Culiseta*, *Anopheles* sp) sont les vecteurs de *Plasmodium*.

- *Hippoboscidae* : vecteurs d'*Haemoproteus*

Les Hippoboscidés (figure 6) sont des diptères brachycères. Ces sont des espèces vivipares et une seule larve à la fois se développe dans l'utérus de la femelle. Une fois née, la larve se transforme presque immédiatement en puppe (nymphe immobile) qui se métamorphosera ensuite en adulte. Lors

de la phase de pupaison, les mouches vont déposer leur larve dans les nids, ce qui facilitera la recherche d'un hôte au futur vecteur adulte.

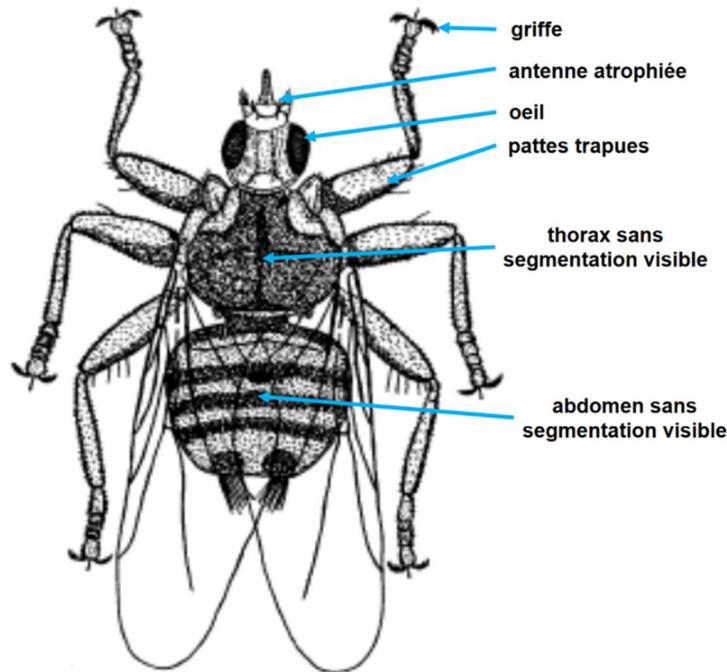
Même si la plupart des espèces sont capables de voler, elles ne passent que peu de temps loin de leur hôte. Leur morphologie aplatie dorso-ventralement (mouche plate) et les deux griffes présentes au pattes chez les adultes permettent cette proximité. Chez les espèces infestant les oiseaux, ce qui représente 75 % des Hippoboscidés, les ailes des adultes sont parfois atrophiées voire absentes, et les pattes sont petites et fortes ce qui facilite leur passage entre les plumes (Giorgiadis, 2017).

Environ 150 espèces sont répertoriées (Giorgiadis, 2017). Le genre *Ornithomya* est celui qui parasite le plus fréquemment les rapaces. La collaboration entre le laboratoire d'éco-entomologie du Centre Régional de Bague de Normandie (CRBN) plusieurs centres de soins de Faune Sauvage et des bagueurs en France métropolitaine, Belgique, Luxembourg et Suisse, permet depuis plusieurs années, le recensement et l'identification des mouches-plates retrouvées sur les oiseaux. Parmi les Ornithomynés provenant de centres de sauvegarde, 30 % ont été retrouvées sur des rapaces et 20 % sur des corvidés. L'espèce majoritaire est *Ornithomya avicularia* mais l'on a aussi retrouvé dans de rares cas le pupipare austral (*O. metallica*). L'espèce *O. gestroi*, aussi appelée « pupipare des faucons » a été récemment détectée en France, alors qu'elle était localisée jusqu'à présent en Espagne et en Grèce pour les régions les plus proches (Le Guillou et CRBPO, 2020 ; Le Guillou et CRBPO, 2021).

Un autre exemple est l'espèce *O. comosa* pour la première fois décrite en Europe (Isthme de Courlande) en 2013, alors qu'elle était précédemment décrite en Asie (Inde, Malaisie, Nepal, Thaïlande, Kazakhstan). Les raisons évoquées pour cette nouvelle découverte sont que cette mouche plate était déjà présente en Europe mais n'avait pas été collectée, ou elle serait arrivée grâce à un hôte volatile migratoire (Nartshuk et al., 2019).

Auparavant, on considérait que la relation des Hippoboscidés avec leur hôte était assez spécifique : les espèces parasitant les oiseaux ne s'intéressent généralement pas aux mammifères et réciproquement. Cependant, chaque année, des nouvelles associations hôtes-parasites sont décrites et des espèces jusqu'alors non décrites en France sont découvertes, comme le pupipare du chevreuil (*Lipoptena fortisetosa*) sur un Autour des palombes (*Accipiter gentilis*) dans les Deux-Sèvres en 2020, ou le pupipare des pigeons (*Pseudolynchia canariensis*) sur des rapaces et corvidés.

Figure 6 : Morphologie d'une *Lynchia maura* adulte (adapté de Valkiūnas, 2005)



- *Ceratopogonidae* : vecteurs d'*Haemoproteus* et de *Leucocytozoon*

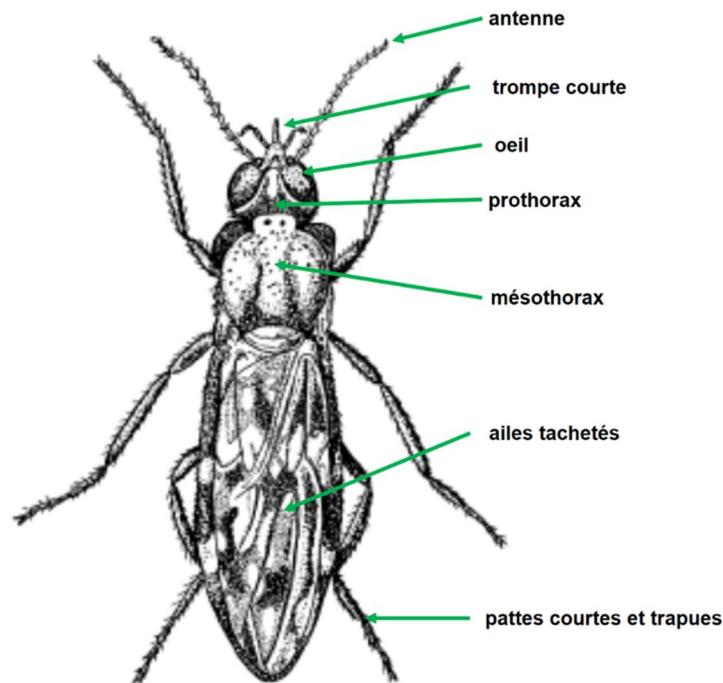
Les Cératopogonidés (figure 7) sont des diptères nématocères hématophages mesurant entre 1 et 3 mm de long. On distingue le genre *Culicoides* sp, important en terme de nombre d'espèces : 1250 dont 80 observées en France (Balenghien et Delecolle, 2009).

Les étapes de leur cycle sont les mêmes que pour tous les diptères nématocères (comme les Culicidae) : seules les femelles sont hématophages, elles se nourrissent par telmophagie en créant une petite poche sanguine dans le derme, dont elles aspirent ensuite le contenu.

Les Ceratopogonidae peuvent avoir une activité diurne ou nocturne en fonction de l'espèce. Si l'activité est diurne, elle est faible aux heures les plus chaudes. La plupart des Ceratopogonidae sont exophiles : elles ne pénètrent quasiment jamais dans les habitations.

La dispersion par vol actif des *Culicoides* adultes est considérée comme marginale : la distance parcourue serait inférieure à 500 m, même si dans certaines conditions les femelles pourraient parcourir plusieurs kilomètres. Ils peuvent aussi être dispersés passivement via des transports humains (avions, trains, etc) ou animaux (lors de migrations par exemple) (Balenghien et Delecolle, 2009).

Figure 7 : Morphologie d'un *Culicoides nubeculosus* adulte (adapté de Valkiūnas, 2005)



- *Culicidae* : vecteurs de Plasmodium

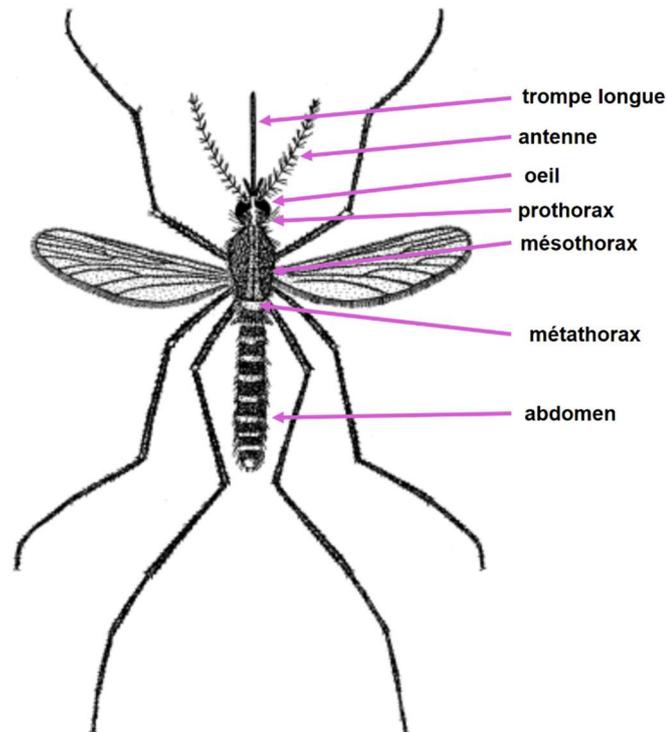
Les Culicidés (figure 8), aussi connus sous le nom générique de « moustiques », sont des diptères nématocères. Les genres *Culex*, *Aedes* et *Anopheles* appartiennent à cette famille. Ils y sont abondants et présents toute l'année dans les pays chauds, tandis qu'ils sont surtout présents en été et automne dans les pays plus tempérés. On distingue les espèces domestiques et endophiles (c'est-à-dire qui vivent dans les habitations humaines et animales) des espèces sauvages et exophiles (Bussiéras et Chermette, 1992).

La plupart des espèces ont une activité nocturne, même si des espèces diurnes ont été identifiées dans les régions très humides. Aussi, ils ont besoin d'eau pour accomplir leur cycle de vie : elle est nécessaire pour la ponte des œufs, qui se développeront en larves puis nymphes pour libérer un adulte (ou imago) entièrement développé.

Ce sont des espèces orthorrhaphes : seules les femelles se nourrissent de sang, de sucs végétaux et d'eau, et sont donc les seules à représenter un pouvoir pathogène chez les Culicidés. Après avoir choisi son hôte, elle se nourrit par solénophagie en introduisant directement ses stylets au sein d'un capillaire sanguin pour se nourrir de sang. Les mâles ne consomment que des sucs végétaux.

Les Culicidés sont capables de se disperser dans un rayon allant jusqu'à 30 km grâce à leur vol actif, variable selon les espèces : les Anophèles parcourent de grandes distances tandis qu'*Aedes aegypti* est plutôt sédentaire. Ils bénéficient aussi de la dispersion passive par les vents ou d'autres moyens de transport comme les avions.

Figure 8 : Morphologie d'un *Culex pipiens* adulte (adapté de Valkiūnas, 2005)



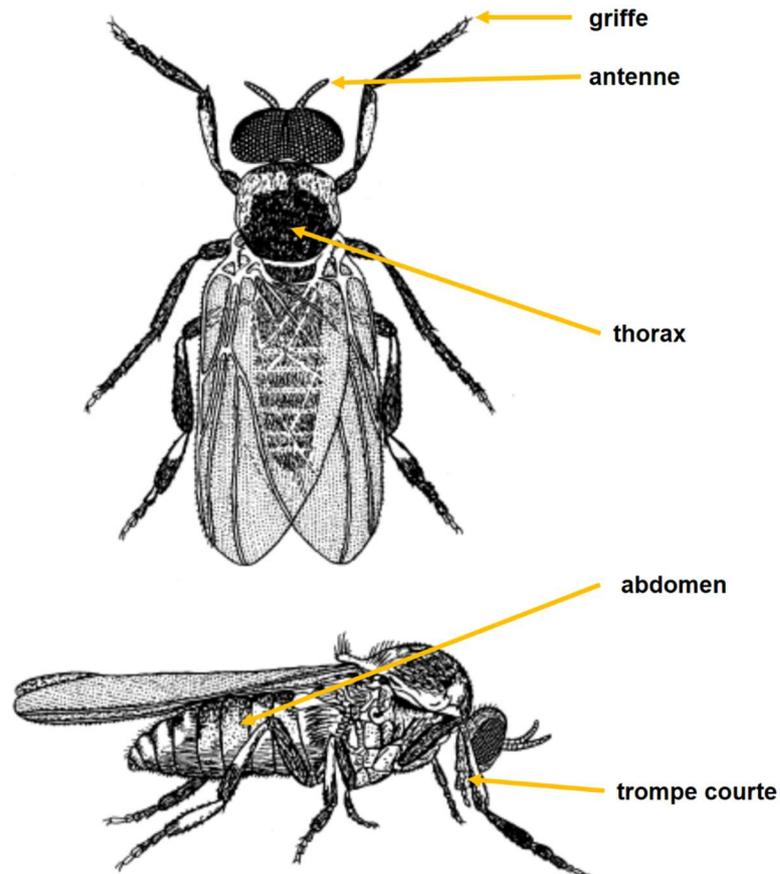
- *Simuliidae* : vecteurs de *Leucocytozoon*

Les Simuliidés (figure 9) sont des diptères nématocères, *Simulium* étant le genre principal. Les étapes du cycle de vie sont les mêmes que pour les autres diptères nématocères (cf Culicidae).

Les mâles et femelles non fécondées se nourrissent de sucs végétaux et sont sédentaires. En revanche, les femelles fécondées sont anautogènes, c'est-à-dire deviennent hématophages afin de subvenir au développement des œufs. Elles se nourrissent par telmophagie. Leur activité est diurne pendant les heures chaudes.

Les larves de Simuliidés auraient un rôle écologique important dans les cours d'eaux et dans la chaîne alimentaire : elles filtrent les particules organiques en suspension dans l'eau et les rendent disponibles pour de nombreux autres invertébrés se nourrissant de larves (comme les trichoptères). Cependant, certaines espèces (*S. reptans*, *S. vernum* ou *S. liriense*) tendent à disparaître en raison de la pollution des eaux qui tue les larves, si bien que ces espèces peuvent être considérées comme sentinelles car bons indicateurs de la santé écologique/pureté de l'eau et des paysages avoisinant (Ciadamidaro *et al.*, 2016).

Figure 9 : Morphologie d'un Simuliidé adulte (Valkiūnas, 2005)



f. *Hôtes vertébrés volatiles*

En tant que parasites hétéroxènes obligatoires, les hémospories ont besoin d'un hôte invertébré pour y réaliser leur reproduction sexuée (hôte définitif) et d'un hôte vertébré où ont lieu les phases de multiplication asexuée et de développement des formes sexuées (hôte intermédiaire). L'hôte invertébré est toujours un insecte de l'ordre des diptères, mais diffère en fonction du genre et de l'espèce du parasite, de même que les hôtes oiseaux.

- *Haemoproteus*

C'est le genre d'hémosporie retrouvée le plus communément chez les oiseaux (Atkinson et Van Riper, 1991). En tout, 130 espèces d'*Haemoproteus* ont été retrouvées chez 72 familles d'oiseaux (Peirce, 2005 ; Valkiūnas, 2005). Le record de nombre d'espèces différentes d'*Haemoproteus* identifiées au sein d'un même ordre est attribué aux Passériformes (57) (Bennett *et al.*, 1993).

A l'inverse, la plus faible exposition aux vecteurs des oiseaux marins du fait de leur habitat moins favorable pourrait être reliée à un taux d'infestation plus faible (Mendes *et al.*, 2005). Les différences d'infestation peuvent aussi être reliées au système immunitaire et à la résistance intrinsèque de l'hôte vertébré (Sol *et al.*, 2003).

Haemoproteus est aussi le genre d'hémosporie le plus communément retrouvé chez les rapaces : chez les Strigiformes, ce genre a été identifié dans de nombreuses régions du monde (Amérique du Nord, Asie, Sud de l'Afrique, Europe) (Giorgiadis, 2017). De même chez les Falconiformes :

plusieurs *Haemoproteus* ont été identifiés chez les genre *Falco*, *Accipiter*, *Buteo*, *Parabuteo*, *Aquila* et *Gyps* en Amérique du Nord et du Sud, Europe, Asie et Afrique (Remple, 2004). Parmi les rapaces, les espèces les plus communément retrouvées sont *H. buteonis* (principalement *Buteo buteo*), *H. catharti* (*Carthartes aura*), *H. elani* (principalement *Elanus caeruleus*), *H. janovyi* (principalement *Gyps africanus*) et *H. nisi* (principalement *Accipiter nisus*) (Harl *et al.*, 2022).

Le tableau 1 recense les espèces d'*Haemoproteus* connues infestant les rapaces et corvidés.

Une même lignée d'*Haemoproteus* serait capable de changer de famille d'hôtes : une étude réalisée en Iran sur la buse variable (*Buteo buteo*) a permis d'isoler une lignée d'*Haemoproteus* qui serait phylogénétiquement plus proche des lignées déjà retrouvées chez des Falconidés que celles connues chez les Accipitridés (Shokrani *et al.*, 2021). Une autre étude réalisée dans un centre de soins thaïlandais a identifié des lignées d'*Haemoproteus* qui n'avaient jusqu'alors pas été retrouvées chez les rapaces concernés (Pornpanom *et al.*, 2021).

Enfin, le degré d'urbanisme pourrait influencer l'infestation à *Haemoproteus* chez les oiseaux : une étude en Espagne a observé une association positive entre la diversité des lignées d'*Haemoproteus* et des oiseaux situés en zones rurales par rapport aux oiseaux habitant en zone urbaine (Jiménez-Peñuela *et al.*, 2021).

Tableau 1 : Bilan des espèces d'*Haemoproteus* retrouvées chez les rapaces et corvidés (synthèse d'après MalAvi 2022)

Espèces	Accipitriformes	Falconiformes	Strigiformes	Corvidés
<i>H. buteonis</i>	X			
<i>H. catharti</i>	X			
<i>H. elanis</i>	X			
<i>H. janovyi</i>	X			
<i>H. danilewsky</i>				X
<i>H. picae</i>				X
<i>H. syrnii</i>			X	
<i>H. homopicae</i>				X
<i>H. majoris</i>				X
<i>H. tinnunculi</i>		X		
<i>H. brachiatus</i>		X		
<i>H. noctuae</i>			X	

- *Leucocytozoon*

Le genre *Leucocytozoon* est retrouvé chez les oiseaux, domestiques comme sauvages. Les espèces infestantes ont été identifiées en grand nombre chez les Passériformes (8), chez les Galliformes (7) et chez les Coraciiformes (4). Trois autres espèces ont été identifiées chez les oiseaux des autres ordres. En revanche, aucune ne l'a été chez les oiseaux appartenant aux ordres des Tinamiformes (tinamous), Podicipédiformes (grèbes), Ptérocliformes (gangas, syrrhaptés) (Atkinson *et al.*, 2008).

Les infestations à *Leucocytozoon* touchent principalement les Anatidés (canards, oies et cygnes) et les Colombidés (pigeons et colombes) et moins communément les Accipitridés (buses, aigles, milans, etc) et les Falconidés (faucons). On admet aujourd'hui qu'une seule espèce affecte les Falconiformes : *L. toddi*. Mais de par sa grande variabilité de taille et morphologie, de nombreuses morpho-espèces différentes de *L. toddi* ont été identifiées (Valkiūnas *et al.*, 2010). Chez les Strigiformes aussi une seule espèce est reconnue : *L. danilewskyi* (Atkinson *et al.*, 2008), décrite pour la première fois chez le Petit duc d'Orient (*Otus sunia*) en Thaïlande (Lertwatcharasarakul *et al.*, 2021). Concernant les Accipitridés, *L. buteonis* a été détectée en Iran chez la buse variable (*Buteo buteo*), ainsi que *L. californicus* en Thaïlande chez l'Autour huppé (*Accipiter trivirgatus*) (Shokrani *et al.*, 2021 ; Lertwatcharasarakul *et al.*, 2021).

Les espèces *L. audieri* (*Haliaeetus vocifer*), *L. bacelari* (*Kaupifalco monogrammicus*), *L. beaurepairei* (*Sagittarius serpentarius*), *L. buteonis* (*Buteo jamaicensis* principalement), *L. circaetti* (*Circaetus gallicus*), *L. franchini* (*Circus macrourus*), *L. martyi* (*Accipiter badius sphenurus*), *L. mathisi* (*Accipiter nisus*), *L. muratovi* (*Circus aeruginosus*) sont les plus couramment observées chez les rapaces (Harl *et al.*, 2022). Le tableau 2 recense les espèces de *Leucocytozoon* connues infestant les rapaces et corvidés.

Au contraire d'*Haemoproteus*, la capacité infestante de *Leucocytozoon* chez les oiseaux pourrait être augmentée selon le degré d'urbanisme. Ainsi, il a été observé que la diversité génétique de *Leucocytozoon* chez des oiseaux en Espagne était positivement associée à un habitat urbain plutôt que rural (Jiménez-Peñuela *et al.*, 2021).

Tableau 2 : Bilan des espèces de *Leucocytozoon* retrouvées chez les rapaces et corvidés (synthèse d'après MalAvi 2022)

Espèces	Accipitriformes	Falconiformes	Strigiformes	Corvidés
<i>L. toddi</i>	X	X		
<i>L. danilewskyi</i>			X	
<i>L. buteonis</i>	X			
<i>L. californicus</i>	X			
<i>L. audieri</i>	X			
<i>L. bacelari</i>	X			
<i>L. beaurepairei</i>	X			
<i>L. circaetti</i>	X			
<i>L. franchini</i>	X			
<i>L. martyi</i>	X			
<i>L. mathisi</i>	X			
<i>L. muratovi</i>	X			
<i>L. berestneffi</i>				X
<i>L. sakharoffi</i>				X
<i>L. majoris</i>				X

- *Plasmodium*

Les infestations à *Plasmodium* sont décrites parmi tous les ordres aviaires sauf les Struthioniformes (autruches), les Coliiformes (colious) et les Trogoniformes (quetzals). Cependant, seulement la moitié des espèces d'oiseaux existantes ont été testées pour ce parasite (Atkinson *et al.*, 2008). Les Galliformes, Colombiformes et Passériformes abritent la plus grande diversité d'espèces infestantes.

Le genre *Plasmodium* est considéré comme ayant un large spectre d'infestation, avec notamment *P. relictum* pouvant infester naturellement 70 familles différentes d'oiseaux. A l'inverse, *P. kemp* peut infester en laboratoire des espèces de Galliformes et d'Ansériformes, mais son seul hôte naturel connu est le dindon sauvage (*Meleagris gallopavo*) (Atkinson *et al.*, 2008).

Chez les rapaces, les espèces les plus couramment observées sont *P. circumflexum*, *P. fallax* (*Strix woodfordii* mais également fréquent chez les Accipitriformes), *P. forresteri* (*Strix varia* mais aussi fréquent chez le genre *Buteo*), *P. accipiteris* (*Accipiter brevipes*), *P. alloelongatum* (*Accipiter brevipes*) et *P. buteonis* (*Buteo buteo*) (Harl *et al.*, 2022). Le tableau 3 recense les espèces de *Plasmodium* connues retrouvées chez les rapaces et corvidés.

La diversité génétique de *Plasmodium* n'est pas toujours aussi large que son spectre d'infestation : une étude du génome de *P. relictum* trouvé sur des oiseaux du Paléarctique occidental a relevé la présence d'un même allèle pour le gène MSP1 (merozoite surface protein 1) chez la quasi-totalité des oiseaux prélevés. Il se trouve que c'est l'allèle qui a été précédemment identifié comme le plus transmis en Europe. Cette faible diversité génétique pourrait s'expliquer par un balayage génétique par l'apparition d'une mutation bénéfique pour le parasite ou par une nouvelle introduction (Hellgren *et al.*, 2021).

Tableau 3 : Bilan des espèces de *Plasmodium* retrouvées chez les rapaces et corvidés (synthèse d'après MalAvi, 2022)

Espèces	Accipitriformes	Falconiformes	Strigiformes	Corvidés
<i>Plasmodium</i>				
<i>P. circumflexum</i>	X	X	X	X
<i>P. relictum</i>	X	X	X	X
<i>P. polare</i>		X	X	X
<i>P. elongatum</i>	X		X	X
<i>P. fallax</i>	X		X	X
<i>P. lophurae</i>	X			X
<i>P. vaughani</i>	X		X	X
<i>P. cathemerium</i>			X	X
<i>P. gundersi</i>			X	
<i>P. subpraecox</i>			X	
<i>P. gallinaceum</i>				X
<i>P. juxtannucleare</i>				X
<i>P. matutinum</i>			X	X
<i>P. paranucleophilum</i>	X	X	X	
<i>P. homonucleophilum</i>			X	
<i>P. collidatum</i>			X	

g. **Distribution géographique**

- ***Haemoproteus***

Le genre *Haemoproteus* est présent dans toutes les régions au climat tempéré ou tropical. Cette large distribution est très probablement liée aux vecteurs Ceratopogonidae et Hippoboscidae eux même occupant des biotopes variés (Atkinson et al., 2008).

132 espèces sont identifiées dans le monde (Valkiūnas, 2005). Ce sont les hémospories les plus communément retrouvées dans le sang des rapaces et décrites dans la plupart des régions du globe où l'on trouve le vecteur, même isolées (dont les îles hawaïennes de Laysan, Tern ou Galapagos) (Work et Rameyer, 1996 ; Padilla et al., 2004).

La plus grande diversité d'*Haemoproteus* est rapportée dans les régions holarctique, afrotropicale, saharo-arabe, sino-japonaise, malgache et orientale. Au contraire, seul un petit nombre d'espèces est décrit dans les régions néotropicale, panaméenne, australienne et océanie (Valkiūnas, 2005). Ce genre d'hémosporie est vraisemblablement absent de la toundra arctique certainement par absence de l'insecte vecteur compétent (Greiner et al., 1975 ; Bennett et al., 1992).

- *Leucocytozoon*

Une soixantaine d'espèces de *Leucocytozoon* infestant les oiseaux sont connues dans le monde dans les régions suivantes : holarctique, saharo-arabe, sino-japonaise, afrotropicale, malgache, orientale, australienne, océanie, néotropicale et panaméenne. Cette distribution est plus large que celle du genre *Haemoproteus* (Valkiūnas, 2005).

Leucocytozoon toddi, qui affecte les rapaces, est l'espèce ayant la plus large distribution géographique dans le monde : elle est absente seulement en région australienne et océanique (Valkiūnas, 2005).

La prévalence et la diversité des *Leucocytozoon* sont plus importantes dans les régions holarctique, saharo-arabe et sino-japonaise. Au contraire, leur diversité est plus faible en zone néotropicale et panaméenne (Atkinson *et al.*, 2008). La prévalence des *Leucocytozoon* semble suivre une distribution selon un gradient croissant sud-nord, qui peut être expliqué par l'augmentation des densités de populations d'oiseaux hôtes au nord, avec des cas de transmissions de *Leucocytozoon* en zone arctique. Cependant, les oiseaux de la zone holarctique ont été beaucoup plus étudiés que ceux des néotropiques, des zones panaméenne, australienne et océanique. Ces données doivent donc être interprétées prudemment.

- *Plasmodium*

Le genre *Plasmodium* est présent partout sauf en Antarctique où les culicidés sont absents.

Si *Plasmodium* semblent infester plus fréquemment des hôtes migrants, de nombreux nouveaux cas d'infestation avec la lignée SGS1 de *P. relictum* ont été rapportés en Amérique du Nord chez des oiseaux naïfs au parasite. L'hypothèse retenue à cette nouvelle introduction serait le mouvement d'oiseaux captifs ou étrangers infestés et la transmission du parasite via la présence d'un vecteur compétent, *Culex pipiens* (Theodosopoulos *et al.*, 2021).

En Europe, *Plasmodium* est bien implanté grâce au vecteur compétent et à une population d'hôtes réservoirs chez qui l'infestation cause peu de signes cliniques. Mais des cas mortels de malaria aviaire sont rapportés lorsque que le parasite est transmis à une espèce non indigène, par exemple en captivité en parc zoologique. Au zoo de Rotterdam (Pays-Bas), un pic de mortalité annuel est observé chaque été, coïncidant avec le pic de densité de *Culex pipiens*. Compte tenu de la situation actuelle, une épidémie de malaria aviaire est peu probable en Europe. En revanche, un changement climatique ou une modification génétique du parasite (mutations) pourraient remettre cette affirmation en question (Huijben *et al.*, 2009).

2. Rapaces et corvidés

L'étude s'est centrée sur ces espèces car leur situation épidémiologique vis-à-vis des hémospories est insuffisamment connue en France.

Le terme rapace désigne un oiseau au bec crochu et tranchant et possédant des serres. On distingue les rapaces diurnes des rapaces nocturnes (Museum national d'Histoire naturelle, 2022a).

Les rapaces diurnes sont représentés par deux ordres : les Falconiformes et les Accipitriformes. Les Falconiformes sont composés d'une unique famille : les Falconidés. Les Accipitriformes se déclinent en 4 familles (Cathartidae, Pandionidae, Accipitridae, Sagittaridae). Au total, 24 espèces sont présentes en France (LPO, 2022). Les rapaces nocturnes sont représentés par un seul ordre : les Strigiformes, composé de 2 familles : les Tytonidae et les Strigidae. Les rapaces diurnes se caractérisent par une acuité visuelle aussi qu'un odorat bien développé. Les rapaces nocturnes ont un plumage duveteux adapté à un vol très silencieux. Leur vision est binoculaire avec des yeux orientés vers l'avant. Leur cou est très mobile et leur permet d'avoir un champ de vision très large (270°) en tournant la tête (Museum national d'Histoire naturelle, 2022a).

Beaucoup de ces espèces ont un régime alimentaire varié composé majoritairement de micro-mammifères. D'autres ont un régime plus spécialisé comme des insectes (Bondrée apivore), des reptiles (Circaète Jean-le-Blanc), des oiseaux (Faucon pèlerin), des poissons (Balbuzard pêcheur), ou encore des cadavres en décomposition (vautours) (LPO, 2022).

- *Falconiformes*

Les Falconiformes se distinguent des Accipitriformes par leurs serres de taille égale et leur bec possédant une encoche formant une dent (Museum national d'Histoire naturelle, 2022b). Différentes espèces d'oiseaux appartenant à l'ordre des Falconiformes et à la famille des Falconidés sont retrouvées en France métropolitaine.

- Faucon crécerelle (*Falco tinnunculus*)

Cette espèce, illustrée en figure 10, est présente dans toute la France. Le faucon crécerelle est le plus répandu et le plus abondant des rapaces diurnes après la buse variable. Sa distribution géographique est plus concentrée dans l'Ouest (Poitou Charente, Pays de la Loire, Normandie), mais il est aussi présent en Rhône-Alpes, Languedoc Roussillon et Midi-Pyrénées, et à un moindre degré dans l'Est. La grande majorité de la population française est nicheuse, tandis qu'une autre partie est migratrice (hiverné chez nous ou est de passage lors d'une migration). En Île-de-France, on le retrouve au sein de la capitale ou à sa périphérie nord. Il vit préférentiellement en milieu ouvert ou semi ouvert (bord de mer, campagne, ou même grande ville comme Paris, lisière de forêt). Il ne construit pas de nids, mais préfère utiliser des anciens nids de corvidés ou des cavités. La majorité du régime alimentaire du faucon crécerelle est composée de petits mammifères (campagnols) (« LPO Île-de-France, le Faucon crécerelle », 2022).

Figure 10 : Faucon crécerelle (© Marlis Börger)



□ Faucon hobereau (*Falco subbuteo*)

Le faucon hobereau (illustré en figure 11) est un grand migrateur, présent un peu partout en France, mais en moindre densité dans la majeure partie de l'Île-de-France, Bretagne et la Haute montagne. On le retrouve en région francilienne de la mi-avril à la mi-octobre et dans l'ensemble de la région. Il habite préférentiellement des zones ouvertes ou semi ouvertes à proximité de points d'eau et chasse parfois en milieu urbain. Il niche dans d'anciens nids de corvidés, préférentiellement dans un arbre dominant en lisière de zone boisée, à proximité d'un espace découvert. Son régime alimentaire est majoritairement composé de petits oiseaux et d'insectes (libellules et grand coleoptères) à parts égales. Sa dépendance vis-à-vis des insectes fait de cette espèce un témoin de la bonne santé des milieux (« LPO Île-de-France, le Faucon hobereau », 2022 ; LPO et Observatoire des rapaces, 2022a).

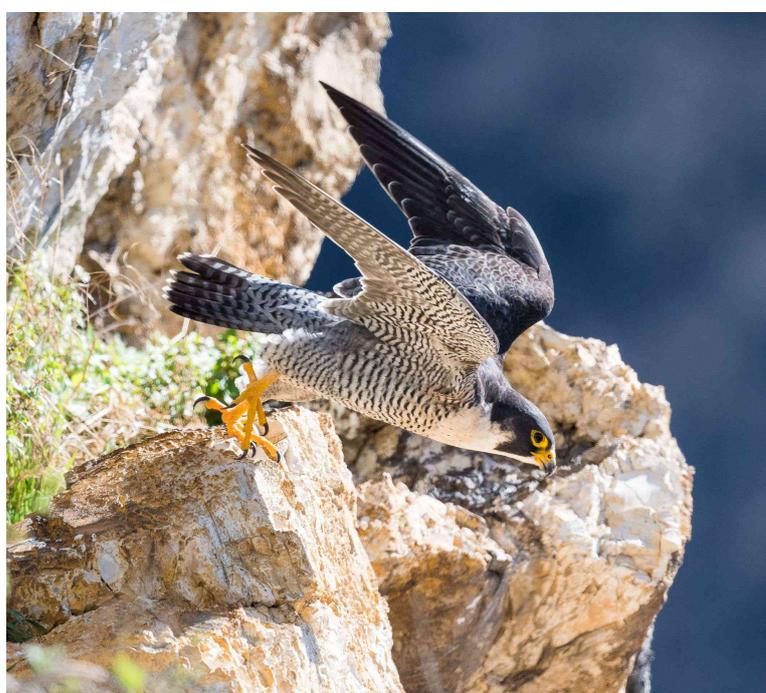
Figure 11 : Faucon hobereau (© Theo Locher)



□ Faucon pèlerin (*Falco peregrinus*)

En France, le faucon pèlerin (figure 12) est présent plus particulièrement sur une diagonale reliant les Ardennes au Pays Basque, mais aussi dans les zones montagneuses (Pyrénées, Alpes et Massif Central) et des nichées ont été observées récemment sur le littoral normand et breton. Cette espèce niche dans des sites rupestres ou potentiellement des constructions humaines. Le faucon pèlerin ne construit pas de nid, il niche à même le sol. Il chasse quasi exclusivement des oiseaux en vol, à l'affut. Son régime alimentaire est composé majoritairement d'oiseaux de tailles petite à moyenne, mais il est capable de chasser des oiseaux du gabarit du héron cendré (*Ardea cinerea*). Il a besoin de grands espaces pour chasser. Il est possible de le retrouver dans les villes où l'avifaune, et notamment le pigeon biset (*Columba livia*), est abondante. Quelques cas d'installation récente ont été notés en Île-de-France, dont Ivry-sur-Seine, Les Lilas et Beaugrenelle. (LPO et Observatoire des rapaces, 2022b)

Figure 12 : Faucon pèlerin (© Patrick Sabonnadière)



- *Accipitriformes*

Les Accipitriformes se distinguent des Falconiformes par leurs serres de taille inégale, ainsi que par l'absence d'encoche au niveau de leur bec. Plusieurs espèces sont retrouvées en France métropolitaine.

- Autour des palombes (*Accipiter gentilis*)

On retrouve en France la sous-espèce *Accipiter gentilis gentilis* qui est sédentaire. Cette espèce vit principalement en forêt. Son nid est souvent placé à la base de la cime d'un arbre, entre 8 et 20 m de haut, et souvent dans des arbres à feuillage persistant, comme les conifères, qui offre une meilleure protection que les arbres à feuilles caduques. Son régime alimentaire est composé à 90 % d'oiseaux. Sa puissance lui permet de prédater des oiseaux jusqu'au gabarit de la buse variable, faisant de lui un superprédateur. L'autour des palombes (figure 13) est présent partout en France, mais préférentiellement dans les zones boisées. En Île-de-France, deux aires d'autour des palombes ont été observées en forêt de Fontainebleau (LPO et Observatoire des rapaces, 2022c).

Figure 13 : Autour des palombes (© Theo Locher)



- Bondrée apivore (*Pernis apivorus*)

Cette espèce, illustrée en figure 14, est présente partout en France sauf sur le pourtour méditerranéen et en Corse. Elle est aussi plus rare sur le littoral. C'est une espèce migratrice qui passe l'hiver dans les forêts tropicales. Elle habite des zones alternées entre bois et prairies et chasse en zone semi ouverte à ouverte. Son nid se trouve dans des grands arbres au-delà de 9 m, et cette espèce utilise souvent d'anciens nids ou aires de rapaces et corvidés. Son régime alimentaire est assez spécialisé : il est insectivore et cible plus particulièrement les hyménoptères. Malgré son nom, la bondrée apivore s'en prend rarement aux abeilles (LPO et Observatoire des rapaces, 2022d).

Figure 14 : Bondrée apivore (© Theo Locher)



□ Buse variable (*Buteo buteo*)

La sous-espèce *Buteo buteo buteo*, migratrice partielle, niche en France continentale. La sous-espèce *B. b. vulpinus* (Buse de Russie) est quant à elle observée occasionnellement en migration : elle passe l'hiver en Afrique tropicale (Afrique de l'Est et du Sud) et au Moyen-Orient (Turquie, Iran). La buse variable (figure 15) a besoin de zones dégagées (champs, plaines) pour chasser, mais préfère nicher dans des bosquets et de petits massifs boisés. Elle construit son nid à une hauteur pouvant varier de 6 à 27 m. Son régime alimentaire est composé essentiellement de petits mammifères (petits rongeurs type campagnols en particulier) qu'elle chasse en plaine à l'affut. Cette espèce est présente un peu partout en France mais pas uniformément : en plus forte densité dans l'Est (Franche-Comté, Nord des Alpes), et dans les bocages du Limousin ; et en plus faible densité dans les régions de grande culture du bassin parisien (Champagne, Beauce), Île de France, Nord, pourtour méditerranéen, et Sud des Alpes (LPO et Observatoire des rapaces, 2022e).

Figure 15 : Buse variable (© Günther Klemens)



□ Épervier d'Europe (*Accipiter nisus*)

On retrouve partout en France la sous-espèce *Accipiter nisus nisus*. Majoritairement sédentaire, les hivers rigoureux peuvent motiver les individus à migrer plus au sud. La France accueille aussi en hiver les populations d'éperviers migratrices venant d'Europe du nord. En Île-de-France, il est présent toute l'année et majoritairement retrouvé dans les zones boisées (forêts de Fontainebleau et Rambouillet en particulier). L'épervier d'Europe (figure 16) peut vivre dans des milieux très variés : zones boisées, campagne voire milieu urbain. Son régime alimentaire est composé majoritairement de petits oiseaux (moineau domestique (*Passer domesticus*), grive musicienne (*Turdus philomenos*), etc). Il construit son nid en zone boisée au sommet d'un arbre (« LPO Île-de-France, l'Épervier d'Europe », 2022 ; LPO et Observatoire des rapaces, 2022f).

Figure 16 : Épervier d'Europe (© Theo Locher)



• *Strigiformes*

Plusieurs espèces de rapaces nocturnes sont présentes en France. Les espèces décrites ici sont les plus couramment rencontrées.

□ Chouette hulotte (*Strix aluco*)

La chouette hulotte, illustrée en figure 17, est le rapace nocturne le plus répandu et abondant en France. C'est une espèce sédentaire. En Île-de-France, elle est très abondante en grande couronne, dans les jardins de Paris intra muros, les bois de Vincennes et de Boulogne. Absente des zones montagneuses, on la trouve plutôt en forêt, mais elle s'adapte à beaucoup de milieux différents, dont la ville (présente à Paris). Elle niche dans une cavité dans un arbre. Son régime alimentaire est composé majoritairement de petits mammifères (mulots, campagnols), parfois des passereaux (« LPO Île-de-France, la Chouette hulotte », 2022 ; LPO et Observatoire des rapaces, 2022g).

Figure 17 : Chouette hulotte (© Jürgen)



□ Effraie des clochers (*Tyto alba*)

La chouette effraie (figure 18) est répartie un peu partout en France, sauf dans le Massif central, les Pyrénées et au delà de 1500 m d'altitude dans les Alpes. Elle est peu commune en Île-de-France. C'est une espèce non migratrice. Elle habite majoritairement des milieux ouverts et bocages, et évite les zones forestières ou d'agriculture intensive. Cette espèce niche souvent au voisinage de l'homme, dans un lieu obscur (bâtiment ancien, arbre creux). Son régime alimentaire est majoritairement composé de petits mammifères (mulot, campagnols) mais la chouette effraie est également opportuniste (« LPO Île-de-France, la Chouette effraie », 2022 ; LPO et Observatoire des rapaces, 2022h).

Figure 18 : Effraie des clochers (© Peter Hammond)



□ Chevêche d'Athéna (*Athene noctua*)

Espèce sédentaire, la chevêche d'Athéna (figure 19) est présente un peu partout en France mais évite les zones fortement boisées ou la haute montagne. En Île-de-France, on la retrouve dans les zones rurales de la grande couronne, mais aussi en Seine-Saint-Denis. Son nid se trouve dans une cavité (arbre ou bâtiment). Son régime alimentaire est varié : petits mammifères, amphibiens, reptiles, oiseaux, insectes (« LPO Île-de-France, la Chevêche d'Athéna », 2022 ; LPO et Observatoire des rapaces, 2022i).

Figure 19 : Chevêche d'Athéna (© Jürgen)



□ Hibou moyen duc (*Asio otus*)

Le hibou moyen duc, illustré en figure 20, est une espèce migratrice. Il se reproduit sur l'ensemble du territoire français sauf en Bretagne et dans le sud-ouest. En hiver, beaucoup d'individus originaires d'Europe du nord et de l'est viennent hiverner en France. Il habite en zone rurale semi ouverte type bocage ou petit bois, et niche dans d'anciens nids de pie bavarde ou corneille noire, préférentiellement entre 6 et 10 m de haut dans un conifère. Son régime alimentaire est majoritairement composé de petits mammifères, occasionnellement des oiseaux ou des insectes (« LPO Île-de-France, le Hibou moyen-duc », 2022 ; LPO et Observatoire des rapaces, 2022j).

Figure 20 : Hibou moyen-duc (© Marlis Börger)



b. Classification et zoologie des corvidés

Les corvidés appartiennent à l'ordre des Passeriformes et se déclinent en 25 genres : *Aphelocoma*, *Calocotta*, *Cissa*, *Coloeus*, *Corvus*, *Crypsirina*, *Cyanocitta*, *Cyanocorax*, *Cyanocyca*, *Cyanopica*, *Dendrocitta*, *Garrulus*, *Gymnorhinus*, *Nucifraga*, *Perisoreus*, *Pica*, *Platylophus*, *Platysmurus*, *Podoces*, *Psilorhinus*, *Ptilostomus*, *Pyrrhocorax*, *Temnurus*, *Urocissa* et *Zavattariornis* (IOC World Bird List, s. d.).

Parmi les espèces fréquemment rencontrées en France, on retrouve le choucas de tours (*Coloeus monedula*), illustré en figure 21. Il est présent partout en France sauf dans l'extrême sud-ouest. En Île-de-France, il est présent dans toute la région mais moins intensément dans Paris intra muros et à sa périphérie nord ouest. Son régime alimentaire est omnivore opportuniste. Grégaire, il s'associe volontiers avec d'autres espèces pour surveiller les nichées de prédateurs commun (Autour des palombes) (« LPO Île-de-France, le choucas des tours », 2022).

Figure 21 : Choucas des tours (© Andreev Dmitrij)



La corneille noire (*Corvus corone*), illustrée en figure 22, est présente partout en France en zones ouvertes et semi ouvertes, ainsi qu'en zone urbaine. En Île-de-France, elle est observée dans toute la région. Elle niche au sommet des arbres et son régime alimentaire est omnivore à dominante végétale (« LPO Île-de-France, corneille noire et corbeau freux », 2022).

Figure 22 : Corneille noire (© Günther Klemens)



Le corbeau freux (*Corvus frugilegus*), illustré en figure 23 est présent un peu partout en France au nord de la ligne Bordeaux-Grenoble, sauf en Bretagne et dans les zones montagneuses. En Île-de-France, il est surtout retrouvé dans les zones rurales de la grande couronne, même si deux colonies ont été observées dans la petite couronne. Tout comme la corneille noire, il niche au sommet des arbres (« LPO Île-de-France, corneille noire et corbeau freux », 2022).

Figure 23 : Corbeau freux (© Andreev Dmitrij)



Le geai des chênes (*Garrulus glandarius*), illustré en figure 24, vit principalement en zone forestière, mais s'adapte aux milieux urbains (parcs et jardins). Son régime alimentaire est omnivore à dominante végétale. Il niche dans des arbres, à une hauteur allant de 2 à 5m (« LPO Île-de-France, le geai des chênes », 2022).

Figure 24 : Geai des chênes (© Günther Klemens)



La pie bavarde (*Pica pica*), illustrée en figure 25, est une espèce qui peut avoir des milieux de vies variés : zones rurales (plaines, bosquets, champs, etc) urbaines et péri urbaines. Elle niche au sommet d'un arbre, souvent un peuplier. Son régime alimentaire est omnivore, composé à 60 % d'insectes, petites mammifères, et petits passereaux (« LPO Île-de-France, la Pie bavarde », 2022)

Figure 25 : Pie bavarde (© Theo Locher)



c. Population de rapaces et corvidés en île-de-France

• *Population de rapaces et corvidés francilienne sauvage*

La région Île-de-France offre dans sa globalité des milieux assez variés pour les populations d'oiseaux : milieux très urbain à rural, zones boisées, plaines, etc (Tableau 4). Si beaucoup d'espèces de rapaces semblent craindre la présence de l'homme et habitent préférentiellement en zone rurale, d'autres nichent depuis longtemps jusque dans Paris intra muros, comme le faucon crécerelle qui y est observé depuis 1840 (« LPO Île-de-France, le faucon crécerelle », 2022).

Les espèces précédemment citées sont les plus couramment observées en Île-de-France aujourd'hui. Néanmoins l'observation d'oiseaux plus rares est également rapportée :

Le busard Saint-Martin (*Circus cyaneus*) est un nicheur rare (une cinquantaine de couples) présent toute l'année dans les territoires ouverts en zone rurale d'Île-de-France (« LPO Île-de-France, le Busard Saint-Martin », 2022).

L'élanion blanc (*Elanus caeruleus*) a été observé en 2020 en Île-de-France, 3 individus en migration en Seine-et-Marne (77) et un individu hivernant à Omerville dans le Val d'Oise (95) (LPO *et al.*, 2021).

L'année 2020 a aussi été remarquable pour l'observation de l'aigle botté (*Hieraaetus pennatus*) en Île-de-France, avec 11 individus observés dont 1 en hivernage, principalement en Seine-et-Marne (77) mais aussi aux étangs de Saclay (91) et à Fontenay-le-Vicomte (91) (LPO *et al.*, 2021).

Tableau 4 : Populations de rapaces et corvidés franciliennes (LPO et Lessaïre, 2016 ; LPO et Malher, 2017a ; LPO et Malher, 2017b ; LPO et Malher, 2018 ; « LPO Île-de-France », 2022)

Espèces	Population francilienne	Répartition
Accipitriformes		
Buse variable (<i>Buteo buteo</i>)	600-900 couples	Val d'Oise (95), Seine-et-marne (77), Yvelines (78)
Epervier d'Europe (<i>Accipiter nisus</i>)	400 à 600 couples dont 15 dans Paris intra muros	Forêt de Fontainebleau, forêt de Rambouillet, Paris (Parc Montsouris, BNF, Buttes-Chaumont, Père-Lachaise, ENS Ulm)
Bondrée apivore (<i>Pernis apivorus</i>)	Maximum 200 couples	Val d'Oise (95), Yvelines (78) et Seine-et-marne (77)
Milan noir (<i>Milvus migrans</i>)	20-25 couples	Principalement en Seine-et-marne (77), près de zones humides, le long de la Seine et autres rivières sinon
Autour des palombes (<i>Accipiter gentilis</i>)	3 couples	Forêt de Fontainebleau, en Bassée (77), Moisson (78)
Falconiformes		
Faucon crécerelle (<i>Falco tinnunculus</i>)	2700 couples dont 15 dans Paris intra muros	Notre-Dame, Sacré Cœur, Tour Saint-Jacques et autres bâtiments
Faucon hobereau (<i>Falco subbuteo</i>)	220 -360 couples	Secteurs ruraux principalement, zones ouvertes et semi-ouvertes, cimetière de Bagneux (92)
Faucon pèlerin (<i>Falco peregrinus</i>)	6 couples	Ivry-sur-Seine, Les Lilas, Beaugrenelle
Strigiformes		
Chouette hulotte (<i>Strix aluco</i>)	1500 couples	Principalement en grande couronne, quelques couples dans le jardin des plantes (Ve), Bois de Boulogne et de Vincennes, Cimetière du Père-Lachaise (75), plus rarement en Seine-Saint-Denis (93) et Hauts-de-Seine (92)
Effraie des clochers (<i>Tyto alba</i>)	49 couples en Île-de-France en 2011, en déclin	Peu observée en Île-de-France probablement par manque de sites de nidification potentiel
Hibou moyen-duc (<i>Asio otus</i>)	95 couples	Bois de conifères, principalement Seine-et-marne (77) et Yvelines (78), Montreuil (93)
Chevêche d'Athéna (<i>Athene noctua</i>)	470-750 couples	Secteurs ruraux de la grande couronne, Seine-Saint-Denis
Hibou des marais (<i>Asio flammeus</i>)	34 en 2011, quasi absent depuis	Ablis (78), Aéroport de Melun-Villaroche (77)
Corvidés		
Corneille noire (<i>Corvus corone</i>)	50 000 – 100 000 couples	Partout en Île-de-France
Pie bavarde (<i>Pica pica</i>)	35 000 couples dont 250-300 dans Paris intra muros	Partout en Île-de-France, très observée dans les Hauts-de-Seine (92) et le Val-de-marne (94)
Geai des chênes (<i>Garrulus glandarius</i>)	30 000 – 50 000 couples	Dans toute l'Île-de-France en forêt, parcs, jardins
Corbeau freux (<i>Corvus frugilegus</i>)	3500 -5000 couples	Principalement en grande couronne, 2 colonies en petite couronne, absent de Paris intra muros
Choucas des tours (<i>Coloeus monedula</i>)	5000-10 000 couples	Partout en Île-de-France

Trois busards pâles (*Circus macrourus*) ont aussi été observés en migration en Seine-et-Marne (77), à Rambouillet (78) et à Montreuil (93). Le passage de cette espèce n'est pas exceptionnel en migration, et le comptage des individus en 2020 a probablement été sous-estimé par le confinement (LPO *et al.*, 2021).

La présence d'un petit duc scops (*Otus scops*) est aussi notée depuis 2019 en Seine-et-Marne (77).

L'observation du faucon kobez (*Falco vespertinus*) en migration est aussi possible en Île-de-France : 3 individus ont été observés à en Seine-et-Marne (77) et Vaucresson (92) (LPO *et al.*, 2021).

Enfin, le grand corbeau (*Corvus corax*) a été observé pour la deuxième fois en Île-de-France dans le sud des Yvelines (78) à l'automne 2020 (LPO *et al.*, 2021).

- *Populations de rapaces et corvidés au Chuv-FS de l'EnvA*

Localisé sur le site de l'EnvA, à Maisons-Alfort, le Chuv-FS est le centre de soins le plus proche de Paris intra muros.

Les espèces précédemment décrites sont aussi celles reçues sur les 5 dernières années au Chuv-FS de l'EnvA, situé en Île-de-France (tableau 5). Les corvidés sont représentés en grand nombre au sein du centre, en rapport avec la localisation du Chuv-FS en milieu urbain d'une part et avec l'abondance globale de corvidés en France. On peut aussi noter l'accueil très occasionnel d'espèces de rapaces inhabituelles ou rares dans cette région comme le Pygargue à tête blanche (provenant d'une fauconnerie), l'Aigle botté ou le Milan noir.

Tableau 5 : Nombre d'individus reçus au Chuv-FS par espèce de rapaces et corvidés depuis 2017 (communication personnelle Chuv-FS EnvA)

Espèces	2017	2018	2019	2020	2021
Accipitriformes					
Buse variable (<i>Buteo buteo</i>)	24	13	24	21	27
Epervier d'Europe (<i>Accipiter nisus</i>)	17	13	13	13	13
Bondrée apivore (<i>Pernis apivorus</i>)	5	3	4	3	4
Milan noir (<i>Milvus migrans</i>)	1				
Aigle botté (<i>Hieraaetus pennatus</i>)		1			
Pygargue à tête blanche (<i>Haliaeetus leucocephalus</i>)	1				
Falconiformes					
Faucon crécerelle (<i>Falco tinnunculus</i>)	39	18	36	37	53
Faucon hobereau (<i>Falco subbuteo</i>)			2	2	5
Faucon pèlerin (<i>Falco peregrinus</i>)	4	4	1		3
Strigiformes					
Chouette hulotte (<i>Strix aluco</i>)	22	33	34	18	24
Effraie des clochers (<i>Tyto alba</i>)	9	3	8	9	13
Hibou moyen-duc (<i>Asio otus</i>)	2	3	5	3	4
Chevêche d'Athéna (<i>Athene noctua</i>)	2	1	4		2
Hibou des marais (<i>Asio flammeus</i>)				1	1
Corvidés					
Corneille noire (<i>Corvus corone</i>)	189	176	202	117	271
Pie bavarde (<i>Pica pica</i>)	182	179	219	114	255
Geai des chênes (<i>Garrulus glandarius</i>)	43	53	47	28	45
Corbeau freux (<i>Corvus frugilegus</i>)	1	1	1	1	4
Choucas des tours (<i>Coloeus monedula</i>)			3		2

3. Importance des hémosporeidies chez les rapaces et corvidés

A. Épidémiologie des hémosporeidies aviaires

L'importance épidémiologique des hémosporeidies est variable au sein des populations d'oiseaux sauvages comme captives. La prévalence est influencée par la présence d'hôtes vecteurs compétents et d'hôtes volatiles sensibles au parasite, mais aussi par d'autres facteurs environnementaux. Le degré d'urbanisation où vivent les hôtes volatiles pourrait influencer la prévalence et la diversité génétique de certaines hémosporeidies (Jiménez-Peñuela *et al.*, 2021). La température du milieu influencerait la transmission du parasite en jouant un rôle dans son cycle de développement au sein du vecteur. Enfin, des différences de prévalence et de diversité génétique d'hémosporeidies ont été observées entre espèces migratrices et sédentaires ou entre rapaces diurnes et nocturnes (de Angeli Dutra *et al.*, 2021 ; Pornpanom *et al.*, 2021).

Chez des oiseaux naïfs au parasite, l'infestation par des lignées pathogènes d'hémosporeidies pourrait engendrer des signes cliniques, voire affecter leur mortalité, comme cause principale ou comorbidité (Himmel *et al.*, 2021). La survenue d'une épidémiologie telle que celle causée par *P. relictum* sur les îles d'Hawaï avec ses conséquences dramatiques est toutefois peu probable dans les régions où les hémosporeidies sont déjà présentes historiquement de manière stable, mais un changement climatique ou un événement mutationnel au sein du parasite pourrait remettre cette affirmation en question (Huijben *et al.*, 2009).

a. Épidémiologie d'*Haemoproteus*

Le taux de prévalence chez les oiseaux varie dans les différentes régions et en fonction de certains facteurs.

Des différences de prévalence ont été remarquées entre rapaces diurnes et nocturnes : une étude dans un centre de soins thaïlandais a relevé une prévalence bien plus basse chez des rapaces diurnes concernant *Haemoproteus* que le taux de prévalence précédemment observé chez des rapaces nocturnes au cours d'une étude similaire. Une hypothèse soulevée pour expliquer cette différence serait de relier la prévalence aux périodes d'activité des vecteurs (Pornpanom *et al.*, 2021).

La même étude souligne le potentiel d'infestation inter-spécifique d'*Haemoproteus* si son vecteur est présent, puisque les lignées d'*Haemoproteus* retrouvées infestaient des rapaces diurnes et nocturnes (Pornpanom *et al.*, 2021).

Des variations de taux de prévalence d'hémosporeidies pourraient être reliées à des traits portant sur la reproduction. L'attention portée au nid est un des facteurs prédictifs du taux d'infestation. Chez les espèces d'oiseaux où la femelle ou le couple s'occupe du nid, le taux de prévalence est entre 8 à 12 fois plus important que chez les espèces qui ne s'occupent pas de leur nid. D'où l'hypothèse supportant l'idée que l'investissement parental serait un coût évolutif qui augmenterait le risque d'infestation par des parasites vectorisés. Des corrélations entre le taux de prévalence et le type de nid, sa hauteur et sa structure ont aussi été montrées. La structure du nid semble influencer l'infection à *Haemoproteus* et *Leucocytozoon*. *Haemoproteus* serait associé à la construction de nids

ouverts tandis que *Leucocytozoon* serait associé à la construction de nids au sol (Ganser *et al.*, 2020).

b. Epidémiologie de *Leucocytozoon*

Chez l'autour des palombes (*Accipiter gentilis*), une prévalence de *Leucocytozoon toddi* plus élevée a été observée chez les adultes que chez les juvéniles sur une population présente en République tchèque. Dans cette même étude, des lignées non spécifiques d'hôtes ont été retrouvées sporadiquement, tandis que 3 lignées spécifiques de l'autour des palombes représentaient la majorité des cas d'infestations identifiés par méthode moléculaire. Chez les rapaces diurnes, les infestations auraient plus tendance à être hôtes spécifiques avec *L. buteonis* plutôt retrouvée chez le genre *Buteo* et *L. mathisi* chez les faucons (Hanel *et al.*, 2016).

Chez la buse variable (*Buteo buteo*) et l'épervier d'Europe (*Accipiter nisus*), une étude sur une population nichant en République tchèque a montré que les coinfections par des parasites serait plus fréquentes par ceux utilisant un vecteur commun que par ceux utilisant des vecteurs différents, même s'ils sont plus proches génétiquement : les cas de coinfections entre *Leucocytozoon* et *Trypanosoma* étaient plus fréquents que ceux impliquant à la fois *Leucocytozoon* et *Haemoproteus*. Dans cette même étude, les rapaces juvéniles de la même nichée tendaient à avoir le même statut et le même type d'infestation. Le taux de prévalence augmentait avec l'âge des juvéniles, et la taille de la nichée aurait un faible effet sur ce taux (négatif à l'échelle individuelle, positif à l'échelle du groupe) (Svobodová *et al.*, 2015).

Une autre étude montre aussi une certaine spécialisation parasite-hôte de *Leucocytozoon* chez les rapaces diurnes. En effet, des analyses phylogénétiques par analyses de cytochrome b montrent une association assez spécifique entre des haplotypes de *Leucocytozoon* et l'espèce de rapaces : ceux retrouvés chez *Buteo* spp ne le sont pas chez *Accipiter* spp, et divergent de 11% (Sehgal *et al.*, 2006).

De la même manière que pour *Haemoproteus*, le degré d'urbanisme semble influencer la diversité génétique et la prévalence de *Leucocytozoon* : dans une étude portant sur les moineaux domestiques en Espagne, un habitat urbain était positivement associé à une prévalence et une diversité génétique plus grande du parasite (Jiménez-Peñuela *et al.*, 2021).

c. Epidémiologie de *Plasmodium*

L'infestation à *Plasmodium* est commune chez les populations d'oiseaux en Europe, et semble causer peu de dégâts chez les espèces indigènes. Néanmoins, des cas de décès d'oiseaux non-indigènes associés à la malaria aviaire sont fréquemment rapportés. Dans les conditions actuelles, une épidémie de malaria aviaire comme l'ont subi les îles d'Hawaii est peu probable, mais un changement climatique ou une modification génétique du parasite (mutation) pourrait nuancer ce fait (Huijben *et al.*, 2009).

Une étude récente sur des Accipitriformes en Autriche et Bosnie-Herzégovine a observé que la plupart des lignées de *Plasmodium* identifiées par analyse moléculaire sont aussi retrouvées chez des oiseaux d'autres ordres, ce qui pourrait indiquer une transmission interspécifique par exemple en centre de soins ou en zoo, si le vecteur est présent (Harl *et al.*, 2022).

La température serait un facteur influençant la sporogonie du parasite chez son vecteur. On sait que *Plasmodium relictum* se transmet principalement dans les régions tropicales et cause des dégâts majeurs sur des populations d'oiseaux naïves au parasite, mais ce parasite est aussi transmis dans des régions tempérées, par exemple au nord de l'Europe en utilisant le vecteur *Culex pipiens*. Une étude portant sur la transmission de *P. relictum* chez *Culex pipiens* a montré, sous différentes conditions de température, que la sporogonie se réalisait dans tous les cas testés mais que des températures fraîches peuvent la retarder. Ceci pourrait retarder le développement du parasite au sein de son vecteur et donc limiter la transmission active : si l'hôte volatile potentiel est une espèce migratrice, la transmission se limiterait par un écart dans le temps entre la présence de parasites au stade infestant et la présence de l'hôte potentiel (Platonova et Palinauskas, 2021).

B. Pouvoir pathogène et signes cliniques

a. Pouvoir pathogène

- *Haemoproteus*

Les mérontes seraient à l'origine de la plupart des signes cliniques et lésions observés chez les oiseaux infestés par *Haemoproteus* (Garvin *et al.*, 2003) (Atkinson *et al.*, 2008). Chez les rapaces, l'infestation semble contrôlée par le système immunitaire et le parasite ne se multiplierait qu'en cas d'immunosuppression par stress intense ou autre pathologie. La parasitémie à *Haemoproteus* serait donc un indicateur de conditions de vie stressantes ou marqueur de l'état de santé (indicateur d'un état pathologique avéré ou maladie sévère) (Quillfeldt *et al.*, 2010 ; Remple, 2004).

Dans une étude (Ahmed et Mohammed, 1978), il a été observé qu'une primo-infestation d'*Haemoproteus* chez des pigeons bisets (*Columba livia*) en Amérique peut évoluer en guérison ou infestation chronique à faible parasitémie. Si l'hôte guérit, il ne développe aucune immunité acquise pour prévenir les réinfestations. Si l'infestation devient chronique, l'hôte possède alors une immunité contre les souches homologues. Dans cette étude, la plupart des oiseaux restaient infestés pendant de longues périodes avec des rechutes spontanées dont la fréquence pouvait diminuer avec le temps et aboutir à la guérison.

Une autre étude par Evans et Otter (1998) a montré une résistance insuffisante chez les chouettes harfangs (*Bubo scandiacus*) captives au Royaume-Uni. Ceci semble dû au fait qu'elles soient maintenues dans un environnement très éloigné de leur biotope naturel, et en particulier exposé à un parasite étranger, *Haemoproteus* n'étant pas présent dans leur milieu naturel.

- *Leucocytozoon*

Huit espèces de *Leucocytozoon* sont pathogènes pour les oiseaux : *L. simondi*, *L. marchouxi*, *L. toddi*, *L. caulleyri*, *L. macleani*, *L. smithi*, *L. struthionis* et *L. schoutedeni*.

La pathogénie de *L. toddi* chez les rapaces est encore peu connue, mais la présence de mégalomérontes dans de nombreux organes de rapaces infestés a été décrite à plusieurs reprises, notamment chez les buses variables (*Buteo buteo*) (Atkinson *et al.*, 2008). Chez cette même espèce, *L. buteonis* a été détectée sans signes cliniques ni lésions associées (Shokrani *et al.*, 2021).

La pathogénie de *L. simondi* chez les anatidés est plus connue et l'on peut supposer qu'il existe des similitudes avec les rapaces. 4 à 6 jours post infestation, les érythrocytes se fragilisent, ce qui entraîne une anémie au fur et à mesure que le nombre d'érythrocytes chute. Cette anémie est

associée à la rupture des mérontes et à la libération dans la circulation des mérozoïtes et des syncytia. L'anémie serait plutôt causée par la libération de facteurs « anti-érythrocytes » par les mérontes ou les cellules hôtes plutôt que par la destruction en elle-même des érythrocytes par les gamétocytes (anémie culmine avec le pic de parasitémie) (Kocan et Clark, 1966 ; Desser et Ryckman, 1976). La mortalité atteint son pic à 12 jours post infestation chez les anatidés, ce qui coïncide avec le pic d'anémie et la rupture de la majorité des mégalomérontes (Kocan et Clark, 1966 ; Maley et Desser, 1977).

Il existe des différences au sein du cycle biologique de *Leucocytozoon* entre les sources pathogènes et non pathogènes : la présence d'un pouvoir pathogène semble associée à la formation de mégalomérontes. En effet, les sources pathogènes font une première mérogonie dans le foie puis une deuxième dans d'autres organes pour former des mégalomérontes. Les sources non pathogènes ne réalisent qu'une mérogonie dans le foie sans formation de mégalomérontes. (Valkiūnas, 2005 ; Atkinson *et al.*, 2008).

Il existe cependant des exceptions : parmi les 8 espèces de *Leucocytozoon* précédemment cités, 2 ne produisent pas de mégalomérontes (*L. macleani*, *L. smithi*), et 3 en produisent (*L. simondi*, *L. marchouxi* et *L. caulleyri*). À l'heure actuelle, la capacité de formation de mégalomérontes est inconnue pour *L. struthionis* et *L. schoutedeni*, tandis que pour *L. toddi* des mégalomérontes sont décrits mais leur morphologie comparée à d'autres espèces laisse penser qu'il pourrait s'agir en fait de mérontes primaires de grande taille (Atkinson *et al.*, 2008).

Les oiseaux infestés par *Leucocytozoon* développent une réponse immunitaire humorale et cellulaire contre le parasite. Les hôtes survivant à l'infection ne semblent pas développer une immunité contre les hémospodidies responsables à l'exception du poulet (*Gallus gallus domesticus*) chez qui une étude a montré une guérison suite à une infestation par *L. caulleyri* un développement d'une résistance à ces parasites (Morii, 1992). Si un oiseau est infesté chroniquement par un *Leucocytozoon*, il acquiert une immunité contre les souches homologues tant qu'il restera infesté (Atkinson *et al.*, 2008) comme décrit pour *Haemoproteus*.

Le stress généré par un manque de nourriture pourrait jouer un rôle sur les interactions hôte-parasite chez les oiseaux : une étude a découvert une association entre la présence de simuliidés dans les nids de hiboux grand ducs d'Amérique (*Bubo virginianus*) et une augmentation de la mortalité des juvéniles au Canada entre 1990 et 1991. Cette période correspond aussi à un déclin de la population de lièvre d'Amérique (*Lepus americanus*) dont se nourrit le hiboux grand duc d'Amérique (Hunter *et al.*, 1997).

Dans une étude portant sur l'infestation à *Leucocytozoon* chez la Buse variable, le Milan royal et l'Autour des palombes en Allemagne, un fort taux de prévalence a été observé chez les juvéniles avec une faible pathogénicité. Les analyses sanguines réalisées ont montré une association entre l'infestation et la modification de certains paramètres sanguins. Ils ont observé l'augmentation des populations d'hétérophiles, de l'aspartate-amino-transférase (ASAT), des lactates, du butyrylcholinestérase (BuChE) et des acides biliaires, ainsi que la diminution des populations des lymphocytes et des monocytes chez les oiseaux infestés, même si les valeurs restaient dans les normes.

À la différence des genres *Leucocytozoon* et *Haemoproteus*, le genre *Plasmodium* a eu plus d'effets sur les valeurs sanguines des rapaces. L'hypothèse proposée pour expliquer cette observation serait

que plus les parasites ont coévolué longtemps avec leur hôte, moins leur effet est grand (Wiegmann *et al.*, 2021).

- *Plasmodium*

La présence et le type de signes cliniques dépendent des espèces de *Plasmodium* infestantes, de la sensibilité de l'hôte, et aussi du nombre de parasites présents dans la circulation périphérique. Une forte corrélation entre la sévérité de la maladie et la parasitémie a été démontrée expérimentalement par Permin et Juhl : dans leur étude, les oiseaux exposés à un plus grand nombre de sporozoïtes développent des parasitémies plus fortes, les lésions associées sont plus sévères et ils subissent une plus forte mortalité (Permin et Juhl, 2002).

Les lésions et signes cliniques semblent être causés par des mérozoïtes matures et/ou par leur rupture. Leur présence a pour conséquences l'anémie, résultant de l'hémolyse des érythrocytes et des lésions du parenchyme de certains organes (Atkinson *et al.*, 2008 ; Giorgiadis, 2017).

Les oiseaux sont incapables d'éliminer totalement *Plasmodium* une fois infestés. Ils restent le plus souvent infestés à une parasitémie faible voire indétectable. Cette chronicité leur permet, comme pour certains cas chez *Haemoproteus* et *Leucocytozoon*, de développer une immunité contre des souches homologues : prémunition (Atkinson *et al.*, 2008).

Les phanérozoïtes et les mérozoïtes intraérythrocytaires produisent des mérozoïtes maintenant une parasitémie chronique. Les phanérozoïtes sont responsables des récurrences et leur production est synchronisée avec la période de reproduction de l'hôte vertébré. Durant le temps de latence, peu de parasites sont retrouvés dans le sang, voire ils disparaissent complètement du sang périphérique.

La parasitémie évolue d'abord en une phase aiguë avec un pic atteint 6 à 12 jours post inoculation, crise suivie d'un déclin de parasitémie (phase chronique). Au cours de cette phase chronique, le système immunitaire de l'hôte contrôle l'infestation à un bas niveau d'intensité, mais le parasite peut persister pendant toute la vie de l'oiseau via les mérozoïtes exoérythrocytaires qui jouent le rôle de source de parasites (Valkiūnas, 2005 ; Atkinson *et al.*, 2008).

b. *Signes cliniques*

- *Haemoproteus*

Généralement bénin, *Haemoproteus* est souvent sans impact pour les oiseaux. Mais des signes cliniques peuvent être observés lors de phases aiguës d'infestation, lorsque le nombre de parasites en phase de mérozoïtes tissulaires ou érythrocytaires est élevé (Atkinson *et al.*, 2008). Ils peuvent causer une pneumopathie et des hémorragies (Valkiūnas, 2005 ; Ferrell *et al.*, 2007)

Tandis qu'une étude chez le faucon crécerelle américain montre que les femelles infestées par *H. tinnunculi* ont un poids vif plus faible que les non infestées (Apanius et Kirkpatrick, 1988 ; Remple, 2004), d'autres études décrivent une diminution du taux de survie chez les oiseaux infestés par *Haemoproteus* ainsi qu'une baisse de l'immunité et du taux de reproduction des animaux porteurs (Dawson et Bortolotti, 2000 ; Sol *et al.*, 2003).

Les oiseaux infestés peuvent aussi sembler plus agités ou anorexiques. Une anémie est décrite dans certains cas (Schultz, 2007) associée à une lymphocytose, une granulocytose (basophiles, éosinophiles et hétérophiles) et une monocytose. Cette modification de la formule sanguine signe ici une réponse immunitaire à médiation cellulaire et humorale dirigée contre les stades érythrocytaires et pré érythrocytaires du parasite, et donc particulièrement contre les mérozoïtes qui envahissent les erythrocytes (Ots et Hōrak, 1998 ; Garvin *et al.*, 2003).

Parmi les lésions attribuées à *Haemoproteus*, nous pouvons citer la nécrose de fibres musculaires produite par les stades tissulaires, une splénomégalie, une hépatomégalie et une néphromégalie (Earle *et al.*, 1993 ; Olias *et al.*, 2011). Ces organes peuvent alors paraître brun foncé à l'autopsie en raison de l'accumulation du pigment hémozoïne (Karadjian *et al.*, 2013).

En dépit du caractère bénin d'*Haemoproteus* chez la plupart des rapaces, de sévères anémies ont été décrites chez certains strigiformes, dont les harfangs et les hulottes (Evans et Otter, 1998 ; Remple, 2004 ; Giorgiadis, 2017). Les harfangs juvéniles infestés par *H. syrnii* ont développé une anémie arégénérative sévère (Ht au plus bas à 5 %). L'examen nécropsique a révélé des mérontes au niveau de l'endothélium des poumons, des muscles squelettiques du myocarde, du cortex cérébral et des méninges du cervelet, mais peu d'inflammation associée (Evans et Otter, 1998).

La présence fréquente de mérontes ramifiés à paroi fine dans le tissu pulmonaire engendre parfois une faible réponse pathologique chez les oiseaux infestés (Atkinson *et al.*, 2008). Dans une étude sur des geais bleus infestés expérimentalement par *H. danilewskii*, aucune lésion associée à la présence du parasite n'a été observée avant 57 jours post inoculation, quand des lésions sont observées dans les poumons, le foie, la rate sur les geais juvéniles qui présentaient initialement une parasitémie élevée. On retrouve parmi ces lésions de la nécrose périportale et d'autres cellules hépatiques, une infiltration lymphocytaire et une hyperplasie épithéliale au niveau des bronches tertiaires, une hyperplasie de l'endothélium artériolaire de la pulpe blanche au niveau de la rate, des nécroses aléatoires des lymphocytes et un infiltration macrophagique (Garvin *et al.*, 2003).

La présence de mégalomérontes à paroi épaisse chez certaines espèces d'oiseaux peut causer une myosite sévère. Elle peut être associée à la présence de mégalomérontes intacts ou rompus visibles macroscopiquement sous la forme de petites taches blanches ou trainées hémorragiques foncées au sein des muscles squelettiques et cardiaques. Au microscope, les mégalomérontes sont entourés de cellules inflammatoires telles que des macrophages, cellules géantes et des granulocytes hétérophiles ainsi que des érythrocytes. Les fibres musculaires à proximité des mégalomérontes sont nécrosées ou calcifiées (Miltgen *et al.*, 1981 ; Atkinson *et al.*, 1986 ; Cardona *et al.*, 2002 ; Atkinson *et al.*, 2008).

- *Leucocytozoon*

Le pouvoir pathogène de *Leucocytozoon* est controversé : si l'infestation est très fréquente chez les rapaces, les signes cliniques associés sont peu fréquents. Comme pour *Haemoproteus*, la présence du parasite à n'importe quel niveau de parasitémie et quel que soit l'âge de l'hôte peut avoir des effets subcliniques sur l'hôte et influencer sa reproduction, son poids, augmenter sa mortalité, ou simplement le rendre plus sensible à d'autres maladies.

La perte de vitesse en vol, une perte de coordination, une dépression, une cécité, des vocalisations spontanées et sans raison, un amaigrissement, une anorexie, des vomissements, des difficultés

respiratoires avec inflammation des sacs aériens, un plumage ébouriffé, une arthrite, sont des signes cliniques associés à l'infestation de rapaces par *L. toddi* (Raida et Jaensch, 2000 ; Atkinson *et al.*, 2008). Les manifestations cliniques de *Leucocytozoon* chez les rapaces se retrouvent le plus souvent chez les jeunes ou chez les individus soumis à un stress important.

Une étude sur des faucons crécerelles en Australie a montré que *Leucocytozoon* sp serait responsable de troubles neurologiques et de cécité chez des oisillons. Les lésions relevées sont une endarthrite sévère, une inflammation du pecten et une méningoencephalomyélite (Raida et Jaensch, 2000). Les mérontes sont aussi présents en plus petit nombre dans les poumons, foie, cœur, reins et intestins. Des mégalomérontes ont été observés dans la rate, les muscles pectoraux et le cœur des buses variables mais pas chez les faucons crécerelles. L'espèce de *Leucocytozoon* concernée dans cette étude était inconnue mais les gamétocytes mis en évidence par les frottis sanguins ressemblaient à ceux décrits pour *L. simondi* et *L. smithi* (Raida et Jaensch, 2000). La lésion majeure décrite chez les buses variables pour *L. toddi* est une splénomégalie (Atkinson *et al.*, 2008).

- *Plasmodium*

Chez les oiseaux, *Plasmodium* peut être très pathogène pendant les phases aiguës de l'infestation. Les signes cliniques de la malaria aviaire chez les rapaces sont variables et peuvent s'exprimer comme une légère dépression avec anorexie, une léthargie avec plumage ébouriffé, ou alors comme une sévère dyspnée voire la mort (Giorgiadis, 2017). Dans une étude sur des poulets infestés expérimentalement par *P. gallinaceum*, les signes cliniques apparaissent au bout de 5 à 7 jours après inoculation, associé à une augmentation de la parasitémie et à une baisse de l'hématocrite.

Les fientes verdâtres retrouvées quatre jours après infestation s'expliquent par l'hémolyse des érythrocytes infestés et non infestés. La dégradation de l'hémoglobine conduit à la production excessive de biliverdine qui est éliminée dans les fientes (Williams, 1985).

On peut différencier 3 phases d'infestation selon l'aspect des fientes :

- La phase 1 dure quelques heures. Les fientes ont un aspect et une consistance normaux mais la partie fécale est de couleur verte.
- La phase 2 débute à partir du 5^e jour post infestation. On observe une diarrhée verte et mucoïde qui persiste pendant environ 2 jours chez les oiseaux qui survivent à l'infection.
- La phase 3 est la phase d'infestation chronique. La coloration verte est toujours présente mais moins intense et disparaît au fur et à mesure que la parasitémie diminue.

Un autre signe d'infestation à *Plasmodium* est l'augmentation de la température cloacale mesurée au cours de la phase aiguë de l'infestation par *P. gallinaceum* chez le poulet (Williams, 2005). Cet état fébrile ne dure pas longtemps. C'est le contraire chez les canaris (*Serinus canaria*) infestés par *P. relictum* qui présentent une chute de température corporelle pendant la phase aiguë de l'infestation et ne semblent plus pouvoir contrôler leur thermorégulation (Hayworth *et al.*, 1987).

La présence de sang très liquide, une hypertrophie et décoloration hépatique et splénique sont d'autres signes cliniques associés à une infestation à *Plasmodium*. L'hypertrophie serait plutôt liée à une augmentation de l'activité phagocytaire des macrophages. Le développement de ces lésions coïncide avec l'élévation de la parasitémie, l'hémolyse des érythrocytes infestés et avec la plus grande fragilité des érythrocytes sains (Williams, 2005 ; Atkinson *et al.*, 2008). L'anémie hémolytique

et régénérative s'explique par la chute du nombre d'érythrocytes et leur remplacement par des érythrocytes immatures et par la chute de concentration en hémoglobine pendant la phase aigüe.

Une anoxie et donc une coagulopathie intravasculaire disséminée sont donc possibles et peuvent ensuite endommager les cellules endothéliales des capillaires. Dans certains cas graves, des thrombi ou des emboli peuvent se former dans certains organes comme la rate. Les capillaires et veinules peuvent se dilater et voir leur perméabilité augmenter, ce qui est à l'origine d'oedèmes et d'hémorragies. Une baisse de la volémie et de la pression artérielle, une augmentation des temps de coagulation et une hyperkaliémie peuvent aussi être mis en évidence (Atkinson *et al.*, 2008)

Il est aussi rapporté que les infestations par *P. cathemerium* peuvent causer des myopathies inflammatoires des muscles squelettiques par dégénérescence des capillaires et des fibres musculaires, une infiltration par des cellules mononuclées et d'une obstruction des capillaires par des érythrocytes infestés (Carmona *et al.*, 1996).

Les mérontes de certaines espèces peuvent bloquer complètement les capillaires (*P. gallinaceum*, *P. durae* et *P. relictum* par exemple), ce qui provoque des œdèmes et hémorragies. Ces lésions sont retrouvées dans le cœur, les poumons, les glomérules rénaux et le cerveau (Fix *et al.*, 1988 ; Atkinson *et al.*, 2008). Des cas de dyspnée sévère aboutissant à la mort de l'individu sont rapportés. Cette situations s'explique par un œdème pulmonaire causé par la rupture brutale de nombreux mérontes au niveau de l'endothélium pulmonaire (Remple, 2004). Des lésions de l'encéphale peuvent se traduire par des signes neurologique et le décès brutal de l'oiseau (Atkinson *et al.*, 2008).

B. Conséquences des hémospodioses

Les hémospodioses ont un effet variable sur les populations d'oiseaux sauvages comme captifs, en fonction de l'hôte et du parasite (sensibilité de l'espèce, coévolution, ...). Également, d'autres facteurs environnementaux pourraient influencer la prédisposition aux vecteurs (et donc aux parasites), leur sensibilité à l'infection et la pathogénicité du parasite.

a. *Haemoproteus*

L'infestation à *Haemoproteus* pourrait influencer la durée de vie de l'hôte : une étude réalisée chez les pigeons bisets juvéniles de Barcelone a montré que les oiseaux infestés par *Haemoproteus* survivent moins longtemps que les oiseaux sains (Sol *et al.*, 2003).

L'infestation à *Haemoproteus* pourrait aussi affecter la fonction de reproduction des oiseaux : une étude en Finlande relève que les faucons crécerelles femelles ayant un partenaire infesté par *H. tinnunculi* ont des couvées plus petites et des pontes plus tardive que les femelles ayant eu un partenaire non infesté (Korpimäki *et al.*, 1995).

Des modifications climatiques pourraient modifier l'aire de répartition des différents vecteurs, et donc exposer des espèces natives aux hémospodioses. Les chouettes harfangs (*Bubo scandiacus*) semblent particulièrement sensibles à *Haemoproteus* lorsqu'elles sont maintenues en captivité dans un biotope très différent de celui d'origine. En Asie, quelques cas fatals d'infection ont été rapportés (Lee *et al.*, 2018 ; Yoshimoto *et al.*, 2021).

Les raisons de cette morbidité et mortalité augmentée chez les chouettes harfangs en captivité comparées à d'autres espèces de rapaces incluraient un stress, une pathologie concurrente, une exposition nouvelle à ce pathogène et une température ambiante plus élevée que dans leur milieu

naturel (Baker *et al.*, 2018). La conservation d'espèces ex situ en parc zoologique nécessiterait alors des recherches préalables sur la prévalence des hémospories dans les populations d'oiseaux sauvages et des potentiels vecteurs à proximité (Yoshimoto *et al.*, 2021).

b. *Leucocytozoon*

L'infestation à *Leucocytozoon* peut être à l'origine d'une hausse de mortalité des individus infestés comme l'a montré une étude (Hunter *et al.*, 1997) : pendant une année de pénurie alimentaire dans le Yukon (Canada), qui correspond au déclin de la population du lièvre d'amérique, proie principale des hiboux grands ducs d'amérique, une infestation à *L. toddi* a causé une mortalité importante parmi les juvéniles de cette espèce. La méthode de suivi par surveillance des sites de nidification associée au pistage par télémétrie de certains individus a permis de retrouver 28 cadavres de grands ducs juvéniles entre 1990 et 1991.

D'après Atkinson, *Leucocytozoon* augmenterait la réceptivité de l'hôte à d'autres agents pathogènes, sa vulnérabilité aux prédateurs et compromettrait l'aptitude à se reproduire ou à migrer (Atkinson *et al.*, 2008).

Selon Hamilton et Zuk, les parasites et pathogènes sont un des facteurs responsables des caractères sexuels secondaires chez les oiseaux, en particulier le plumage (Hamilton et Zuk, 1982). Une étude chez des chouettes hulottes (*Strix aluco*) a montré une association indirecte entre l'infestation à *Leucocytozoon* et la couleur du plumage via la longueur des télomères. En effet, la longueur des télomères est plus courte chez les infectés que chez les non infectés, et elle est aussi plus courte chez les individus de couleur brune comparée à ceux de couleur grise. Le raccourcissement des télomères est aussi associé à une durée de vie plus courte des hôtes. Il est aussi plus rapide chez les hulottes au plumage plus foncé. Cette étude montre aussi que la réduction de parasitémie a des effets différents sur le raccourcissement des télomères en fonction de la couleur du plumage : la décélération du raccourcissement des télomères se fait plus vite chez les individus pâles et gris, mais elle est moins prononcée chez les individus foncés et bruns. Les hémospories augmentent le stress oxydatif de l'hôte durant la reproduction, et la complémentation en antioxydants a montré une décélération du raccourcissement des télomères. Il est aussi suggéré que plus les individus sont pâles, moins ils requièrent d'énergie pour maintenir leur température corporelle et ils sont donc moins soumis au stress oxydatif. La diminution plus rapide des télomères dans le cas des individus foncés parasités pourrait donc être reliée à leur plus grande dépense d'énergie et à leur métabolisme plus rapide (Karell *et al.*, 2017).

c. *Plasmodium*

L'infestation à *Plasmodium* aurait un effet non négligeable sur le comportement et la reproduction des oiseaux infestés. Chez le bruant à couronne blanche (*Zonotrichia leucophrys oriantha*), l'infestation par *Plasmodium* et *Leucocytozoon* est associée à une modification du chant des mâles (réduit dans le temps), impactant potentiellement le choix du partenaire et le succès de la reproduction (Gilman *et al.*, 2007). L'infestation à *Haemoproteus* n'est pas associée à une modification du chant.

Un exemple célèbre d'impact écologique de *Plasmodium* est l'introduction accidentelle de *Plasmodium relictum* dans les îles hawaïennes qui a mené à une catastrophe pour les populations

locales : sur 70 des espèces d'oiseaux enzootiques des îles d'Hawaï, 23 sont éteintes et 30 en voies de disparition selon le service de pêche et de faune sauvage des USA (Atkinson *et al.*, 2008). La malaria aviaire est suspectée d'être la cause principale de cette extinction massive.

Une autre étude d'Atkinson datant de 1995 a testé la sensibilité de l'iiwi (*Vestiaria coccinea*), espèce enzootique des îles hawaïennes, à une souche de l'île d'Hawaï de *Plasmodium relictum* : un suivi de la consommation alimentaire, du poids et de la parasitémie est réalisé chez les jeunes iiwi infestés par piqure de moustique unique (faible dose) ou multiple (forte dose). Dans les deux groupes, la mortalité était significativement plus élevée que chez les témoins non infestés (100 % à forte dose et 90 % à faible dose), et on note une baisse significative de la consommation alimentaire et une baisse du poids vif induite chez les infestés.

C. Diagnostic et contrôle

a. *Diagnostic*

- *Sur frottis sanguin*

L'observation directe au microscope sur frottis sanguin est la méthode de référence pour le diagnostic d'infestation aux hémosporidaies.

Il faut tout d'abord réaliser un frottis de qualité suffisante afin de permettre une observation correcte des parasites. En effet les infections sont souvent chroniques avec une faible parasitémie ce qui peut poser problème pour l'observation des parasites. Dans le cas de *Plasmodium*, si on n'observe pas de mérontes érythrocytaires, la distinction entre gamétocyte de *Plasmodium* et *Haemoproteus* est difficile. Le prélèvement doit se faire de préférence sur des animaux vivants. Le sang doit être le plus périphérique possible, car c'est là où on trouve le plus de parasites : les sites de ponctions à privilégier sont la veine métatarsienne latérale ou la veine alaire sur les plus grands oiseaux. La veine jugulaire sera en revanche recommandée si des volumes à prélever sont plus importants.

Un prélèvement post-mortem peut altérer la morphologie des gamétocytes matures. De la même manière, aucun anticoagulant tel que l'EDTA ne doit être ajouté sous peine de modifier la morphologie des parasites. Le frottis sanguin doit être réalisé le plus rapidement possible après la prise de sang pour éviter que le sang ne coagule. Il faut donc prévoir des lames microscopiques propres, dégraissées et identifiées. Le frottis doit ensuite être fixé au méthanol absolu (100 %) le plus rapidement possible car une exposition trop longue à l'air altère les cellules. La lame est ensuite colorée au May-Grünwald Giemsa (MGG) (Atkinson *et al.*, 2008 ; Valkiūnas, 2005).

Le frottis est ensuite observé au microscope au grossissement x40 puis x100. La lecture de la lame doit être réalisée par un spécialiste : l'identification du parasite est subtile, d'autant plus qu'une même espèce peut présenter plusieurs stades sur un même frottis, qui sont parfois difficiles à distinguer. Une autre difficulté concerne le fait que la morphologie du parasite est hôte dépendant, comme c'est le cas chez *Plasmodium relictum*.

- *Techniques moléculaires*

La PCR est un outil intéressant. Cependant le sang des oiseaux contient beaucoup d'ADN du fait que les hématies soient nucléées, ce qui complique la phase de purification de l'ADN qui est amplifiée par PCR, et notamment l'isolement et la détection de l'ADN parasitaire. Il faut pouvoir cibler ce dernier afin de pouvoir l'isoler, d'autant plus que le génome de *Plasmodium* est 50 fois plus petit que celui de l'oiseau.

Un premier protocole a été publié par Bensch et Akesson en 2003, la cible étant une portion du gène encodant le cytochrome b mitochondrial. Ce protocole, modifié depuis, reste le plus répandu aujourd'hui. Il permet également de bien détecter les *Leucocytozoon* qui étaient initialement peu étudiés car ils ne sont détectables dans le sang périphérique que pendant un très court laps de temps, et sont donc difficilement détectables par examen direct (Hellgren *et al.*, 2004).

Un autre protocole décrit dans une étude récente utilise le cytochrome b ainsi que des gènes des sous-unités I et III de la cytochrome c oxydase (cox 1 et 3) de l'ADN mitochondrial. Il a permis de créer de nouvelles amorces pour la PCR hémospodiales. L'avantage de ces nouvelles amorces est qu'elles permettent de détecter plus sensiblement les infections mixtes (Pacheco *et al.*, 2018).

D'autres tests existent mais sont moins fréquemment utilisés ou en cours de perfectionnement. C'est le cas des tests sérologiques, tel que l'ELISA ou l'immunofluorescence, mais leur sensibilité est plus faible que celle de la PCR (Atkinson *et al.*, 2008).

- *Sur calque d'organe*

Cette méthode est utilisée comme outil de diagnostic post mortem. Elle est plus limitée que le frottis sanguin car les stades tissulaires de *Plasmodium* et *Haemoproteus* sont encore peu connus morphologiquement, et les mégalomérontes des 3 genres d'hémospodiales sont parfois difficiles à distinguer.

Pour réaliser le calque, il faut prélever un morceau de l'organe choisi au cours de l'autopsie de l'oiseau. Le morceau à étudier doit être découpé à l'aide d'un scalpel, le sang en excès doit être éliminé en tamponnant l'organe sur un papier absorbant et la face de l'organe doit ensuite être appliquée en plusieurs endroits sur une lame propre. Il est préférable de prélever des organes cibles différents pour un même oiseau. Ceux-ci sont généralement les poumons, le foie, la rate, le cœur et les reins. Le traitement de la lame est ensuite le même que pour les frottis sanguins (Valkiūnas, 2005).

L'observation des stades tissulaires peut aussi se faire sur des coupes histologiques. Le Carnoy (mélange de méthanol, chloroforme et acide acétique) serait un fixateur plus adapté que le formol.

- b. *Traitement*

Les protocoles montrent des résultats variables selon l'espèce parasitaire. Dans tous les cas, il est recommandé, selon les signes cliniques de l'oiseau infesté, d'accompagner le traitement étiologique par un traitement de soutien à travers une oxygénothérapie, une fluidothérapie, l'administration d'anti-inflammatoires, d'antibiotiques, d'antifongiques et éventuellement une transfusion sanguine (Giorgiadis, 2017).

- *Contre Haemoproteus*

Le protocole thérapeutique contre *Haemoproteus* a un succès mitigé : l'association de 25 mg/kg de chloroquine et 0,75 mg/kg de primaquine en dose initiale puis 15 mg/kg de chloroquine une fois par jour pendant une semaine a permis de réduire la parasitémie chez les buses de Harris (*Parabuteo unicinctus*) infestées par *Haemoproteus* sp et chez les jeunes harfangs infestées par *Haemoproteus noctuae*. En revanche, le traitement a été inefficace pour les chouettes parasitées par *Haemoproteus syrnii*.

Un autre protocole associant la chloroquine à 60 mg/kg avec la méfloquine à 50 mg/kg administrées per os une fois par jour, a conduit à la survie d'une des deux harfangs parasitées par *H. syrni* (Remple, 2004).

Une autre étude a testé la buparvaquone avec succès sur des pigeons bisets infectés à *H. colombae* (Joshi *et al.*, 2017). Cette molécule n'a pas été testée chez les rapaces.

- *Contre Leucocytozoon*

Deux protocoles ont été testés sur les rapaces :

Un traitement comprenant un mélange de triméthoprime (40 mg/mL) et de sulfaméthoxazole (200 mg/mL) à 0,15 mL/kg injecté par voie intramusculaire une fois par jour pendant 7 jours a été utilisée pour le traitement de faucons pèlerins (*Falco peregrinus*) fortement parasités. Le traitement a permis de réduire considérablement la parasitémie sans pour autant permettre une élimination totale du parasite des cellules sanguines (Remple, 2004).

D'après une étude par Tarello en 2006, un autre protocole consistant en l'injection de mélarsomine 0,25 mg/kg par voie intramusculaire une fois par jour pendant quatre jours a entraîné la disparition des signes cliniques en même temps que la disparition des parasites dans le sang (objectivé par frottis) (Atkinson *et al.*, 2008).

- *Contre Plasmodium*

Le traitement contre *Plasmodium* repose sur des antipaludéens humains. En raison de la capacité des hémosporidies à développer des résistances (et donc la recherche constante pour le développement de nouveaux traitements contre le paludisme), seules certaines de ces molécules sont encore utilisées chez les animaux.

La quinacrine a été la première à être utilisée pour la malaria aviaire, mais elle a été abandonnée par manque d'efficacité au niveau tissulaire et à cause de sa toxicité lorsqu'elle est associée à la primaquine.

Historiquement, la chloroquine a été utilisée pour la première fois en 1979 sur des faucons gerfaut (*Falco rusticolus*). La 4-aminoquinoline, qui est un composant de la chloroquine, a une activité contre les mérontes érythrocytaires et les gamétocytes. La 8-aminoquinoline, qui est un composant de la primaquine, est létale pour les schizontes tissulaires et les gamétocytes (Remple, 2004). Aujourd'hui, la dose de chloroquine donnée aux oiseaux est associée avec la primaquine pour son action contre les formes tissulaires du parasite.

Plusieurs protocoles sont proposés :

De la chloroquine à la dose de 15 mg/kg per os associée à de la primaquine à la dose de 0,75 mg/kg per os. Un autre protocole consiste en l'administration per os de 25 mg/kg de chloroquine et 1,3 mg/kg de primaquine en dose de charge, puis de 15 mg/kg de chloroquine per os 12 heures, 24 et 48 heures après la dose de charge. Pour l'administration de ces traitements, il convient de vérifier en détail la quantité de substance active de la spécialité pharmaceutique choisie (Remple, 2004). Ce protocole est illustré en figure 26.

Figure 26 : Protocole thérapeutique de la malaria aviaire (adapté d'après Remple, 2004)



Le développement de résistances à la chloroquine et à la primaquine a conduit au test de nouvelles molécules pour traiter les oiseaux contre *Plasmodium*. La méfloquine par exemple, un analogue de la quinine qui présente une efficacité sur les formes sanguines tissulaires de *Plasmodium*, a été utilisée avec succès dans le traitement du Petit-duc maculé (*Otus asio*). Une administration à la dose de 30 mg/kg per os et répétée après 12, 24 et 48 heures a permis une résolution des signes cliniques et une élimination de *Plasmodium subpraecox* infestant les oiseaux de l'étude (Tavernier *et al.*, 2005).

c. **Prévention**

Les juvéniles semblent être les individus qu'il faut surveiller le plus car leur système immunitaire est immature et incapable de contrôler l'infection. Si l'état des oiseaux le permet et des signes cliniques laissant suspecter une infection sont présents, un prélèvement sanguin peut être réalisé pour chercher des hémospories. Mais le traitement des oiseaux infestés doit être réfléchi en fonction de leur état clinique et du coût des traitements antipaludéens : il convient de ne traiter que les individus ayant des signes cliniques et dont l'infection est confirmée. Le nursing et traitement de soutien jouent aussi un rôle en contribuant à la réduction de la parasitémie (Jacquesson, 2019).

Le contrôle des population d'arthropodes hématophages, c'est-à-dire la réduction d'insectes vecteurs, peut réduire la transmission des parasites. Elle est cependant difficile à mettre en œuvre chez les oiseaux, notamment sauvages, car ce sont souvent des espèces migratrices, changeant d'environnement, et donc difficile à contrôler. Il est par contre possible d'agir sur les animaux captifs en centre de soins : éliminer les insectes des volières, confiner les oiseaux vis-à-vis des vecteurs pendant leur période à risque, installer des moustiquaires ou maille serrée pour les volières, mais elles limitent la circulation d'air, ce qui peut entraîner d'autres problèmes de santé (Mutlow et Forbes, 2000 ; Valkiūnas, 2005).

L'utilisation de répulsifs ou d'insecticides est une mesure facile à mettre en œuvre pour limiter les infestations en centre de soins, particulièrement s'ils sont situés dans une région chaude et humide. L'utilisation d'un insecticide (fipronil) pendant la période de reproduction a montré, dans une étude chez un grand duc d'amérique, une efficacité contre la transmission d'hémospories chez les couples reproducteurs à leurs pairs et à leur progéniture (Mutlow et Forbes, 2000). Les adultes infectés semblent être la source d'infection pour leurs progénitures. Les recommandations sont alors de traiter les couples reproducteurs un mois avant les pontes, au moment de la ponte, quand les jeunes ont deux semaines puis une fois par mois. Une autre possibilité pour éviter l'infestation des jeunes si les parents sont infestés est l'adoption des jeunes par des adultes sains.

Chez les manchots où le paludisme est très étudié, une étude recommande de compléter en thiamine les individus nourrissant les jeunes, en extrapolant les données montrant que chez l'homme un taux élevé en vitamine B1 diminue la probabilité de se faire piquer (Tollini *et al.*, 2000).

Parmi les stratégies de contrôle des vecteurs, nous pouvons citer la limitation des points d'eau stagnante, l'utilisation d'insecticide dans les bassins de parcs (l'eau de javel ne tue pas les larves de moustiques), la plantation de noyer est réputée pour repousser les moustiques, l'élimination de branches surplombant l'enclos qui semblent favoriser la présence de moustiques et mouches, et la mise en place de cages munies de perchoirs destinées aux chauves souris insectivores pour promouvoir la faune sauvage locale se nourrissant de diptères (Tollini *et al.*, 2000 ; Gonsalves *et al.*, 2013).

Dans les centres de soins, il est possible de mettre en place une prophylaxie médicale contre *Plasmodium* avec un protocole associant de la chloroquine à 25 mg/kg et de la primaquine à 1,3 mg/kg une fois par semaine à commencer un mois avant le début de la saison des moustiques/mouches plates et à continuer un mois après la fin de la saison. (Remple, 2004). Chez les manchots, un protocole prophylactique à base de 125 mg de sulfadiazine et 4 mg de pyriméthamine et d'acide folique 0,4 mg par individu une fois par jour pendant la saison des moustiques à montré son efficacité contre *Plasmodium*, mais n'a pas encore été testé contre *Haemoproteus* (Grilo *et al.*, 2016).

Bien que les oiseaux aient été les modèles pour le développement de vaccin contre paludisme, il n'existe à ce jour pas de méthode pour immuniser les oiseaux. Les vaccins testés sur les oiseaux sont soit réalisés à partir de molécules de surface du parasites, soit réalisés à partir de sporozoïtes, mérozoïtes et gamètes inactivés par rayons ultraviolet ou de la formaline (Atkinson *et al.*, 2008).

Deux vaccins à ADN ont été testés chez les manchots du cap et des canaris. Ils ont été fabriqués à partir de la protéine du circumsporozoïte (protéine de surface exprimé par *Plasmodium* au stade sporozoïte) de *P. gallinaceum* et *P. relictum*. Ces oiseaux étaient exposés à une transmission naturelle de *P. relictum* dans un parc zoologique. Ces 2 vaccins ont modérément protégé les canaris contre *P. relictum* (Grim *et al.*, 2004 ; McCutchan *et al.*, 2004).

Pour *Leucocytozoon*, deux vaccins destinés aux volailles ont été développés pour les protéger contre les mégalomérontes de *L. caulleryi*. Un est fabriqué avec une 2^e génération de mégalomérontes tués avec de la formaline (Morii *et al.*, 1990), l'autre est un vaccin recombinant (Ito et Gotanda, 2004). Le deuxième n'immunise pas complètement contre les *Leucocytozoon* contre lesquels il est dirigé mais semble réduire les signes cliniques sur les oiseaux testés. Ces derniers ont aussi une meilleure production d'œufs que les oiseaux non vaccinés.

D. Coévolution hôte-parasite

Les interactions hôte-parasite donnent très souvent lieu à de la coévolution car les hôtes et les parasites sont en compétition pour la même ressource. Tandis que les hémospories semblent exploiter des stratégies qui permettront d'assurer leurs persistences et dissémination au sein des volatiles, l'hôte lui-même a vraisemblablement adapté son comportement social, reproducteur voire écologique afin de développer des stratégies de résistance et/ou tolérance à l'infection.

a. Adaptations comportementales

Les oiseaux sont des hôtes mobiles : ceux qui migrent sont soumis à différents biotopes et vecteurs, ce qui affecte la probabilité d'infections aux hémospories. Dans certaines études, il a été suggéré

que les migrations pouvaient être à l'origine une stratégie d'échappement au parasitisme, en particulier les espèces d'oiseaux qui migrent entre milieux d'eau douce et eau salée, ou qui se reproduisent sur de petites îles (Mendes *et al.*, 2005 ; Gutiérrez-López *et al.*, 2015).

Les habitudes migratoires ou non pourraient avoir influencé la co-évolution entre les oiseaux de proie et les hémospories. Les oiseaux migrateurs seraient touchés par une plus grande variété génétique de parasites comparé aux espèces non migratrices (Jenkins *et al.*, 2012).

Les oiseaux migrateurs, par leur traversée de différentes régions et leur exposition à différents parasites, auraient plus tendance à être infestés que les autres. Mais la migration pourrait aussi être un mécanisme de défense en fuyant un certain environnement. Une étude a testé cette affirmation sur le statut d'oiseaux migrateurs sud américains par rapport aux hémospories *Haemoproteus* et *Plasmodium*. Elle a révélé une association positive entre le caractère migrateur des oiseaux et une plus forte prévalence et diversité génétique d'hémospories (de Angeli Dutra *et al.*, 2021).

Il existe des échanges de parasites entre les espèces locales et migrantes d'oiseaux sur un territoire. C'est pourquoi les oiseaux servent de modèle pour étudier les effets de mouvements d'animaux sur la transmission de parasites, leur introduction dans de nouveaux habitats, l'effet du changement climatique sur le risque d'infection, et la co-évolution. Il semblerait qu'il y ait des différences au sein des hémospories sur leur comportement de colonisation de nouveaux milieux (Clark *et al.*, 2014).

Une autre étude portant chez trois familles de vautours en Espagne n'a pas montré d'association entre le taux de prévalence à *Leucocytozoon* et des paramètres tels que le sexe ou l'âge des oisillons. En revanche, chez le vautour fauve (*Gyps fulvus*), il y aurait une association entre la prévalence du parasite et les oiseaux nichant dans des arbres comparés à ceux nichant dans des falaises. Cette différence peut être expliquée par la préférence des vecteurs aux arbres par rapport falaises et milieux ouverts. Cette étude montre aussi que l'infestation aux hémospories se fait au détriment de la masse corporelle des oisillons chez le vautour moine (*Aegypius monachus*) (Chakarov et Blanco, 2021).

Des variations de taux de prévalence d'hémospories pourraient être reliées à des traits portant sur la reproduction. L'attention portée au nid est un des facteurs prédictifs du taux d'infestation. Chez les espèces d'oiseaux où la femelle ou le couple s'occupe du nid, le taux de prévalence est entre 8 à 12 fois plus important que chez les espèces qui ne s'occupent pas de leur nid. D'où l'hypothèse supportant l'idée que l'investissement parental serait un coût évolutif qui augmenterait le risque d'infestation à des parasites vectorisés. Des corrélations entre le taux de prévalence et le type de nid, sa hauteur et sa structure ont aussi été montrées. La structure du nid semble influencer l'infection à *Haemoproteus* et *Leucocytozoon*. *Haemoproteus* serait associé à la construction de nids ouverts tandis que *Leucocytozoon* serait associé à la construction de nid au sol (Ganser *et al.*, 2020).

Enfin, le taux de prévalence d'*Haemoproteus* est moins élevé chez les espèces polygames que les espèces monogames de passereaux d'Amérique du nord et d'Europe. Il n'y a cependant pas de différence significative pour les autres hémospories.

b. *Autres modalités de coévolution*

Les différences de prévalence des hémospories au sein des oiseaux peuvent s'expliquer par l'exposition différente aux vecteurs, une différence de résistance ou tolérance à l'infection et par une compétition entre les parasites.

Dans une autre étude réalisée au Danemark portant sur les proies des éperviers d'Europe (*Accipiter nisus*) et autours des palombes (*Accipiter gentilis*), il est suggéré que ces rapaces tendent à prédateur préférentiellement les populations d'oiseaux à haut taux de prévalence d'hémospories que celles ayant des prévalences plus basses. En conséquence, la prédation serait un facteur important influençant la dynamique hôtes-parasites car en prédatant préférentiellement les individus plus susceptibles d'être infectés, les rapaces diminueraient les chances de transmission du parasite. Cette étude montre aussi que les hémospories sont associées à un risque de décès plus important chez les oiseaux prédatés par l'épervier d'Europe et l'autour des palombes (Møller et Nielsen, 2007).

Une coévolution semble aussi exister du point de vue vecteur-parasite. Par exemple, la survie d'un Culicidé pourrait être influencée, positivement ou négativement, par la présence du parasite *Plasmodium* dans son organisme. Réciproquement, des différences de survie et transmission entre différentes lignées de *Plasmodium* ont été observées au sein des différentes espèces de vecteurs qu'il utilise : si l'on considère que le genre *Plasmodium* n'a pas de liens coévolutifs étroits avec un seul vecteur (une même espèce peut transmettre plusieurs lignées voire plusieurs espèces de *Plasmodium*), cette affirmation est à nuancer.

Contrairement à *Culex pipiens* qui peut transmettre plusieurs lignées de *Plasmodium*, *Aedes caspius* ne peut pas, ce qui suggère qu'il existe un mécanisme empêchant le développement du parasite et donc sa transmission chez certaines espèces de moustiques. Le passage de la paroi de l'estomac du vecteur pourrait être une limite car il implique un mécanisme complexe utilisant de nombreuses protéines. Une modification ou une absence de ces protéines à ce niveau pourrait altérer le passage du parasite au-delà du tube digestif du vecteur.

Chaque association parasite-vecteur pourrait moduler la transmission de la lignée de *Plasmodium* concernée d'une part à travers la modulation du développement du parasite au sein du vecteur, d'autre part par le coût de la présence du parasite dans le vecteur qui influence la survie du moustique. Une étude a notamment montré que *Culex pipiens* était capable de mieux transmettre *P. cathemerium* que *P. relictum* par la moindre influence du premier sur la survie du moustique et sa plus grande capacité à se répliquer et à atteindre les glandes salivaires du vecteur. La compréhension des interactions hôtes-vecteurs pourraient donc apporter de précieuses informations pour comprendre l'abondance et le maintien de différentes espèces et lignées de *Plasmodium* dans le monde (Gutiérrez-López *et al.*, 2020).

Deuxième partie : Hémosporidies chez les rapaces et corvidés recueillis au Chuv-FS entre mai 2018 et mai 2019, étude expérimentale

1. Introduction

L'étude des hémosporidioses aviaires bénéficie d'un regain d'intérêt de la communauté scientifique en conséquence du souci de la bonne santé de la faune sauvage dans notre société et l'impact écologique qu'elles ont pu avoir dans le passé.

Les connaissances sur les hémosporidioses aviaires actuelles sont assez étendues et de plus en plus précises, notamment sur leur cycle, conditions de développement et espèces infestées, d'autant plus avec l'accès à de nouvelles techniques de biologie moléculaire. Les études s'intéressant aux vecteurs sont aussi de plus en plus abondantes alors que cet axe était jusqu'à présent moins étudié.

Malgré toutes ces connaissances, la situation épidémiologique est relativement peu connue pour les rapaces et corvidés en France et notamment en région francilienne qui n'est pourtant pas dépourvue de ces espèces.

En conséquence, cette étude a pour objectif de faire un état des lieux des hémosporidioses chez les rapaces et corvidés recueillis dans un centre de soins situé en région Île-de-France entre mai 2018 et mai 2019. Il s'agit ici de déterminer le niveau de prévalence de ces infestations ainsi que d'identifier d'éventuels facteurs associés à la maladie sur les animaux étudiés. La finalité de cette étude est alors de proposer au centre de soins des mesures limitant les probables risques auxquels les rapaces et corvidés soignés au ChuV-Faune sauvage sont confrontés via les hémosporidies.

A. Le Chuv- Faune sauvage : un centre de soins francilien

a. *Historique*

Le Chuv-Faune sauvage de l'Ecole nationale vétérinaire d'Alfort a pour but de soigner et réhabiliter la faune sauvage locale.

Initialement créée à l'EnvA en 1987 sous l'impulsion de deux étudiants passionnés d'ornithologie et du professeur Jean-François Courreau, chef du service de zootechnie, le centre ne prenait à l'époque en charge que les oiseaux. En 1993, le centre est officiellement reconnu par l'école comme nouveau service et devient la Clinique Faune Sauvage (CFS). Entre 1995 et 1997, le centre s'agrandit en installant des volières sur le site de l'école et propose un programme d'enseignement optionnel en faune sauvage pour les étudiants. En 1998, le centre obtient l'autorisation officielle d'ouverture par la préfecture du Val-de-Marne. En 2003, la CFS devient le CEDAF, centre d'accueil

de la faune sauvage pour s'inscrire plus largement dans le réseau de centres de sauvegarde français. Entre 2004 et 2006, le centre s'agrandit encore, tant au niveau des moyens humains que matériels. Cette croissance va de pair avec l'augmentation d'activité du centre, qui dépasse le millier d'animaux accueillis par an en 2010. Ce chiffre ne cessera de croître et dépasse les 7000 animaux en 2021. La période 2012-2014 marque une transition dans la gestion du centre : l'école, sous contrainte de restrictions budgétaires, ne peut plus assurer la totalité de la gestion financière du CEDAF. Pour éviter la disparition du centre, l'association Faune Alfort est créée en 2013 et permet d'assurer une partie importante des dépenses du CEDAF. En 2017, avec plus de 5000 animaux accueillis, les installations du CEDAF sont proches de la saturation. Grâce à une collecte de dons, le centre peut s'étendre en 2019 sur 2 nouveaux sites hors de l'école : le centre d'élevage de juvéniles à Chennevières sur Marne et le centre de réhabilitation de Mandre les Roses. En 2020 en conséquence du programme de rénovation immobilière en cours sur l'école, le CEDAF s'installe dans un nouveau bâtiment et devient le ChuV-Faune sauvage. En 2021, le site de Mandres-les-Roses s'agrandit et le site de Chennevières est abandonné (Faune Alfort, s. d.).

b. *Fonctionnement du centre*

L'accueil et les soins de plusieurs milliers d'animaux sauvages par an représentent une quantité de travail considérable. Le travail de plusieurs salariés (vétérinaires, soigneurs, administrateurs) ainsi que l'investissement de nombreux bénévoles, étudiants et stagiaires rend possible la prise en charge des animaux en détresse.

D'un point de vue financier, le praticien hospitalier, un deuxième vétérinaire d'appoint, les médicaments, l'oxygène, les installations, l'eau, l'électricité, le chauffage et la société de nettoyage sont financés par l'EnvA. L'association Faune Alfort finance le reste nécessaire au fonctionnement.

En 2019, le centre de soins se divise en trois sites : le ChuV-Faune sauvage à l'EnvA dans les locaux du nouveau bâtiment Nocard, le centre d'élevage des juvéniles à Chennevières sur Marne et le centre de réhabilitation à Mandres les Roses. Les deux derniers sites dépendent intégralement de l'association Faune Alfort. Le maintien du ChuV-Faune sauvage sur le site de l'école vétérinaire permet d'une part de proposer aux étudiants une offre de formation supplémentaire et d'autre part d'être intégré au fonctionnement de l'école vétérinaire possédant de nombreux outils diagnostiques et où travaillent aussi une communauté d'enseignants chercheurs.

B. Accueil des rapaces et corvidés au ChuV-Faune Sauvage

Après l'arrivée de l'animal apporté par un découvreur, il est pris en charge par le Chuv-FS.

a. *Examen clinique*

Une fois arrivé à l'EnvA, les animaux sont transférés à l'infirmerie du Chuv-FS pour leur examen par un vétérinaire ou un étudiant moniteur qui note le compte-rendu de l'examen clinique dans le dossier de l'animal ainsi que les consignes de soins à apporter par le reste de l'équipe. Ce dossier contient l'ensemble des informations concernant l'animal et permet de standardiser les examens cliniques, réalisés par plusieurs personnes (vétérinaires, moniteurs, étudiants).

b. *Installations : hospitalisations et réhabilitations*

Suite à l'examen clinique d'entrée, l'animal est installé dans le secteur adéquat : en salle d'hospitalisation rapace si nécessaire, ou transféré au centre d'élevage de juvéniles à Chennevières sur Marne, ou en volière de réhabilitation à Mandres-les-Roses. Le transfert sur un autre site ne se fait qu'après avoir soigné les éventuelles lésions et, au plus vite, après 2 ou 3 jours d'hospitalisation au Chuv-FS pour permettre d'évaluer son état.

Après son séjour dans l'un des centres de réhabilitation, l'animal est évalué du point de vue de son état clinique, sa capacité de vol et son autonomie alimentaire. Dans ces cas, l'oiseau est relâché à proximité du lieu où il est été découvert, ou dans un endroit adapté à son espèce.

2. Matériels et méthodes

Cette étude a pu être menée grâce à la collaboration entre le laboratoire de Parasitologie et Mycologie du Biopôle et le ChuV-Faune sauvage de l'Ecole nationale vétérinaire d'Alfort.

A. Hôtes étudiés

Cette étude s'est centrée sur les rapaces et corvidés, dont les données épidémiologiques vis-à-vis des hémospories sont insuffisantes. Les animaux prélevés étaient arrivés au Chuv-FS entre mai 2018 et mai 2019.

Au total, 231 animaux ont subi un prélèvement sanguin. Seulement 181 lames ont été analysées (pertes, et 2 non identifiées), donc 50 animaux ont été sortis de la cohorte. Le tableau 6 présente les effectifs de la cohorte par espèce.

Tableau 6 : Individus prélevés par espèce

Espèces	Nombre	Non analysés	Réellement analysés
Accipitriformes			
Buse variable (<i>Buteo buteo</i>)	8	3	5
Épervier d'Europe (<i>Accipiter nisus</i>)	6	2	4
Autour des palombes (<i>Accipiter gentilis</i>)	1	1	0
Falconiformes			
Faucon crécerelle (<i>Falco tinnunculus</i>)	12	3	9
Faucon hobereau (<i>Falco subbuteo</i>)	5	2	3
Strigiformes			
Chouette hulotte (<i>Strix aluco</i>)	14	1	13
Effraie des clochers (<i>Tyto alba</i>)	4	1	3
Corvidés			
Corneille noire (<i>Corvus corone</i>)	74	12	62
Pie bavarde (<i>Pica pica</i>)	81	14	67
Geai des chênes (<i>Garrulus glandarius</i>)	23	3	20
Corbeau freux (<i>Corvus frugilegus</i>)	1	0	1

B. Prélèvements sanguins

Les prélèvements sanguins ont été majoritairement réalisés à la veine alaire, toujours sur animal vivant, vigile et dont l'état de santé permettait de supporter une prise de sang. Le délai entre l'arrivée de l'oiseau au centre de soins et le prélèvement varie entre 0 et 9 jours.

Le protocole détaillé des prélèvements et réalisation des frottis est présenté en Annexe 2.

Les tubes EDTA sont conservés au réfrigérateur à +4°C. Les lames de frottis sont colorées le jour même du prélèvement au RAL 555 (principalement utilisée dans cette étude) du laboratoire du centre de soins ou au MGG au Biopôle de l'EnvA. Les frottis sont ensuite conservés dans des boîtes portes-lames, dans un lieu sec à l'abri de la chaleur et de la lumière.

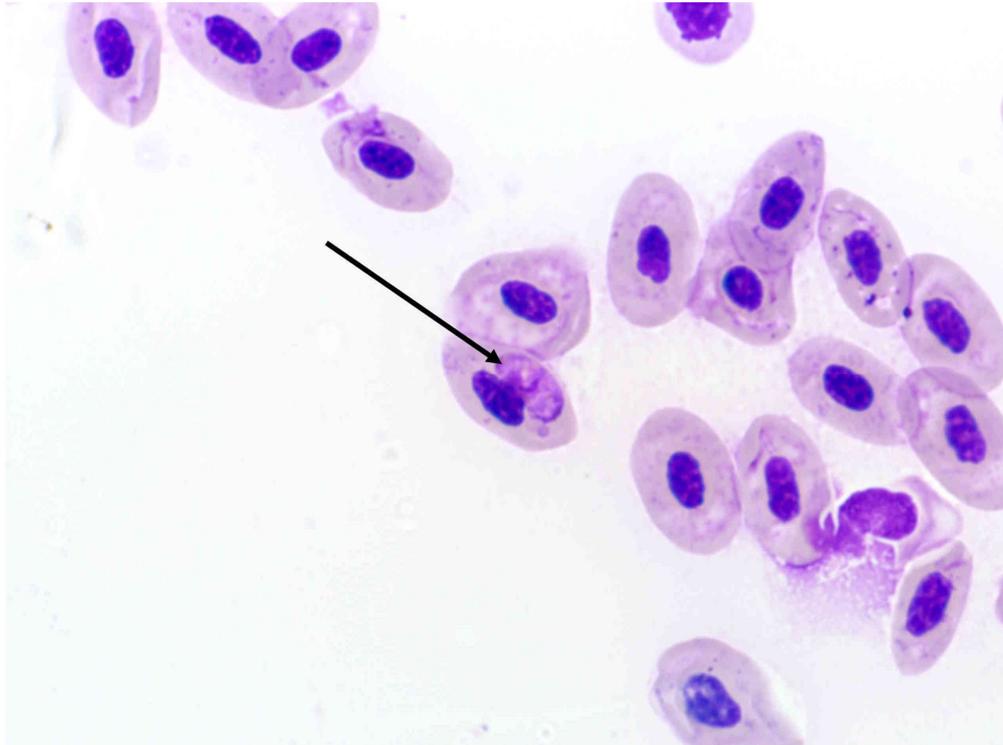
C. Analyse des prélèvements

Les frottis sont observés au microscope optique au grossissement x40 et x100.

La qualité du frottis devait être suffisante pour permettre l'observation et l'identification des cellules sanguines et des parasites. Les critères morphologiques pour la distinction des différents genres et stades d'hémosporidies sont nombreux : la taille des parasites, leur cytoplasme (couleur, présence de vacuoles, présence d'hémozoïne), leur comportement par rapport au noyau érythrocytaire (déplacement, condensation, modification de la forme et taille) ainsi que leur impact sur la forme et la taille de l'érythrocyte (atrophie, arrondissement).

Les gamétocytes du genre *Haemoproteus* (figure 27) ne peuvent être observés que dans le sang périphérique des oiseaux et ont une forme variant entre un anneau et un croissant allongé encerclant partiellement le noyau de l'érythrocyte. Les gamétocytes matures occupent souvent plus de la moitié du cytoplasme des érythrocytes infestés, qui ont en conséquence une taille plus importante que les autres, sans pour autant déplacer fortement leur noyau, qui n'est jamais repoussé. Ils contiennent une hémozoïne brunâtre ou noirâtre. Les macrogamètes et microgamètes extraérythrocytaires peuvent être aussi observés occasionnellement sur des frottis réalisés tardivement après le prélèvement sanguin. Les macrogamètes ont une forme ronde et un aspect semblable aux gamétocytes intraérythrocytaires tandis que les microgamètes sont fusiformes. Il est aussi possible, bien que rare, d'observer des ookinètes résultant de la fusion d'un macrogamète avec un microgamète. De plus, il est difficile de distinguer les ookinètes appartenant au genre *Haemoproteus* de ceux du genre *Plasmodium* (Campbell, 2015).

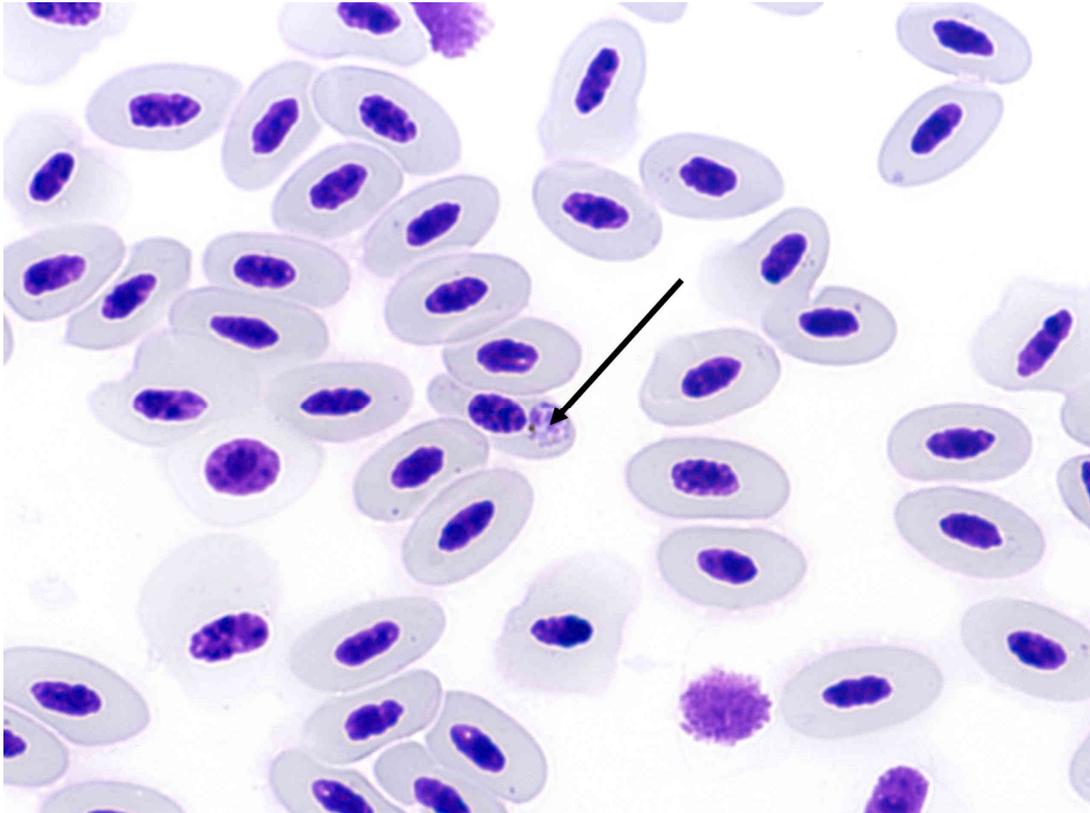
Figure 27 : Observation au microscope x100 d'un érythrocyte infesté par *Haemoproteus* (flèche noire) sur un frottis sanguin issu d'une Chouette hulotte (*Strix aluco*) et coloré au MGG (©Veronica RISCO-CASTILLO, Laboratoire de Parasitologie, Biopôle de l'EnvA)



Une des clés pour distinguer *Plasmodium* du genre *Haemoproteus* sur les frottis sanguins est la présence de schizogonie dans le sang périphérique et notamment au sein des thrombocytes et leucocytes chez *Plasmodium* : des schizontes et trophozoïtes de *Plasmodium* peuvent être observés. Les schizontes apparaissent ronds ou ovales, avec de l'hémozoïne et contenant les mérozoïtes. Les trophozoïtes ont une forme amiboïde contenant une large vacuole repoussant le noyau du parasite en marge des cellules.

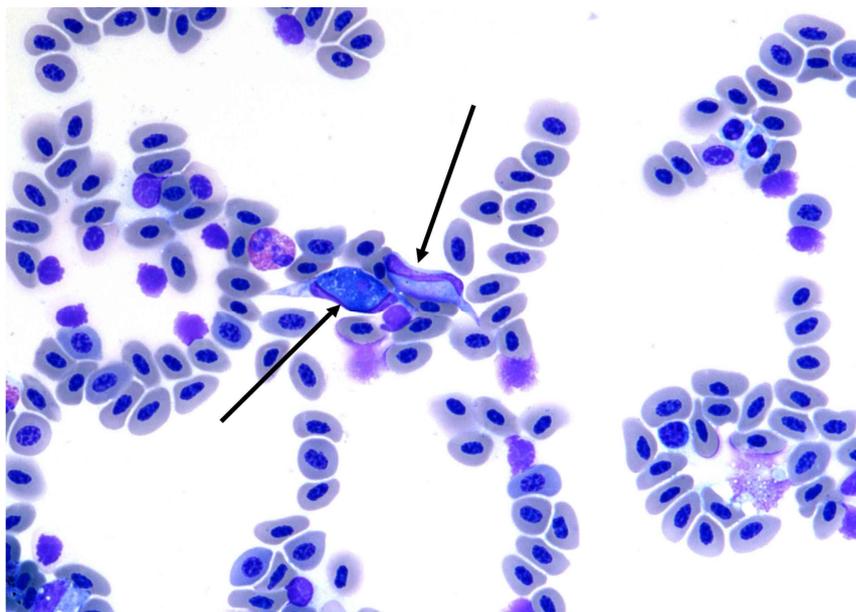
Aussi, certains gamétocytes de *Plasmodium* ont une forme ronde et causent un déplacement marqué du noyau des érythrocytes infestés, ce qui n'est pas le cas des gamétocytes d'*Haemoproteus*. Mais d'autres espèces de *Plasmodium* ont des gamétocytes de forme allongée ne déplaçant pas le noyau des érythrocytes (figure 28), et donc peu différenciables de gamétocytes d'*Haemoproteus* (Campbell, 2015).

Figure 28 : Observation au microscope x100 d'un érythrocyte infesté par *Plasmodium* (flèche noire) sur un frottis sanguin issu d'une Pie bavarde (*Pica pica*) et coloré au MGG (©Veronica RISCO-CASTILLO, Laboratoire de Parasitologie, Biopôle de l'EnvA)



Pareillement à *Haemoproteus*, les gamétocytes appartenant au genre *Leucocytozoon* ne peuvent être observés que sur du sang périphérique. Ils ne produisent cependant pas de pigments et leur forme est différente des deux genres précédents : leur taille très imposante modifie de manière importante la cellule infestée en l'allongeant et la distordant. Deux noyaux sont observés dans les cellules infestées : celui de la cellule-hôte, plus foncé et repoussé en marge, et le noyau du parasite, rose pâle (figure 29). L'observation des gamètes de *Leucocytozoon* dans le sang périphérique est variable selon l'espèce de *Leucocytozoon*, c'est le cas des gamétocytes de *L. sakharoffi* chez les corvidés. Ils ont alors une forme ronde (Campbell, 2015).

Figure 29 : Observation au microscope x100 d'érythrocytes infestés par *Leucocytozoon* (flèches noires) sur un frottis sanguin issu d'une Chouette hulotte (*Strix aluco*) et coloré au MGG (©Veronica RISCO-CASTILLO, Laboratoire de Parasitologie, Biopôle de l'EnvA)



La classification du degré d'infestation se fait selon les critères suivants (mis en place par le laboratoire de parasitologie de l'Ecole nationale vétérinaire d'Alfort (Biopôle Alfort-EnvA) pour cette étude).

Un résultat négatif correspond à l'absence de parasites observée sur le frottis. Si tel est le cas, la deuxième lame correspondant au même individu est aussi observée pour confirmer.

Un résultat positif correspond à l'observation d'au moins un parasite sur l'ensemble de la lame. Parmi les résultats positifs, une classification selon le degré d'infestation est réalisée selon le nombre de parasites observés par champs (sur 20 champs). Si le nombre de parasite est très faible, l'ensemble de la lame est observé. Le tableau 7 résume les critères utilisés pour la lecture des frottis.

Tableau 7 : Critères pour la lecture des frottis

Lecture	Degré de parasitémie	Parasitémie
Aucun parasite sur l'ensemble des 2 lames	nul	0%
Moins de 9 parasites observés sur 20 champs à l'objectif X100	faible	<0,08 %
Entre 9 et 20 parasites observés sur 20 champs à l'objectif X100	moyenne	0,08-0,04 %
Au-delà de 21 parasites observés sur 20 champs à l'objectif X100	forte	> 0,4 %

D. Gestion des données

Chaque animal accueilli au centre de soins de la faune sauvage de l'École nationale vétérinaire d'Alfort (Chuv-FS) est identifié grâce à un numéro unique présent sur le registre, sur la fiche de renseignement anamnestic-clinique et sur le box où l'animal est hospitalisé. Ce numéro a aussi servi à identifier les prélèvements et frottis dans cette étude. L'ensemble des informations concernant chaque oiseau prélevé ainsi que les résultats de lecture de frottis sont saisis dans un tableau sous format excel, chaque ligne correspondant à un individu.

Parmi les informations relevées dans le tableau excel se trouvent :

- les données environnementales : numéro d'identification unique, date d'arrivée au Chuv-FS, saison associée, lieu de découverte (département et commune)
- les données biologiques : espèce, classe d'âge et poids
- les données cliniques : cause d'entrée, devenir, examen clinique
- les données diagnostiques : date de prélèvements, date de lecture de frottis et résultats de leur lecture

Afin de faciliter l'analyse des données, une attention particulière est donnée au remplissage rigoureux du tableau pour avoir une base de donnée la plus homogène possible : le poids est noté sans unité dans la cellule, les appellations multiples sont évitées, etc.

Aussi, des colonnes supplémentaires ont été ajoutées aux données non présentes initialement, comme le délai entre l'arrivée de l'animal et la réalisation du prélèvement sanguin.

Enfin, les colonnes de résultats ont été séparées par genre de parasite puis une colonne de synthèse permettait de les regrouper pour détecter d'éventuelles co-infestations.

E. Analyse des données

a. *Analyse statistique descriptive*

Les critères retenus pour l'analyse descriptive des résultats ont été l'espèce, la date d'arrivée en centre de soins, la classe d'âge (juvénile dépendant, juvénile indépendant ou adulte), l'origine géographique (lieu de découverte), l'examen clinique, le devenir et le degré d'infestation. Le poids n'a pas été retenu pour l'analyse, ainsi que la cause d'entrée qui n'est pas toujours identifiable par la variabilité du remplissage des dossiers par les découvreurs.

L'analyse descriptive a été réalisée grâce au logiciel MS Excel 2016 et la construction de cartes géographiques grâce à l'outil 3D Maps Excel et sont centrées sur la région francilienne.

Une description globale de l'échantillon a d'abord été réalisée : les différentes espèces prélevées et leur effectif respectif ont été présentés. La présentation des résultats a ensuite été scindée pour décrire séparément les deux groupes d'espèces de cette étude, les rapaces puis les corvidés : une description générale de chaque groupe d'espèces, puis de leur infestation aux hémospories en séparant par genre, et enfin une description du degré de parasitémie par genre d'hémosporie. La description des co-infestations a été réalisée uniquement pour les corvidés car aucun cas ne concernait les rapaces.

b. Analyse statistique inférentielle

Après leur analyse descriptive, les données ont été exploitées par catégories, qui, par le nombre d'individus représenté, semblait avoir une influence sur d'autres. Des tableaux de contingence (Annexe 3) ont été construits pour permettre de déterminer si ces catégories pourraient être associées au taux de relâchés au Chuv-FS, au risque d'hémosporidiose tous genres confondus, ou à un type d'hémo-parasitisme en particulier. Les données sur le degré d'infestation n'ont pas suggéré des différences entre les groupes étudiés, il a donc été décidé de ne pas réaliser d'analyse statistique les concernant.

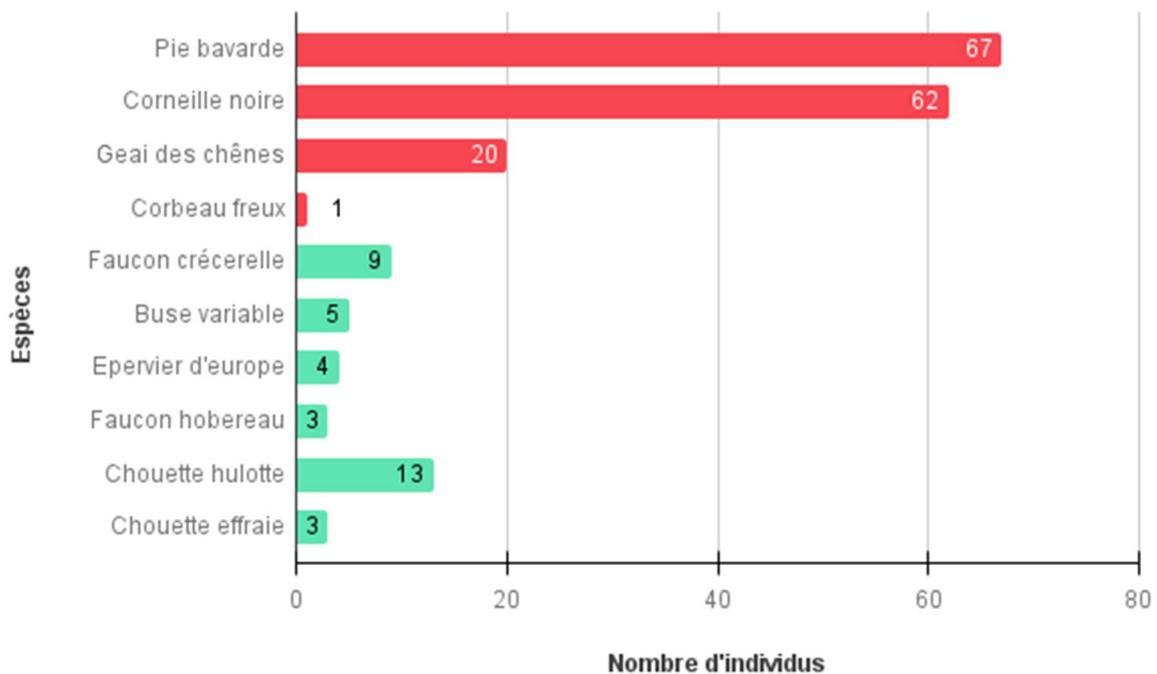
Pour ceci, le site BiostaTGV a permis de réaliser les analyses statistiques voulues. Compte tenu des effectifs de petite taille (familles avec moins de 10 individus), le test exact de Fisher était le test statistique le plus adapté à la majorité des cas de cette étude. Si les effectifs le permettaient, le test du χ^2 a été réalisé. Ces tests statistiques permettent de déterminer si une différence de fréquence d'apparition d'un caractère binaire (dans cette étude, le fait d'être infesté aux hémosporidies ou non) au sein de deux groupes de populations au sein de l'échantillon est liée au hasard (hypothèse nulle) ou est statistiquement significative, c'est-à-dire que la différence entre les groupes est trop importante pour être due à un biais d'échantillonnage. Leurs utilisations et interprétations sont semblables, seul le calcul du degré de signification diffère : le test exact de Fisher utilise la loi binomiale tandis que le χ^2 utilise une loi multinomiale. Il a été retenu que si $p < 0,05$, p permettant de mesurer la significativité statistique d'un résultat, alors la différence de fréquence d'apparition d'un caractère au sein de deux groupes pouvait être considérée comme significative.

3. Résultats

A. Description de l'échantillon global

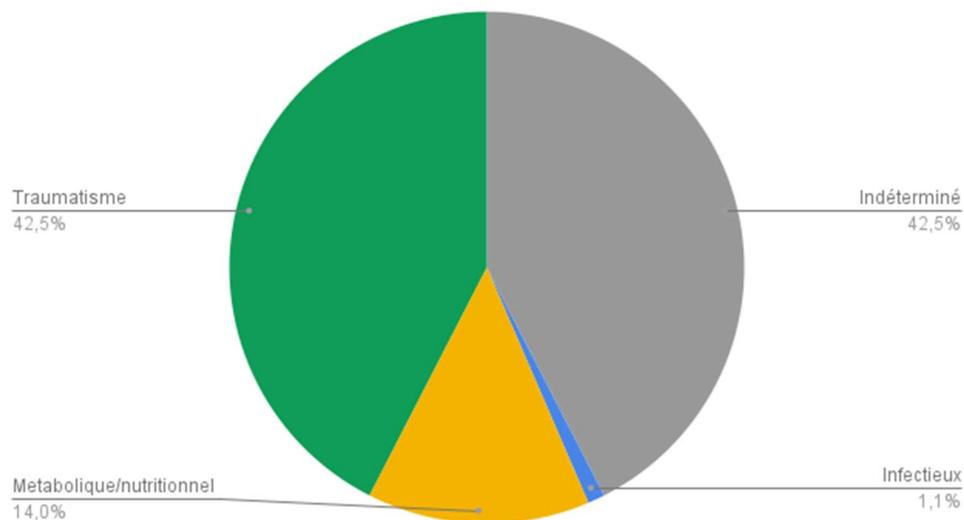
Au total, 187 individus ont été étudiés entre le 18/05/2018 et le 06/06/2019, soit pendant environ un an. Les 37 rapaces appartiennent à 6 espèces différentes : 4 espèces de rapaces diurnes, 2 espèces de rapaces nocturnes. Les 150 corvidés appartiennent à 4 espèces distinctes. La figure 30 montre la répartition par espèces des rapaces et corvidés de la cohorte.

Figure 30 : Nombre d'individus prélevés par espèce



Les résultats de l'examen clinique ont été regroupés par catégories d'affections, comme illustré en figure 31 : traumatique (42,5 %), métabolique/nutritionnelle (14 %) et infectieuse (1,1 %).

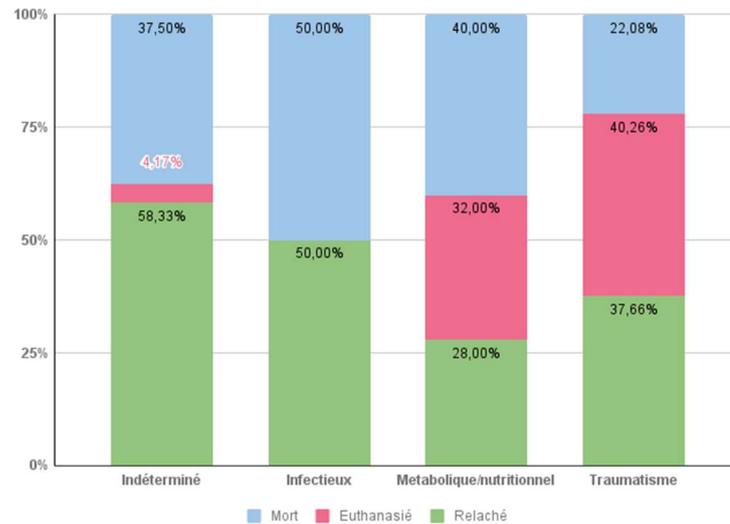
Figure 31 : Répartition des résultats d'examen clinique au Chuv-FS des rapaces et corvidés prélevés par catégorie d'affection



On constate (figure 32) que le taux de relâché est inférieur pour les individus ayant une affection métabolique/nutritionnelle (28 %), et pour les individus ayant une affection d'origine traumatique (38 %) que pour les autres types d'affections que pour les autres (au dessus de 50 % de taux de relâché). Il existe une association significative entre une cause d'entrée d'origine traumatique et un taux de relâché moins important (Test du Chi² avec $p=0,00003 < 0,05$, un intervalle de confiance à 95 % [0,22 ; 0,78] et un risque d'erreur de première espèce $\alpha = 5\%$). Une telle association n'a

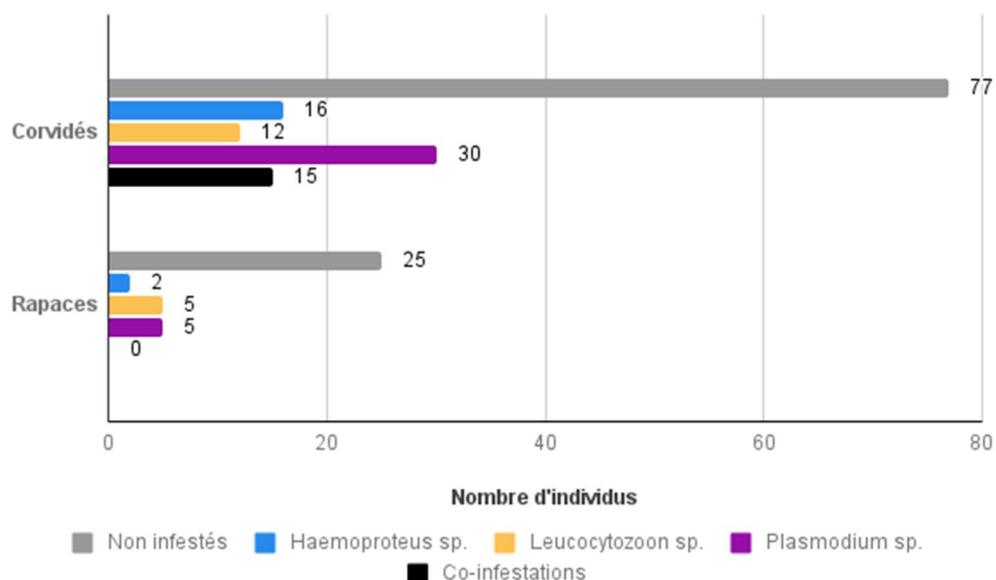
pas été retrouvée concernant une affection d'origine métabolique/nutritionnelle et un taux de relâché moins important ($p=0,18>0,05$ avec un risque d'erreur de seconde espèce inconnu).

Figure 32 : Répartition du devenir des rapaces et corvidés prélevés en fonction de leur cause d'entrée



La figure 33 illustre la répartition des infestations par genre chez les rapaces d'une part et chez les corvidés d'autre part. Les rapaces infestés ne présentent pas un type d'infestation majoritaire ; au contraire, les corvidés étaient plus fréquemment infestés par *Plasmodium* que par d'autres hémospories. En revanche, il n'existe pas de différence significative entre l'infestation à *Plasmodium* chez les corvidés et l'infestation à *Plasmodium* chez les rapaces (Test du Chi² avec $p = 0,09>0,05$ avec un risque d'erreur inconnu). Les cas de co-infestations ont été retrouvés exclusivement chez ces derniers dans cette étude.

Figure 33 : Nombre de rapaces et corvidés par type d'infestation (infestation simple par genre d'hémosporie et co-infestation)



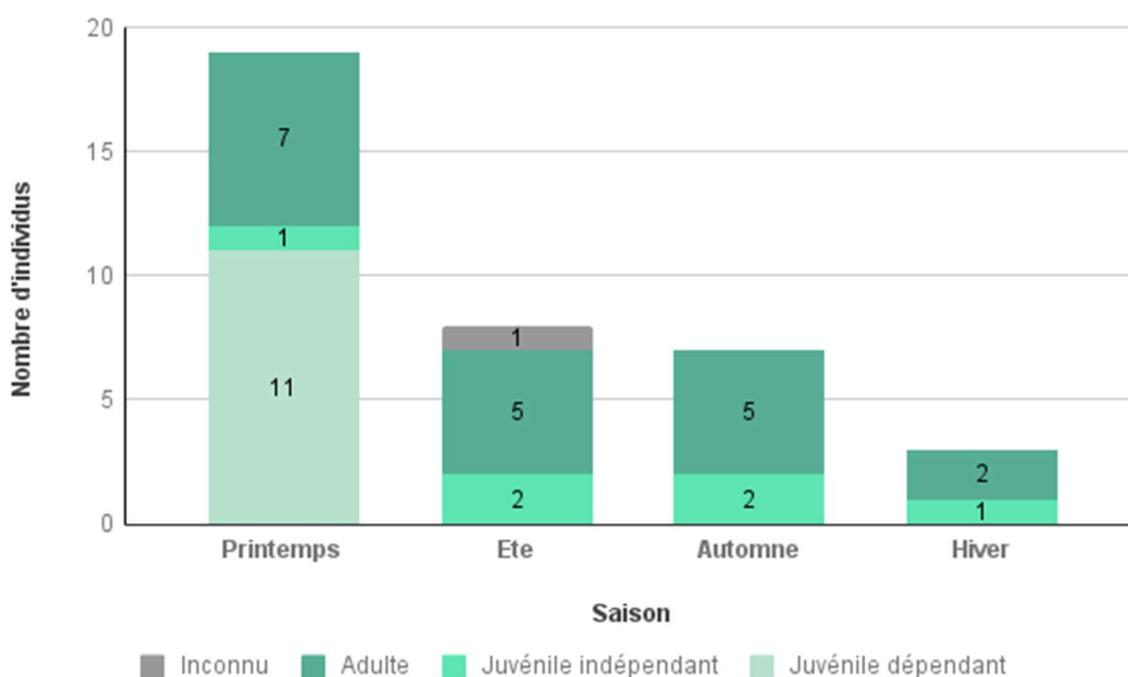
B. Résultats épidémiologiques chez les rapaces

Au total, 37 rapaces appartenant à 6 espèces différentes ont été étudiés lors de leur passage au Chuv-FS pendant la période de prélèvement. On retrouve ainsi le faucon crécerelle (9), la buse variable (5), l'épervier d'Europe (4) et le faucon hobereau (3) pour les rapaces diurnes. Seules deux espèces de rapaces nocturnes sont représentées dans cette étude : la chouette hulotte (13) et l'effraie des clochers (3).

Parmi ces individus, il y a quasiment autant d'adultes (19) que de juvéniles (17).

L'effectif de rapaces accueillis variait en fonction de la saison (figure 34). Le printemps est la période où davantage de rapaces ont été admis au centre de soins, en particulier pour les juvéniles dépendants.

Figure 34 : Répartition des rapaces accueillis au Chuv-FS en fonction de la saison et de la classe d'âge

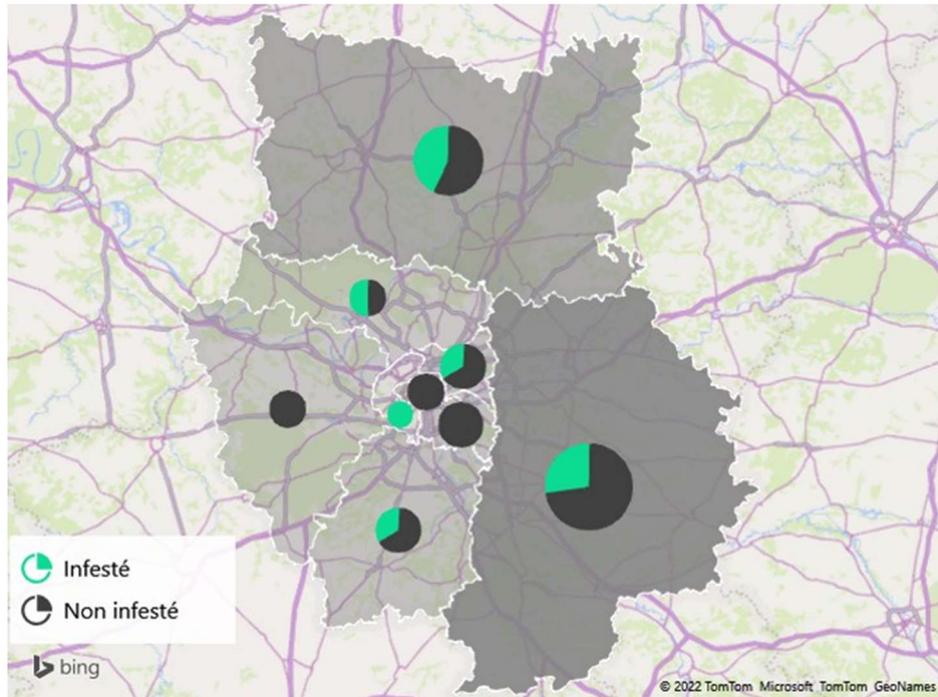


Parmi les rapaces étudiés, 67,6 % étaient considérés comme non infestés, c'est-à-dire qu'aucune hémospordie n'a été observée sur le frottis correspondant.

L'analyse par le test de Fisher n'a pas montré d'association significative entre la saison d'arrivée au Chuv-FS et l'infestation aux hémospordies ($p = 0,8$ avec un risque d'erreur inconnu).

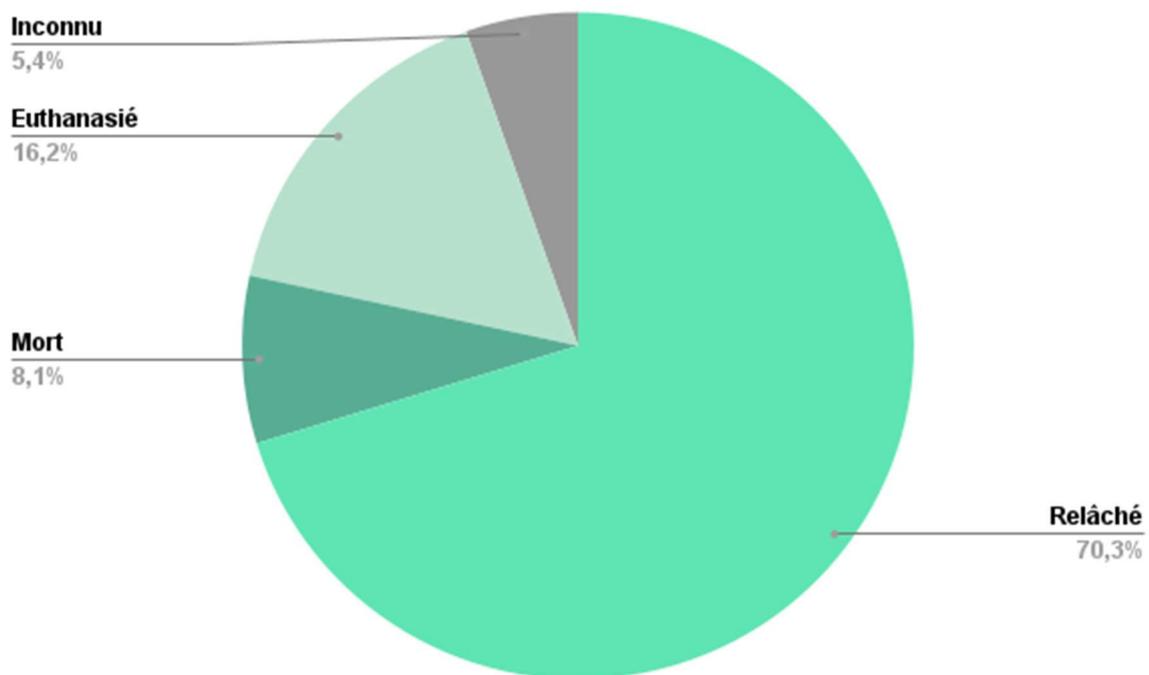
Les rapaces de cette étude provenaient de onze départements différents (figure 35) : la Nièvre (58), l'Oise (60), Paris (75), la Seine-et-Marne (77), les Yvelines (78), les Deux-Sèvres (79), l'Essonne (91), les Hauts-de-Seine (92), la Seine-Saint-Denis (93), le Val-de-Marne (94) et le Val-d'Oise (95). Davantage de rapaces provenaient de la Seine-et-Marne (11/37) et de l'Oise (7/37). Cependant, les analyses statistiques n'ont pas montré d'association significative entre le département d'origine et l'infestation aux hémospordies ($p = 0,45$ avec un risque d'erreur inconnu).

Figure 35 : Origine géographique des rapaces prélevés et infestation



Le devenir de la plupart des rapaces étudiés étaient connus : la majorité a été relâchée (26 individus), tandis que 3 individus sont décédés en soins et 6 ont été euthanasiés. Le devenir de 2 rapaces reste inconnu. Le pourcentage de rapaces relâchés est quasiment le même (autour de 72 %), qu'ils soient infectés ou non. Le test exact de Fisher n'a pas montré de différence significative entre le devenir et l'infestation aux hémospories chez les rapaces ($p = 0,68 > 0,05$ avec un risque d'erreur inconnu).

Figure 36 : Répartition des rapaces en fonction de leur devenir



a. Analyse épidémiologique des infestations aux hémospordies

Parmi des rapaces infestés (figure 37), *Leucocytozoon* et *Plasmodium* sont les genres les plus représentés (41,6 % des cas d'infestations). Les infestations à *Haemoproteus* représentent 16,6 % des rapaces infestés.

Le test de Fisher n'a pas montré de différences significatives d'infestation entre les classes d'âges chez les rapaces ($p=0,9 > 0,05$ avec un risque d'erreur inconnu).

Le tableau 8 présente le devenir des rapaces en fonction du type d'infestation. La totalité des rapaces infestés par *Haemoproteus* ou par *Leucocytozoon* a été relâchée (7 animaux).

Figure 37 : Répartition des infestations par genre chez les différentes espèces de rapaces

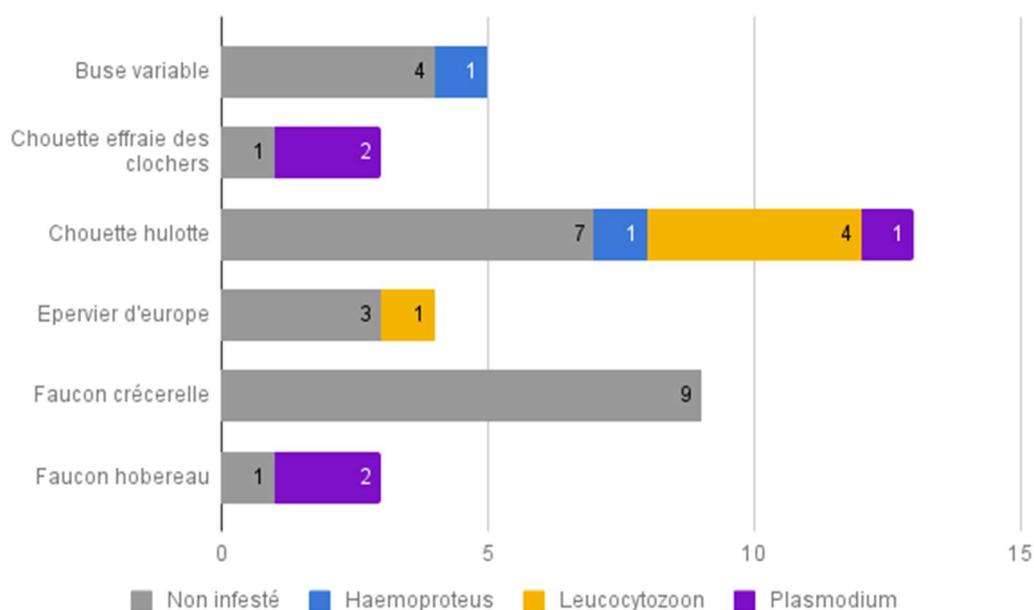
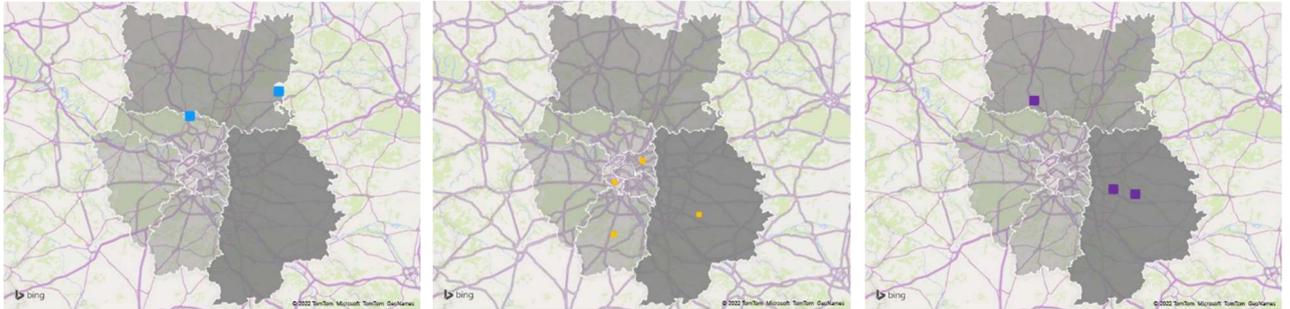


Tableau 8 : Devenir des rapaces en fonction du type d'infestation

Type d'infestation	Relâché n (%)	Euthanasie n (%)	Mort spontanée n (%)	Inconnu n (%)
<i>Haemoproteus sp</i>	2 (100 %)	0 (0 %)	0 (0 %)	0 (0 %)
<i>Leucocytozoon sp</i>	5 (100 %)	0 (0 %)	0 (0 %)	0 (0 %)
<i>Plasmodium sp</i>	1 (20 %)	2 (40 %)	0 (0 %)	2 (40 %)
Non infestés	18 (72 %)	4 (16 %)	3 (12 %)	0 (0 %)

La figure 38 illustre l'origine géographique des rapaces infestés par genre d'hémosporidie.

Figure 38 : Origine des rapaces infestés par *Haemoproteus* sp (bleu), *Leucocytozoon* sp (jaune) et *Plasmodium* sp (violet)



b. Infestation à *Haemoproteus* spp.

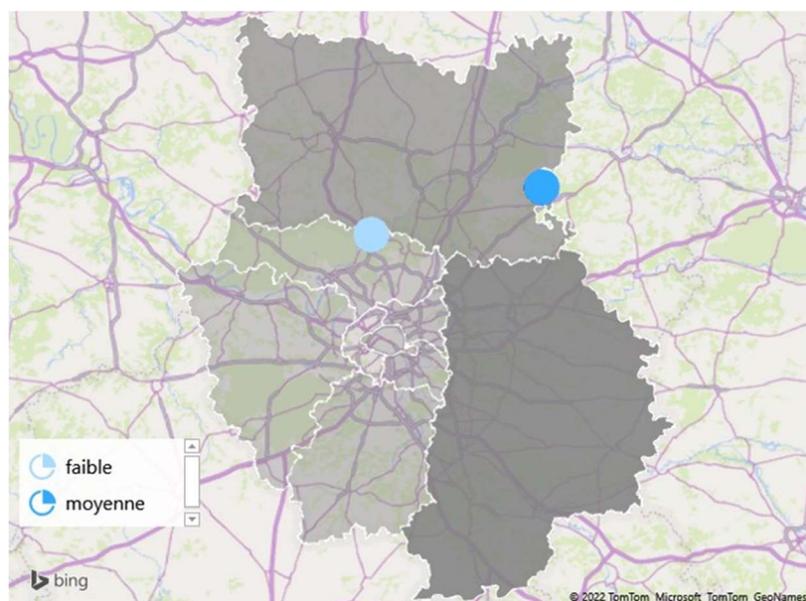
Parmi les rapaces étudiés, l'infection à *Haemoproteus* ne concerne que deux espèces : la buse variable (1 infesté / 5 individus) et la chouette hulotte (1 infesté / 13 individus).

La chouette hulotte et la buse variable infestées par *Haemoproteus* provenaient respectivement des départements de l'Oise (60) et du Val-d'Oise (95) qui sont limitrophes (figure 39).

Les deux rapaces infestés par *Haemoproteus* étaient tous adultes et sont arrivés à l'été et à l'automne.

La buse variable infestée, arrivée pendant l'automne, était faiblement infestée. La chouette hulotte concernée par l'infestation était moyennement infestée à *Haemoproteus*.

Figure 39 : Répartition géographique du degré d'infestation des rapaces infestés par *Haemoproteus*



c. Infestation à *Leucocytozoon* spp

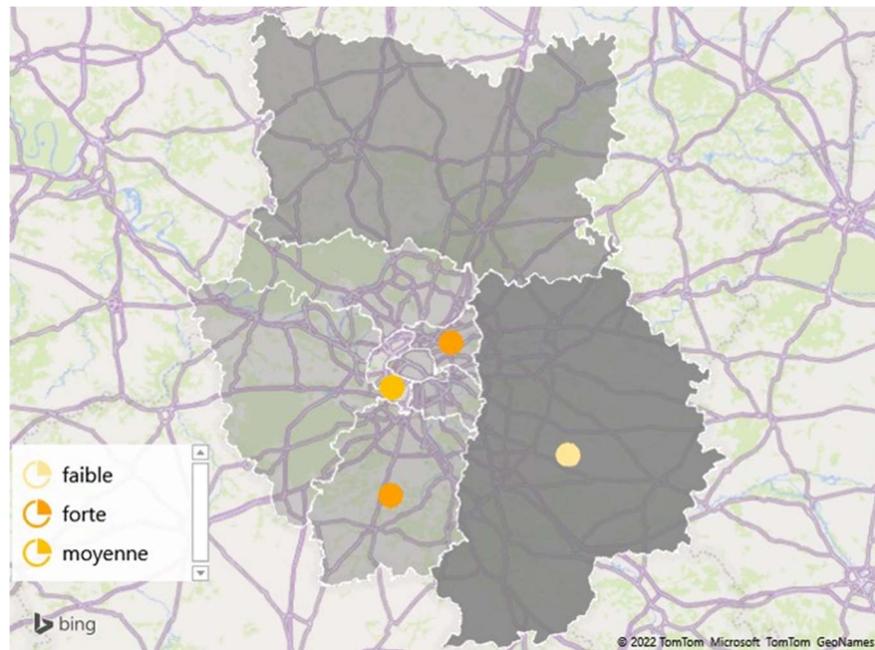
Parmi les espèces de rapaces étudiées, l'infestation à *Leucocytozoon* ne concernait que l'épervier d'Europe (1 infesté / 4 individus) et la chouette hulotte (4 infestés / 13 individus).

Les individus infestés provenaient chacun d'un département différent (figure 40) : la Seine-et-Marne (77), les Deux-Sèvres (79), l'Essonne (91), les Hauts-de-Seine (92) et la Seine-Saint-Denis (93).

Les 5 rapaces infestés à *Leucocytozoon* étaient des juvéniles dépendants (3 individus) ou indépendants (2 individus). Ils ont été majoritairement accueillis au printemps (4 animaux sur 5).

Parmi les cas d'infestations à *Leucocytozoon*, un individu était faiblement parasité, deux individus étaient moyennement parasités et deux individus étaient fortement parasités. L'individu faiblement parasité a été accueilli en automne tandis que les individus plus fortement parasités sont arrivés au centre de soins au printemps.

Figure 40 : Répartition géographique du degré d'infestation des rapaces infestés par *Leucocytozoon*



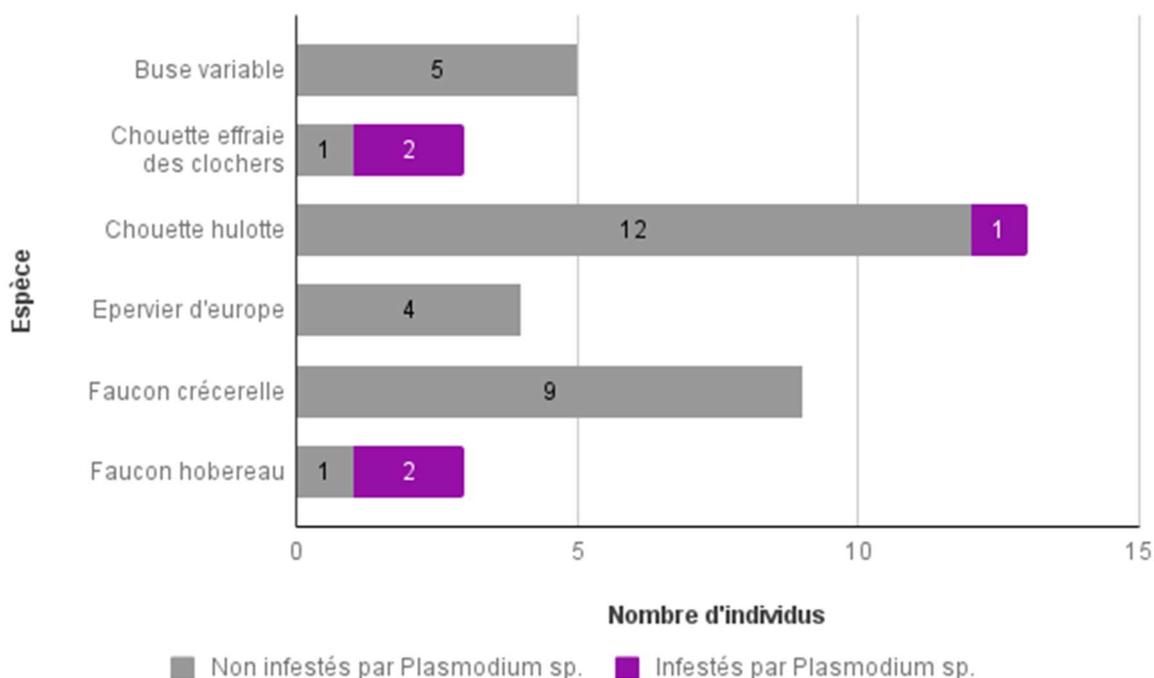
L'individu faiblement parasité était un épervier d'Europe, et les autres étaient des chouettes hulottes.

Les juvéniles dépendants ont présenté un degré de parasitémie moyen à fort tandis que le degré de parasitémie chez les juvéniles indépendants était soit faible soit fort.

d. Infestation à *Plasmodium* spp

Parmi les espèces de rapaces étudiées, 3 étaient concernées par l'infestation à *Plasmodium* (figure 41) : l'effraie des clochers (2 infestés / 3 individus), la chouette hulotte (1 infesté sur 13 individus) et le faucon hobereau (2 infestés / 3 individus).

Figure 41 : Infestation des rapaces par *Plasmodium* sp



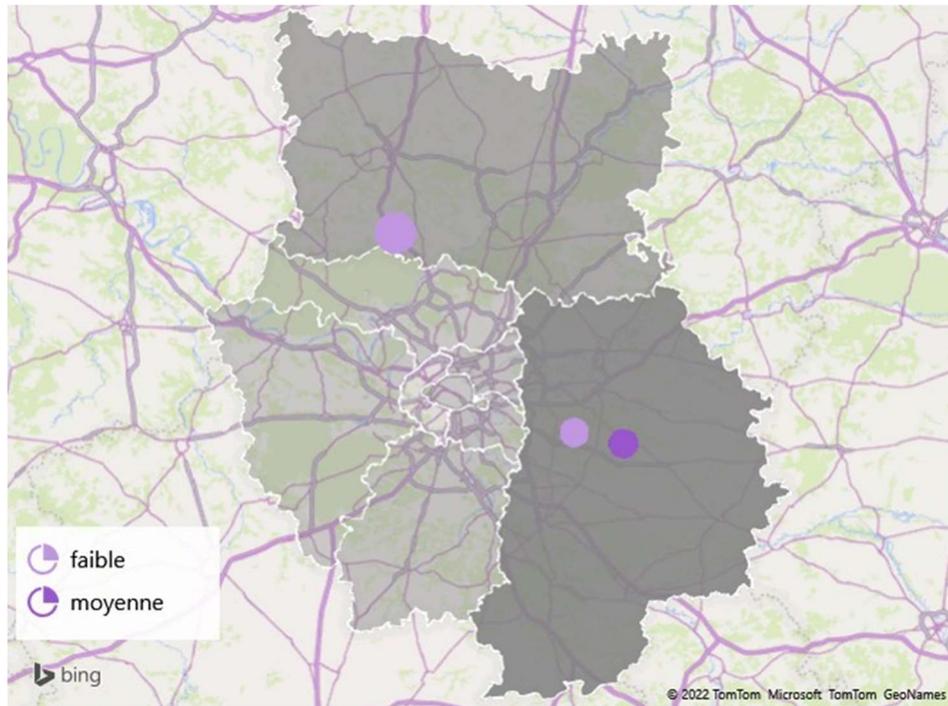
Les résultats montrent plus d'animaux parasités par *Plasmodium* parmi l'effraie des clochers et le faucon hobereau, sans pouvoir confirmer l'existence d'une association à cause du nombre réduit d'animaux. Aussi, les chouettes hulotte semblent moins sensibles à l'infestation.

L'origine des individus infestés étaient connue pour 4 d'entre eux : Sur les 5 individus infestés (figure 42), 2 individus provenaient de l'Oise (60) et 2 autres provenaient de la Seine-et-Marne (77).

La classe d'âge des individus infestés était aussi connue pour 4 d'entre eux : tous étaient adultes. Les infestés sont arrivés au printemps (3 individus) ou en été (2 individus).

La plupart des rapaces étudiés étaient faiblement parasités (4 individus sur 5 infestés) et seulement 1 individu présentait un degré de parasitémie moyen, et est arrivé en été.

Figure 42 : Répartition géographique du degré d'infestation des rapaces infestés par *Plasmodium*



Au sein de chaque espèce de rapace concernée par l'infestation à *Plasmodium*, le degré de parasitémie était homogène : les 2 faucons hobereau ainsi que les 2 effraies des clochers étaient faiblement parasités, tandis que la chouette hulotte présentait un degré de parasitémie moyen.

Les deux individus provenant de l'Oise (60) étaient faiblement parasités, tandis que ceux provenant de la Seine-et-Marne (77) étaient soit faiblement soit moyennement parasités.

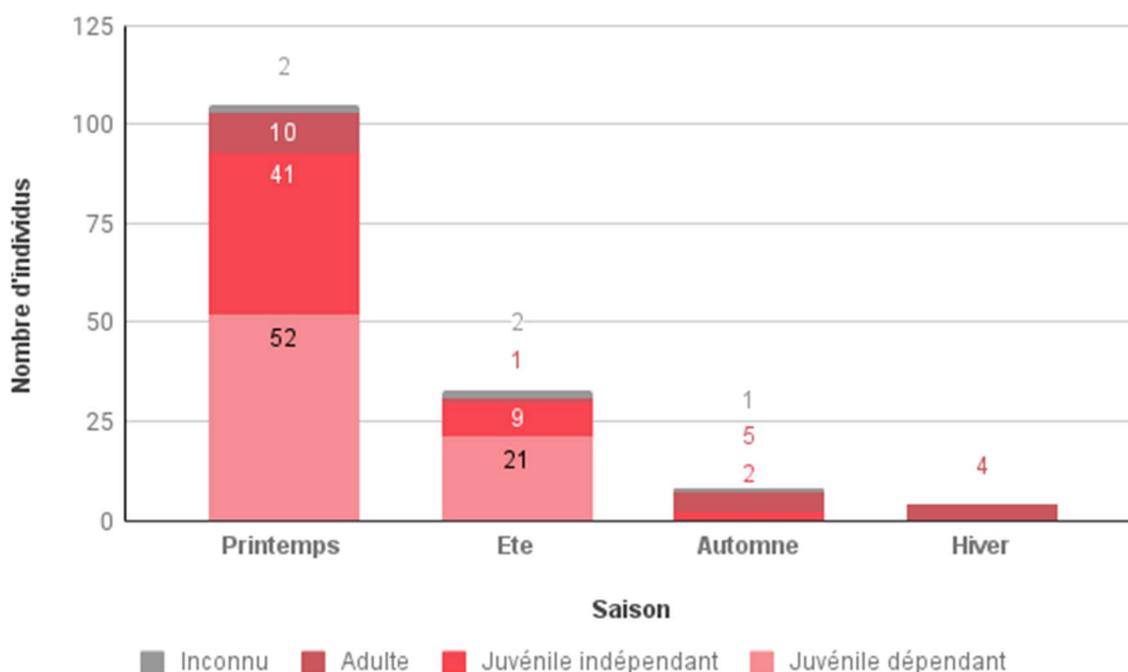
C. Résultats épidémiologiques chez les corvidés

Au total, 150 corvidés appartenant à 4 espèces différentes ont été étudiés lors de leur passage au centre de soins de la faune sauvage de l'École nationale vétérinaire d'Alfort pendant la période de prélèvement. On retrouve ainsi la pie bavarde (67), la corneille noire (62), le geai des chênes (20) et le corbeau freux (1).

Contrairement aux rapaces où les classes d'âges étaient homogènes, les adultes représentent moins de 25 % des corvidés étudiés (figure 43).

L'effectif de corvidés accueillis variait en fonction de la saison. Dans cette étude, ils ont été davantage admis pendant le printemps et l'été par rapport aux autres saisons. C'est aussi les saisons au cours desquelles les juvéniles corvidés ont été majoritairement admis.

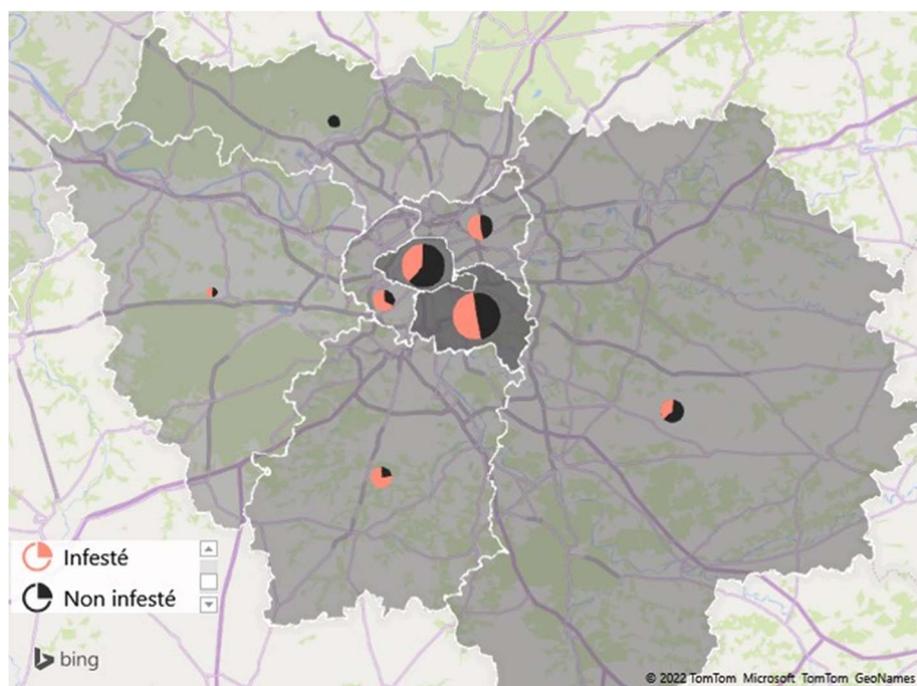
Figure 43 : Répartition des corvidés en fonction de la saison et de la classe d'âge



Les analyses statistiques ont montré une association positive significative entre l'arrivée des corvidés pendant l'été et leur infestation aux hémospodidies (Test de Fisher avec $p = 0,0007 < 0,05$ un intervalle de confiance à 95 % [1,73 ; 12,24], Odd Ratio = 4).

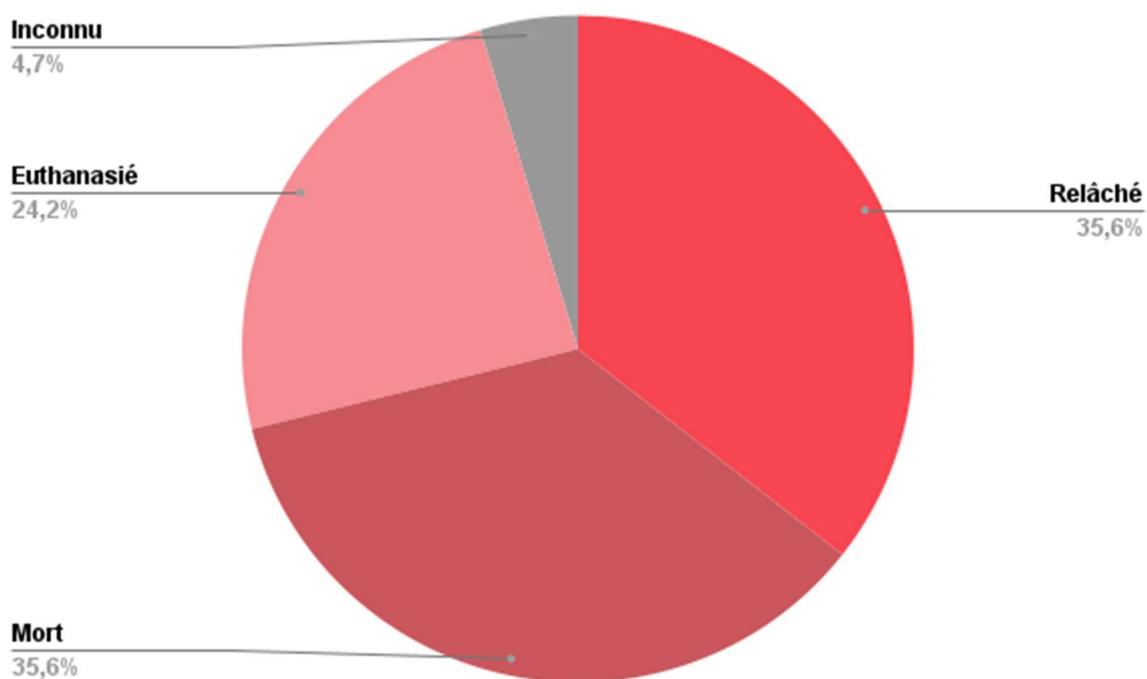
Les corvidés de cette étude provenaient de dix départements différents (figure 44) : la Côte d'Or (21), l'Eure (27), Paris (75), la Seine-et-Marne (77), les Yvelines (78), l'Essonne (91), les Hauts-de-Seine (92), la Seine-Saint-Denis (93), le Val-de-Marne (94) et le Val-d'Oise (95). Davantage de corvidés provenaient du Val-de-Marne (47/150) et de Paris (39/150).

Figure 44 : Origine géographique des corvidés et infestation



Le devenir de la plupart des corvidés étudiés était connu (figure 45) : 53 individus ont été relâchés, 36 sont décédés en soins et 53 ont été euthanasiés. Le devenir de 7 corvidés reste inconnu.

Figure 45 : Répartition des corvidés en fonction de leur devenir



Parmi les corvidés étudiés, 51,7 % étaient considérés comme non infestés, c'est-à-dire qu'aucune hémospordie n'a été observée sur le frottis correspondant.

Au sein des corvidés infectés, *Plasmodium* est le genre d'hémospordie qui est davantage retrouvé (41,1 %). *Haemoproteus* et *Leucocytozoon* représentent respectivement 21,9 % et 16,4 % des infestés. Enfin, 20,5 % des individus sont des cas de co-infestations à plusieurs hémospordies.

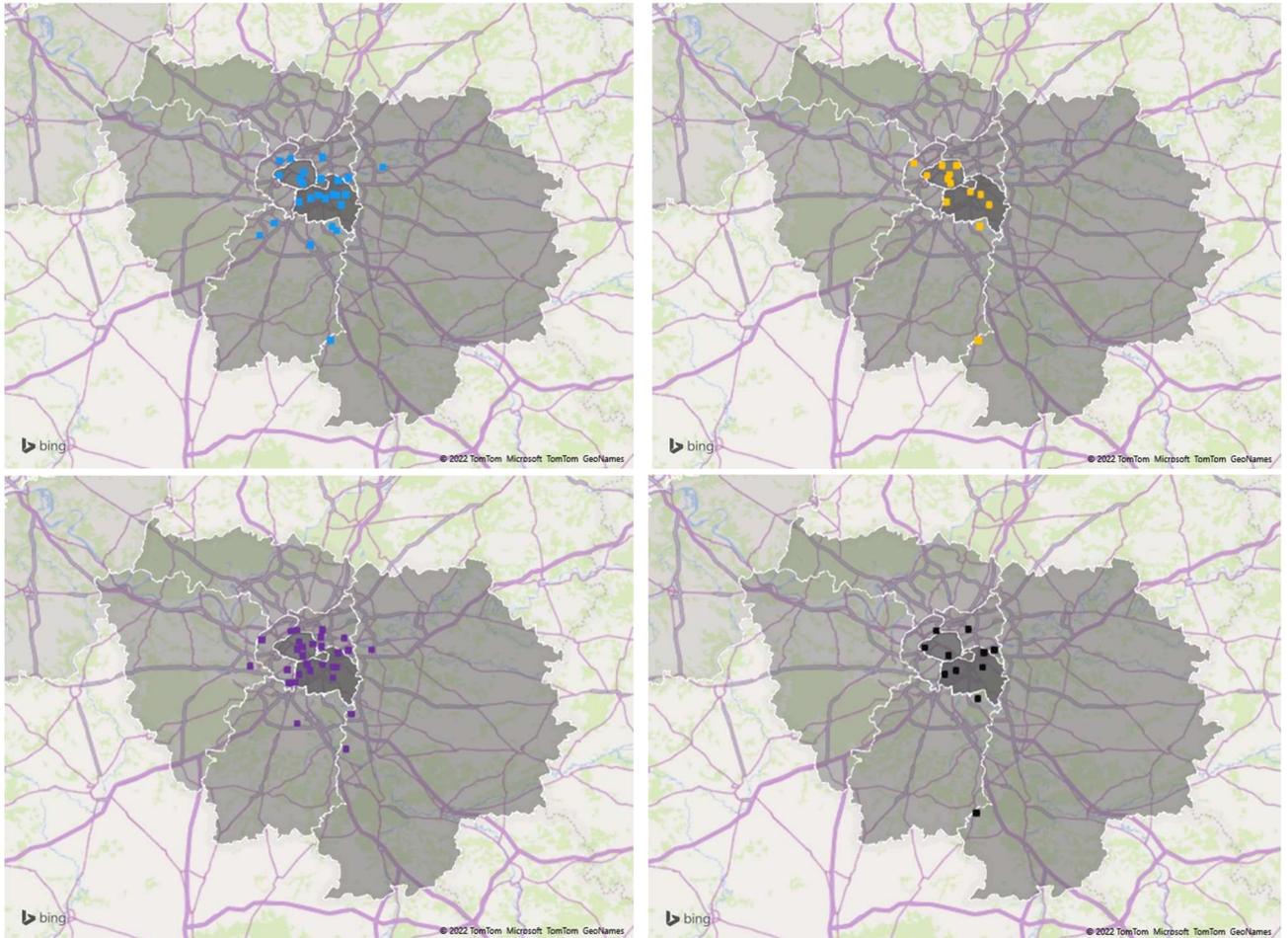
Les analyses statistiques ont confirmé cette différence significative entre les corvidés infestés par *Plasmodium* par rapport aux corvidés infestés par d'autres genres d'hémospordies (Test de Fisher avec $p = 0,0005 < 0,05$ et un intervalle de confiance à 95 % [1,64 ; 6,92]).

Le tableau 9 montre le devenir des corvidés en fonction du type d'infestation.

Tableau 9 : Devenir des corvidés en fonction du type d'infestation

Type d'infestation	Relâchés	Euthanasie	Mort spontanée	Inconnu
	n (%)	n (%)	n (%)	n (%)
<i>Haemoproteus sp.</i>	7 (44 %)	4 (25 %)	3 (19 %)	2 (13 %)
<i>Leucocytozoon sp.</i>	3 (25 %)	2 (17 %)	7 (58 %)	0 (0 %)
<i>Plasmodium sp.</i>	14 (47 %)	5 (17 %)	10 (33 %)	1 (3 %)
Co-infestations	2 (13 %)	3 (20 %)	9 (60 %)	1 (7 %)
Non infestés	27 (36 %)	22 (29 %)	23 (30 %)	3 (4 %)

Figure 46 : Répartition géographique des corvidés infestés à *Haemoproteus* (bleu), *Leucocytozoon* (jaune), *Plasmodium* (violet) et co-infestés (noir)



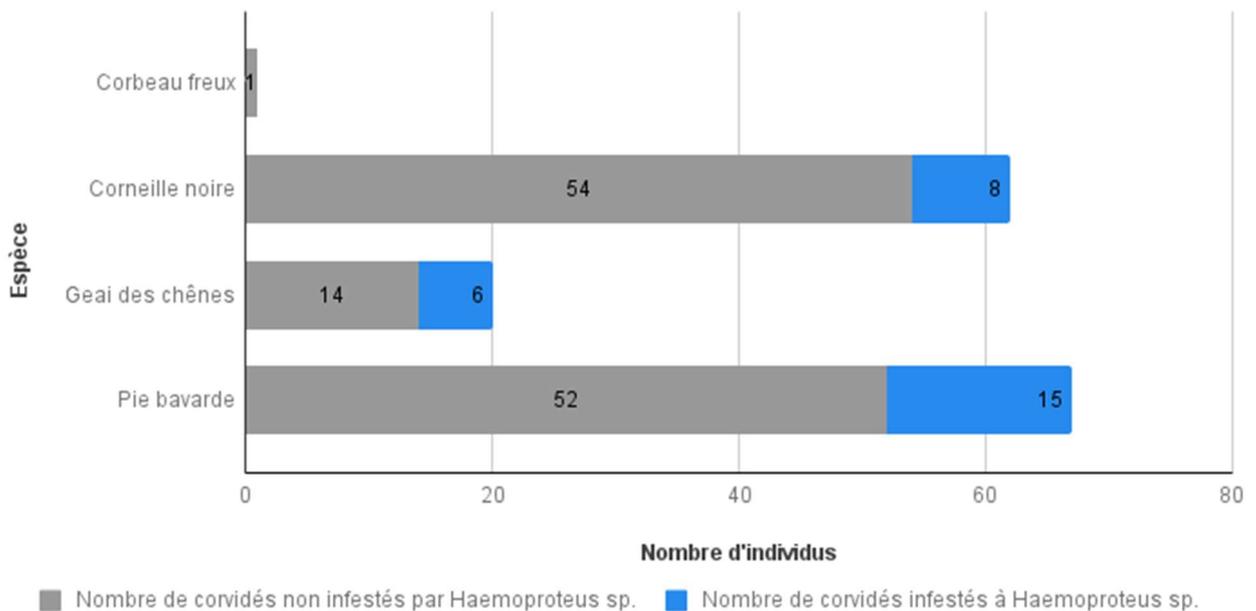
En revanche, les analyses statistiques n'ont pas montré d'association significative entre le département d'origine des corvidés (figure 46) et leur infestation aux hémospories ($p = 0,20$ avec un risque d'erreur inconnu).

Le pourcentage de corvidés relâchés est quasiment le même (autour de 35 %), qu'ils soient infestés ou non. De ce fait, aucune association était confirmée entre l'infestation des corvidés aux hémospories et leur devenir (Test de Fisher avec $p = 0,31 > 0,05$ et un risque d'erreur inconnu).

a. Infestation à *Haemoproteus* spp

Parmi les corvidés étudiés, l'infestation à *Haemoproteus* concerne trois des quatre espèces représentées (figure 47) : la corneille noire (8 infestés/ 62 individus), le geai des chênes (6 infestés / 16 individus) et la pie bavarde (15 infestés / 67 individus).

Figure 47 : Infestation des corvidés par *Haemoproteus* sp



Les analyses statistiques n'ont pas montré d'association significative entre les espèces de corvidés et leur infestation à *Haemoproteus* ($p = 0,26 < 0,05$ avec un risque d'erreur inconnu).

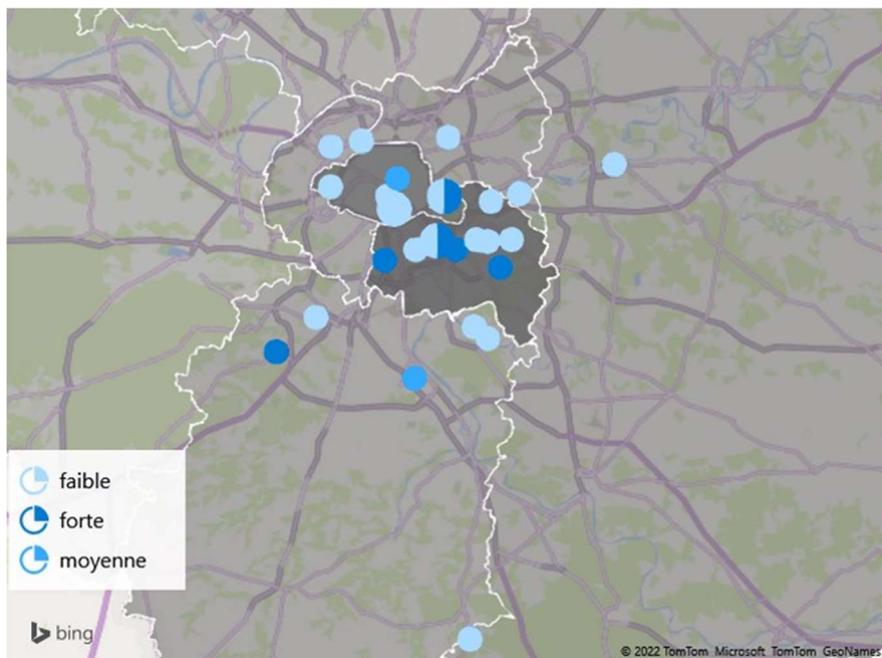
Les corvidés infestés à *Haemoproteus* provenaient de six départements parmi les dix représentés chez ce groupe d'espèces (figure 48) : les départements de Paris (75), de la Seine-et-Marne (77), de l'Essonne (91), des Hauts-de-Seine (92), de la Seine-Saint-Denis (93) et du Val-de-Marne (94).

Les corvidés juvéniles, qu'ils soient dépendants ou indépendants, semblent plus fréquemment infestés que les corvidés adultes. En effet 10 % (2 individus/ 20 adultes) des corvidés adultes étaient infestés par *Haemoproteus* tandis que les corvidés juvéniles dépendants et indépendants étaient infestés respectivement à 36 % et 21 %. Les corvidés juvéniles dépendants représentent à eux seuls 66 % (19 juvéniles dépendants/ 29 corvidés infestés) des corvidés infestés à *Haemoproteus*.

Les analyses statistiques n'ont pas permis de confirmer de différences significatives entre les classes d'âges parmi les infestations à *Haemoproteus* chez les corvidés (Test de Fisher avec $p = 0,31 > 0,05$ et un risque d'erreur inconnu).

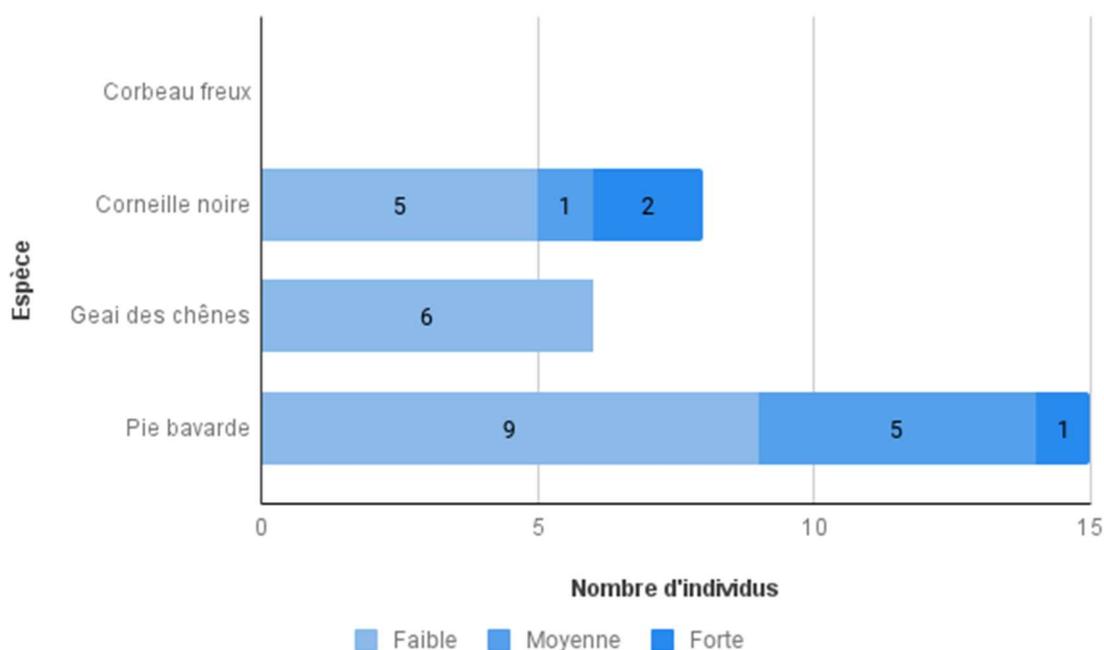
Chez les corvidés étudiés, l'infestation à *Haemoproteus* a été détectée au printemps et pendant l'été. Au cours de ces deux saisons, les infestations de faible degré d'intensité étaient majoritaires (59 % des infestations à *Haemoproteus* au printemps et 83 % en été) par rapport aux infestations moyennes et fortes.

Figure 48 : Répartition géographique du degré d'infestation des corvidés par *Haemoproteus*



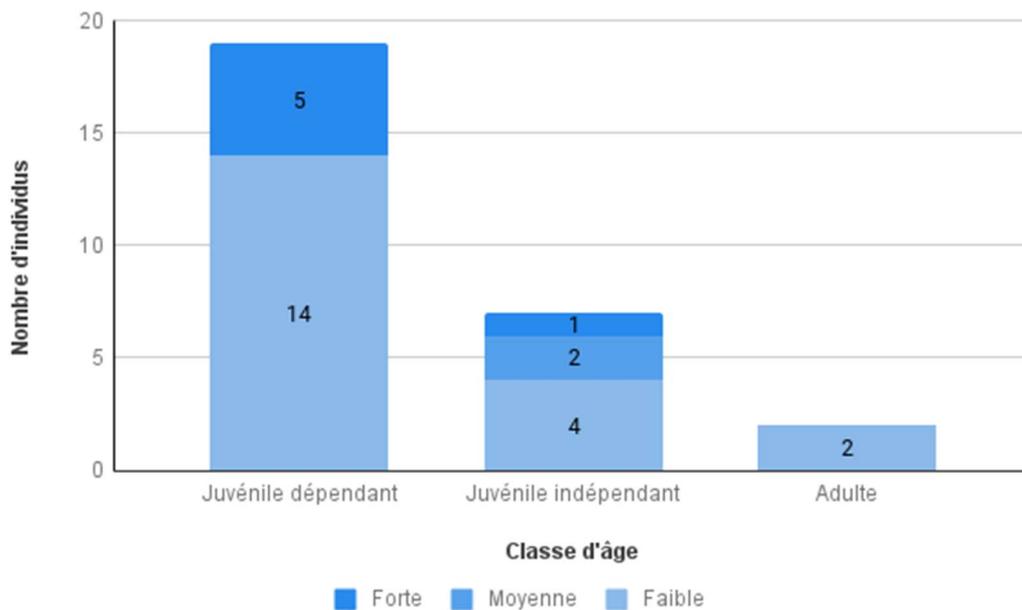
Si le geai des chênes était l'espèce de corvidés étudiée qui présentait le plus haut taux d'infestation à *Haemoproteus* (30 %), les individus infestés présentaient tous un degré faible de parasitémie (figure 49). La Corneille noire est l'espèce de corvidés ayant le plus haut taux de forte parasitémie (25 %).

Figure 49 : Degré d'infestation par *Haemoproteus* sp par espèce de corvidés



Comme l'illustre la figure 50, les deux adultes corvidés infestés à *Haemoproteus* présentaient tous les deux une parasitémie faible. Les corvidés juvéniles dépendants présentaient le plus haut pourcentage de forte parasitémie (26 %).

Figure 50 : Degré d'infestation par *Haemoproteus* sp chez les corvidés en fonction de la classe d'âge

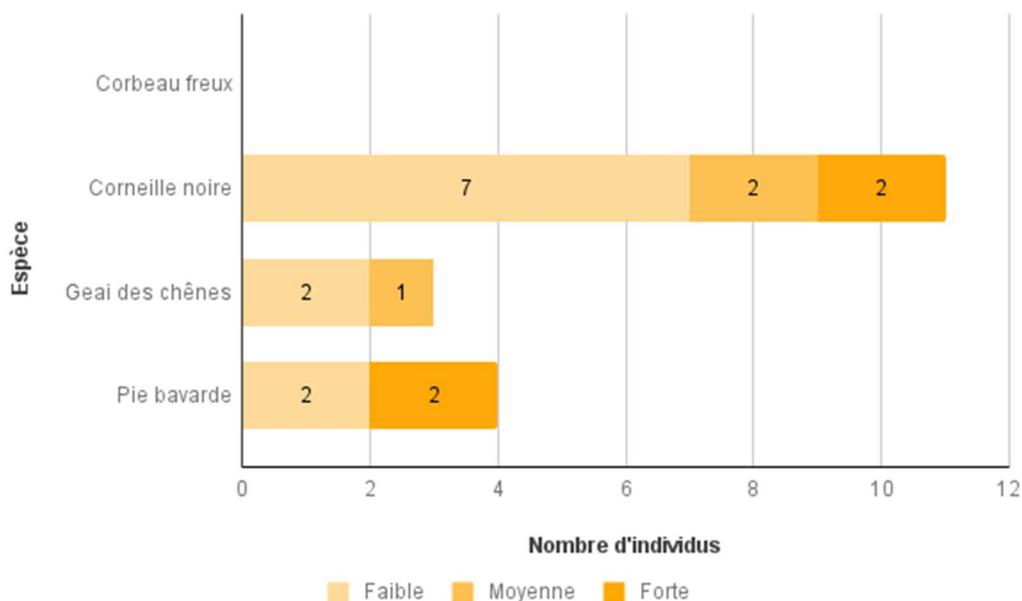


Une proportion plus élevée de corvidés fortement infestés à *Haemoproteus* a été observée dans le Val-de-Marne (94) avec 40 % de forte parasitémie.

b. Infestation à *Leucocytozoon spp*

Parmi les corvidés étudiés, l'infestation à *Leucocytozoon* concerne trois des quatre espèces représentées (figure 51) : la corneille noire (11 infestés / 62 individus), le geai des chênes (3 infestés / 16 individus) et la pie bavarde (4 infestés / 67 individus).

Figure 51 : Infestation des corvidés par *Leucocytozoon sp*

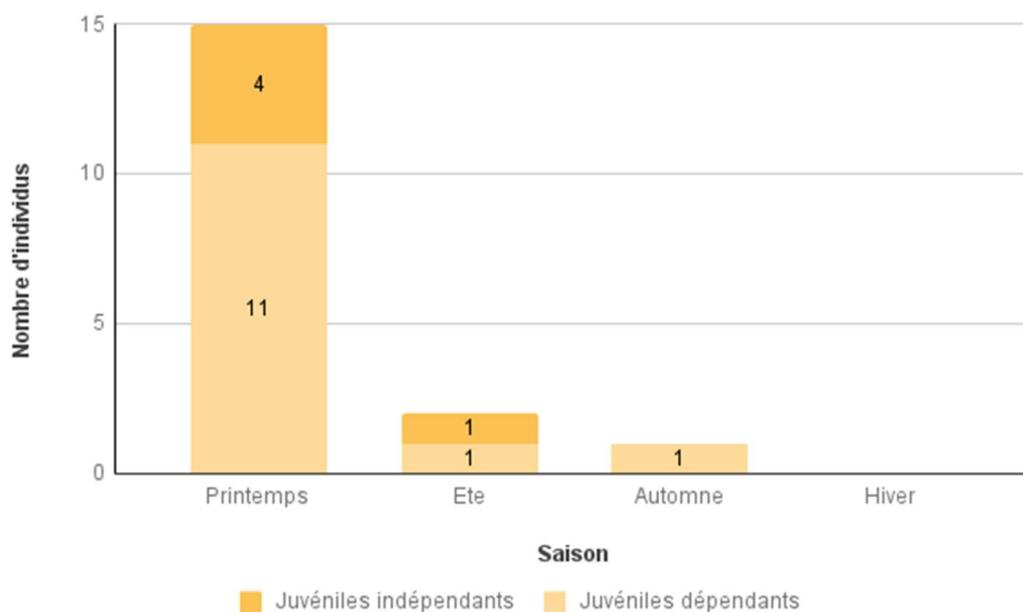


Les analyses statistiques n'ont pas montré d'association significative entre l'espèce de corvidé et l'infestation par *Leucocytozoon sp* ($p = 0,12 > 0,05$ avec un risque d'erreur inconnu).

Les corvidés infestés à *Leucocytozoon sp* provenaient de quatre départements parmi les dix représentés chez ce groupe d'espèces (figure 53) : les départements de Paris (75), de l'Essonne (91), des Hauts-de-Seine (92), et du Val-de-Marne (94).

La totalité des corvidés infestés étaient des juvéniles dépendants (72 %) ou indépendants (28 %).

Figure 52 : Repartition des corvidés infestés par *Leucocytozoon* sp en fonction de la saison et de la classe d'âge



Les cas d'infestations à *Leucocytozoon* ont été présentés en majorité au printemps (15 cas) par rapport à l'été (2 cas) et à l'automne (1 cas), comme illustré sur la figure 52.

La majorité des infestations à *Leucocytozoon* chez les corvidés correspondait à un faible degré de parasitémie (61,1 % des cas). Les cas d'infestation de moyenne (16,1 %) et de forte (21,1 %) intensité ont été retrouvés au cours du printemps et de l'été (figure 54).

Figure 53 : Répartition géographique du degré d'infestation des corvidés par *Leucocytozoon*

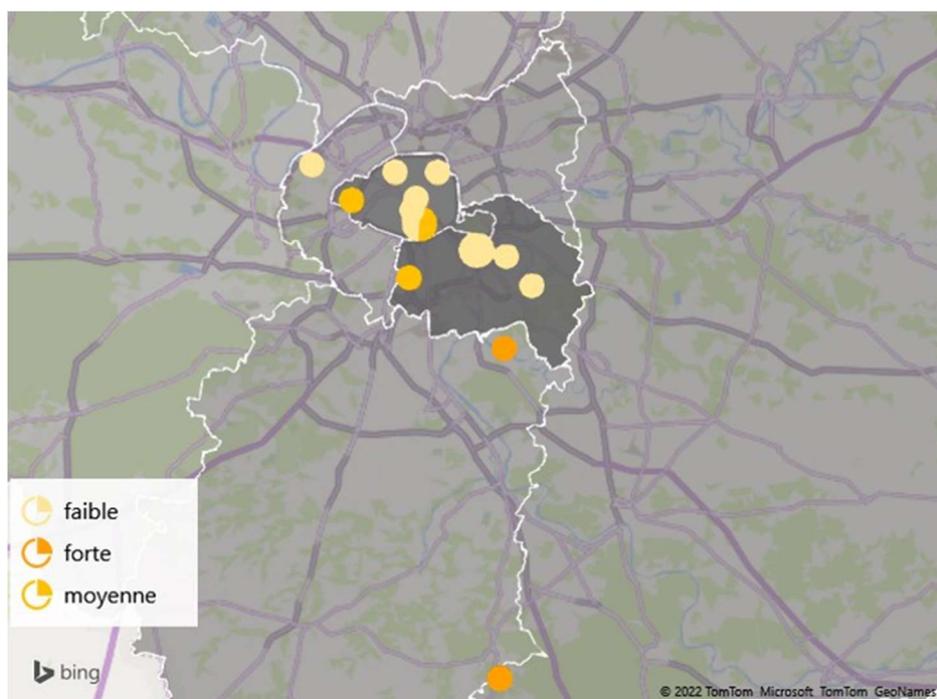
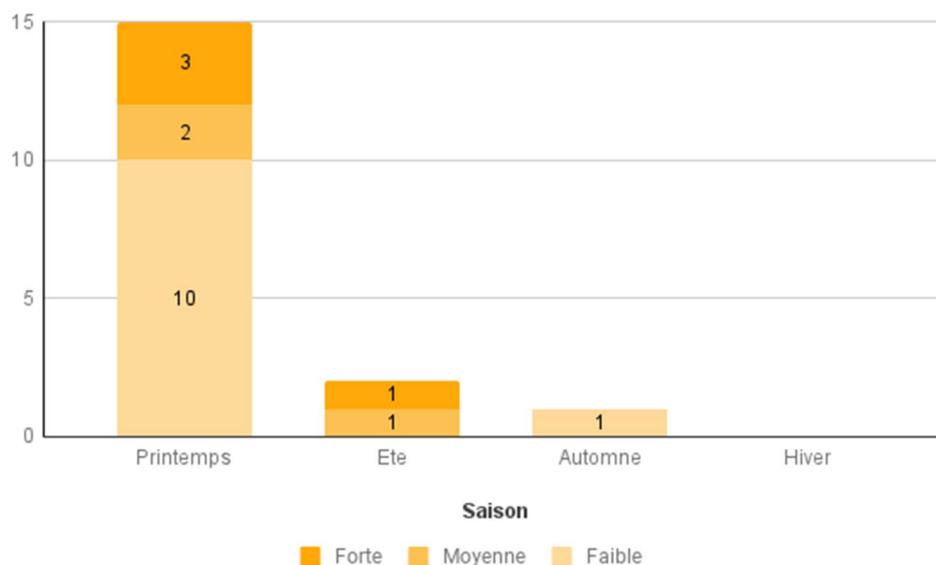
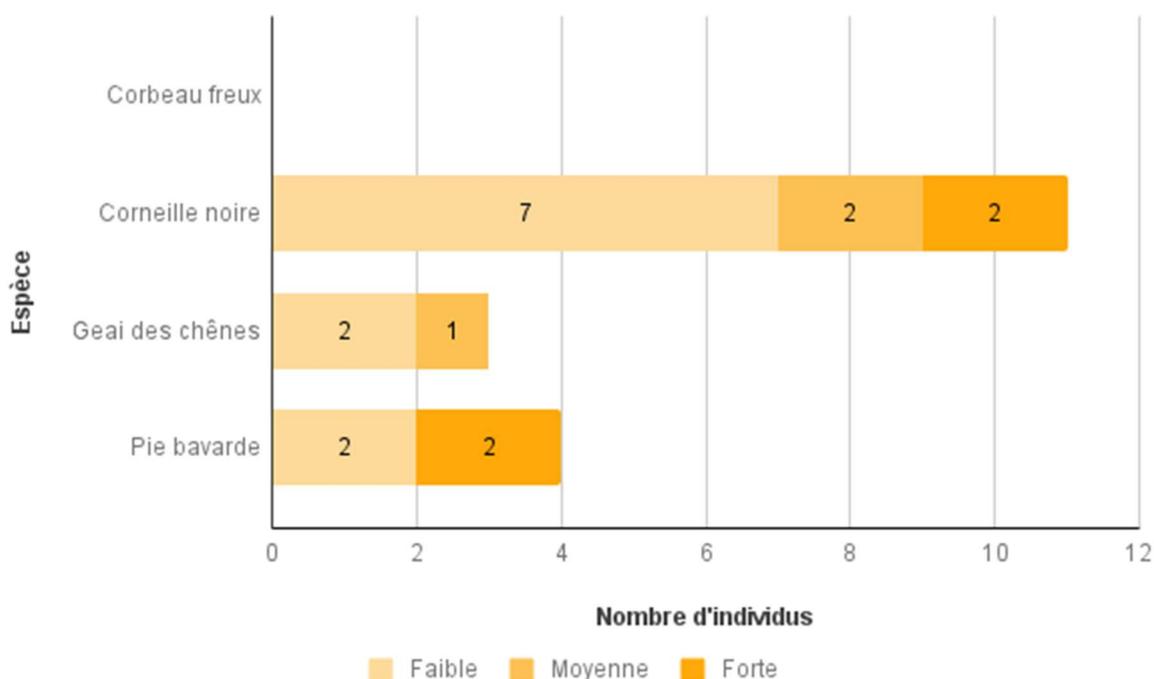


Figure 54 : Répartition des degrés d'infestation par *Leucocytozoon* sp chez les corvidés en fonction de la saison



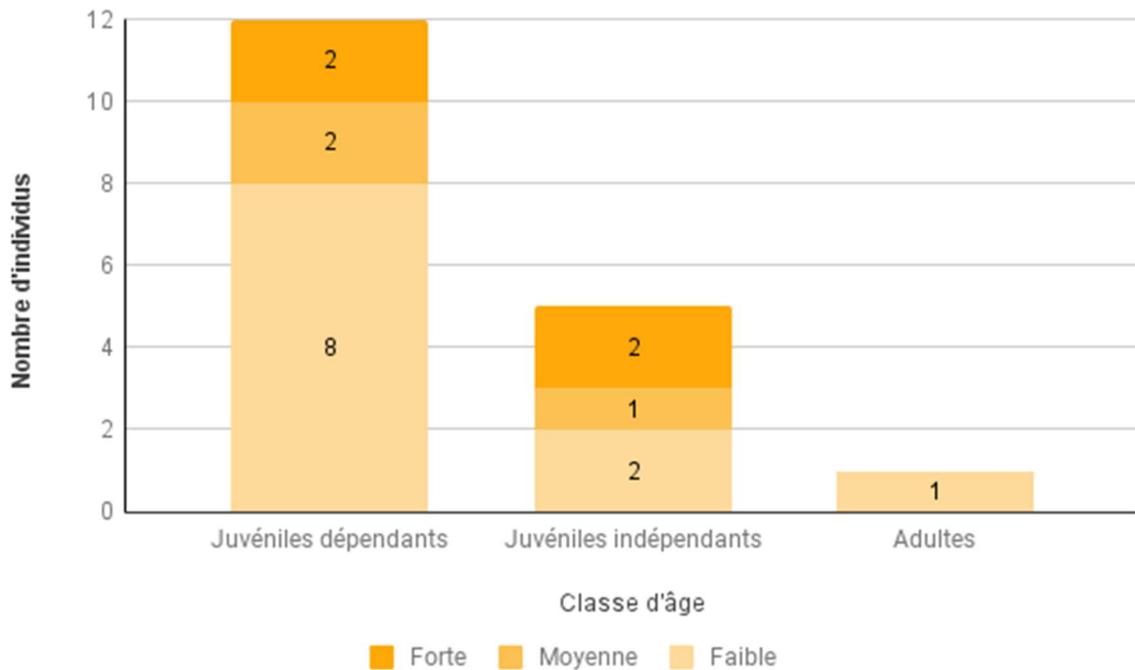
Les espèces de corvidés concernées par l'infestation à *Leucocytozoon* présentaient une répartition de degré de parasitémie assez proche (figure 55) : le pourcentage d'infestation de faible intensité était proche de 60 %. Le reste des cas concernait soit de degré exclusivement forts chez la Pie bavarde, soit uniquement moyen chez le Geai des chênes, ou bien équitablement répartis entre moyens et forts chez la Corneille noire.

Figure 55 : Répartition du degré d'infestation par *Leucocytozoon* sp en fonction de l'espèce de corvidé



Les corvidés appartenant aux classes d'âge juvéniles sont les seuls à avoir présenté des degrés d'infestation moyenne ou forte par rapport aux adultes (figure 56).

Figure 56 : Répartition du degré d'infestation par *Leucocytozoon* sp chez les corvidés en fonction de la classe d'âge



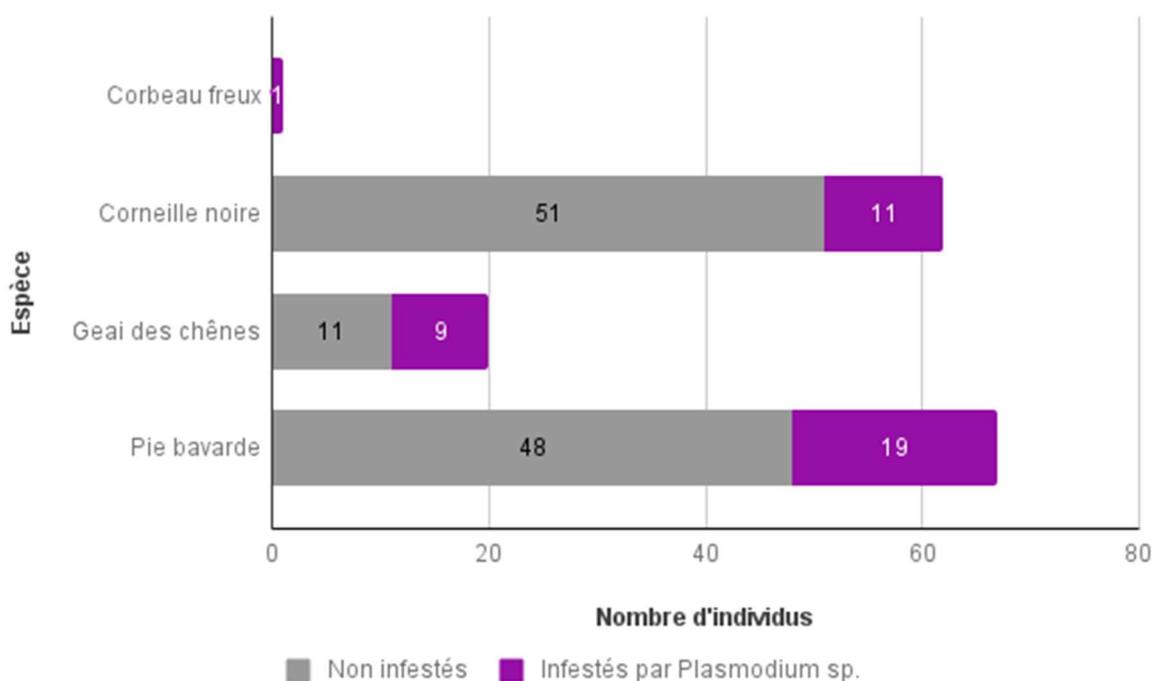
Une proportion plus élevée de corvidés fortement infestés à *Leucocytozoon* a été observée dans le département de l'Essonne (91).

c. Infestation à *Plasmodium spp*

L'infestation à *Plasmodium* a concerné toutes les espèces de corvidés rencontrées (figure 57) : le corbeau freux (1 individu), la corneille noire (11 infestés / 62 individus), le geai des chênes (9 infestés / 20 individus) et la pie bavarde (19 infestés / 67 individus).

Nonobstant l'espèce du corbeau freux représentée par un seul individu, le geai des chênes était l'espèce la plus fréquemment parasitée (45 % des individus) par rapport à la corneille noire (18 % des individus) et à la pie bavarde (28 % des individus).

Figure 57 : Répartition de l'infestation par *Plasmodium* en fonction de l'espèce de corvidé



Le test de Fisher a montré une association significative entre l'espèce et l'infestation par *Plasmodium* chez les corvidés (Test de Fisher avec $p = 0,03 < 0,05$ avec un risque d'erreur estimé à 5%) sans pour autant identifier la nature de cette association. Cependant avec la correction de Bonferroni qui permet de corriger le seuil de significativité en cas de comparaison multiple, $p = 0,03 > p \text{ corrigé} = 0,017$, cette association ne peut plus être considérée comme significative. On admet alors seulement l'existence d'une tendance.

Les corvidés infestés par *Plasmodium* provenaient de huit départements parmi les dix représentés chez ce groupe d'espèces (figure 59) : les départements la Côte d'Or (21), de Paris (75), de la Seine-et-Marne (77), des Yvelines (78), de l'Essonne (91), des Hauts-de-Seine (92), de la Seine-Saint-Denis (93) et du Val-de-Marne (94).

Si les corvidés juvéniles semblent représenter une proportion plus importante des individus infestés à *Plasmodium*, en relation avec la taille d'effectif plus importante, les corvidés semblent être infestés indifféremment de leur d'âge : pour chaque classe d'âge, le pourcentage d'individus infestés à *Plasmodium* est d'environ 30 % (figure 58).

Figure 58 : Répartition de l'infestation par *Plasmodium* sp chez les corvidés en fonction de la saison et de la classe d'âge



Les analyses statistiques n'ont pas montré d'association significative entre la classe d'âge ou le département d'origine et l'infestation à *Plasmodium* chez les corvidés (respectivement $p = 0,82 > 0,05$ et $p = 0,20 > 0,05$ avec un risque d'erreur inconnu).

Dans 55 % des cas, l'infestation à *Plasmodium* était de faible intensité, contre 20 % et 25 % pour les degrés d'infestations respectivement moyen et fort. Ce profil de répartition de degré de parasitémie était globalement retrouvé pour le printemps et l'été, l'automne mis à part en raison du faible effectif (figure 60).

Figure 59 : Répartition géographique du degré d'infestation des corvidés par *Plasmodium*

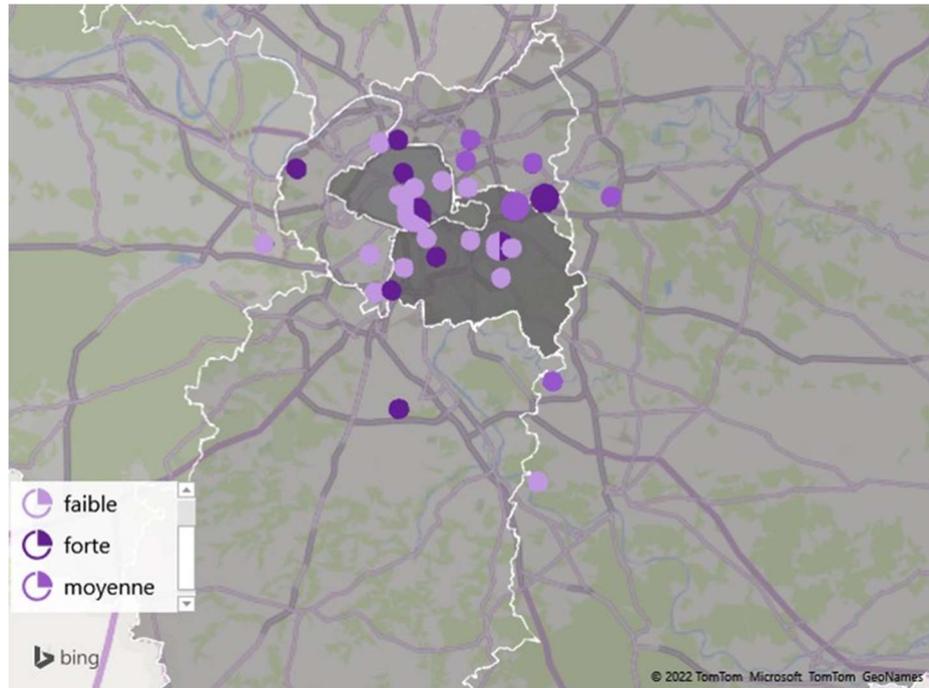
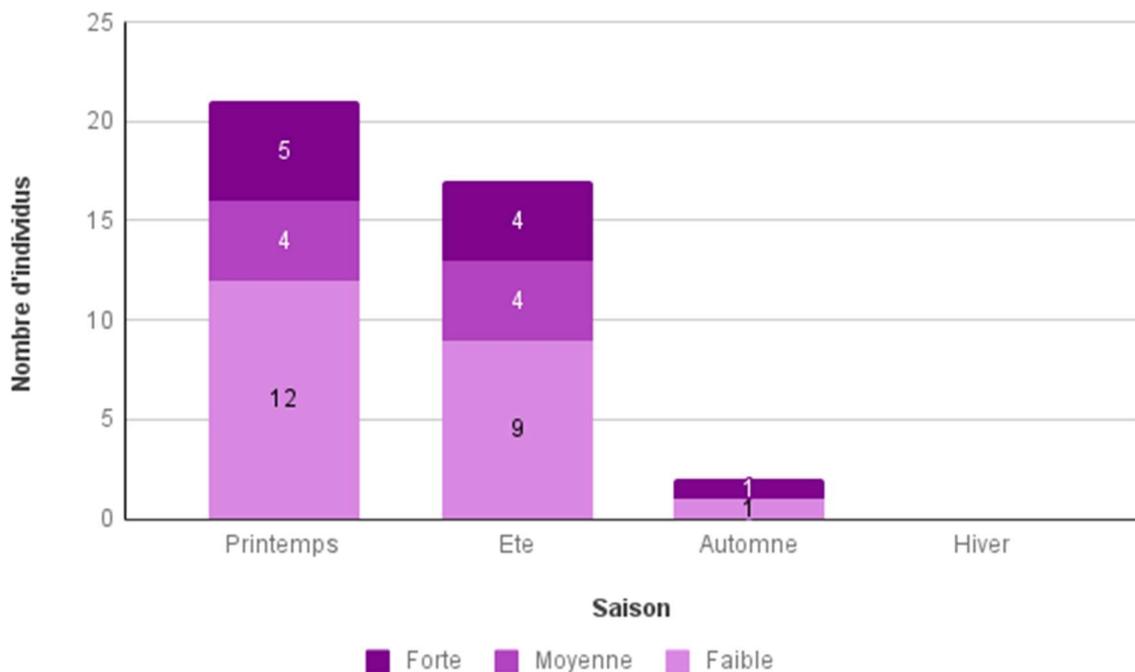
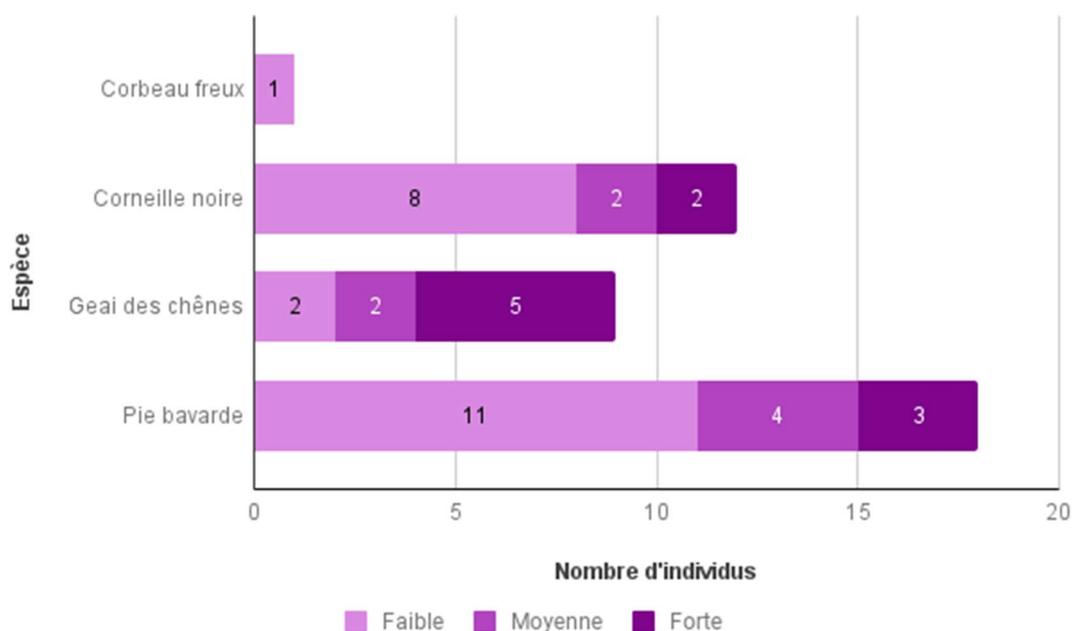


Figure 60 : Répartition du degré d'infestation par *Plasmodium* sp en fonction de la saison chez les corvidés



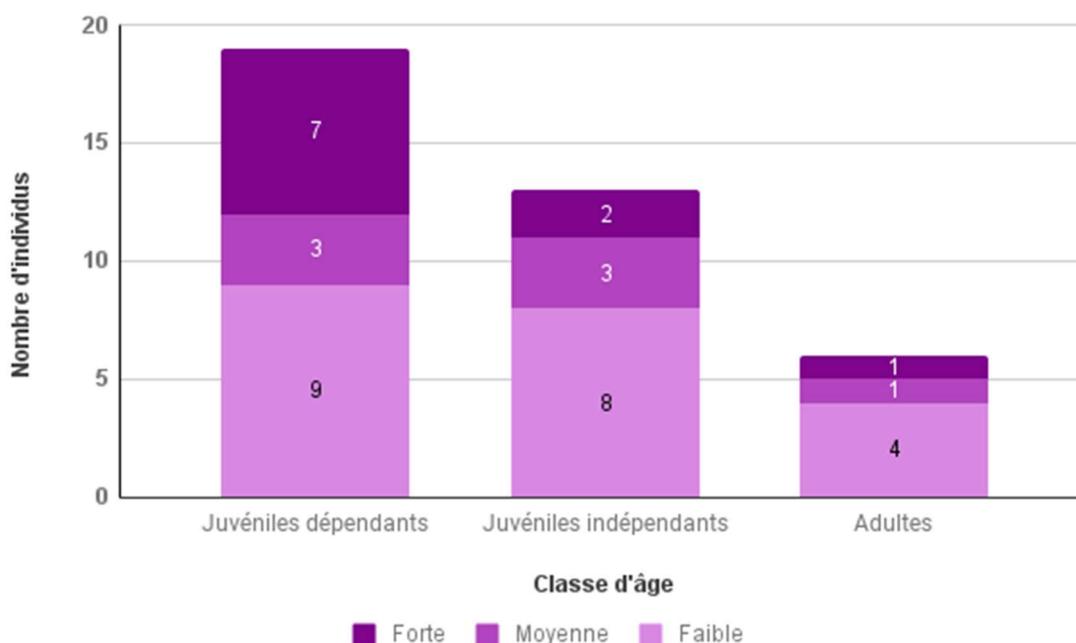
Le geai des chênes semble, sans que cela ait pu être démontré statistiquement, être l'espèce concernée par les plus forts degrés d'infestation à *Plasmodium* : 55 % des individus infestés de cette espèce ont une forte parasitémie, contre 17 % chez la corneille noire et la pie bavarde. Chez ces deux dernières espèces, les faibles parasitémies représentent la majorité des infestés (environ 64 % des infestés). Le corbeau freux était quant à lui faiblement infesté à *Plasmodium* (figure 61).

Figure 61 : Répartition du degré d'infestation par *Plasmodium* sp en fonction de l'espèce chez les corvidés



Les plus forts degrés d'infestation sont retrouvés chez les juvéniles dépendants (35 %) par rapport aux autres classes d'âge (15 % environ), comme illustré en figure 62.

Figure 62 : Répartition des degrés d'infestation à *Plasmodium* sp chez les corvidés en fonction de la classe d'âge



Une proportion plus élevée de corvidés fortement infestés à *Plasmodium* a été observée dans le département de la Seine-Saint-Denis (93).

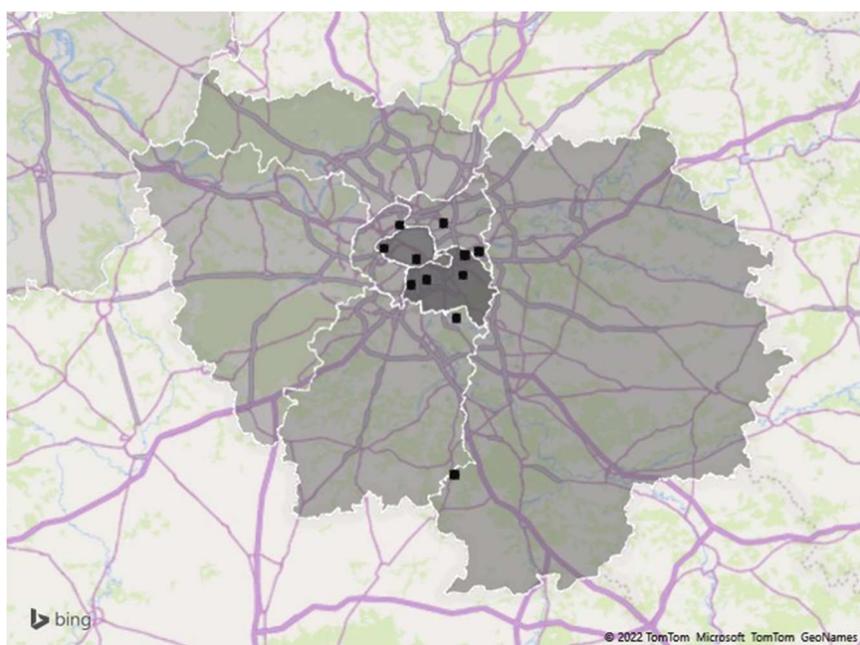
d. **Coinfestations**

Sur les 150 corvidés prélevés, 15 individus (10 %) étaient infestés par au moins deux genres différents d'hémosporidies. Trois des quatre espèces représentées sont concernées : la corneille noire (7 individus), le geai des chênes (4 individus) et la pie bavarde (4 individus).

Les co-infestations associaient *Haemoproteus* et *Leucocytozoon* (4 individus), *Haemoproteus* et *Plasmodium* (8 individus), *Leucocytozoon* et *Plasmodium* (2 individus), et un individu associait les trois genre d'hémosporidies. Le test de Fisher montre l'existence d'une association significative entre la co-infestation des corvidés et le genre *Haemoproteus* sans toutefois révéler la nature de cette association (Test de Fisher avec $p=0,044 < 0,05$ avec un risque d'erreur $\alpha = 5\%$).

Les individus co-infestés provenaient de cinq départements différents (figure 63) : 4 individus provenaient de Paris (75), 4 individus provenaient du Val-de-marne (94), 2 individus provenaient de l'Essonne (91), 2 individus provenaient de la Seine-Saint-Denis (93), 1 individu provenait des Hauts-de-Seine (92). Enfin, la provenance de 2 corvidés co-infestés était inconnue.

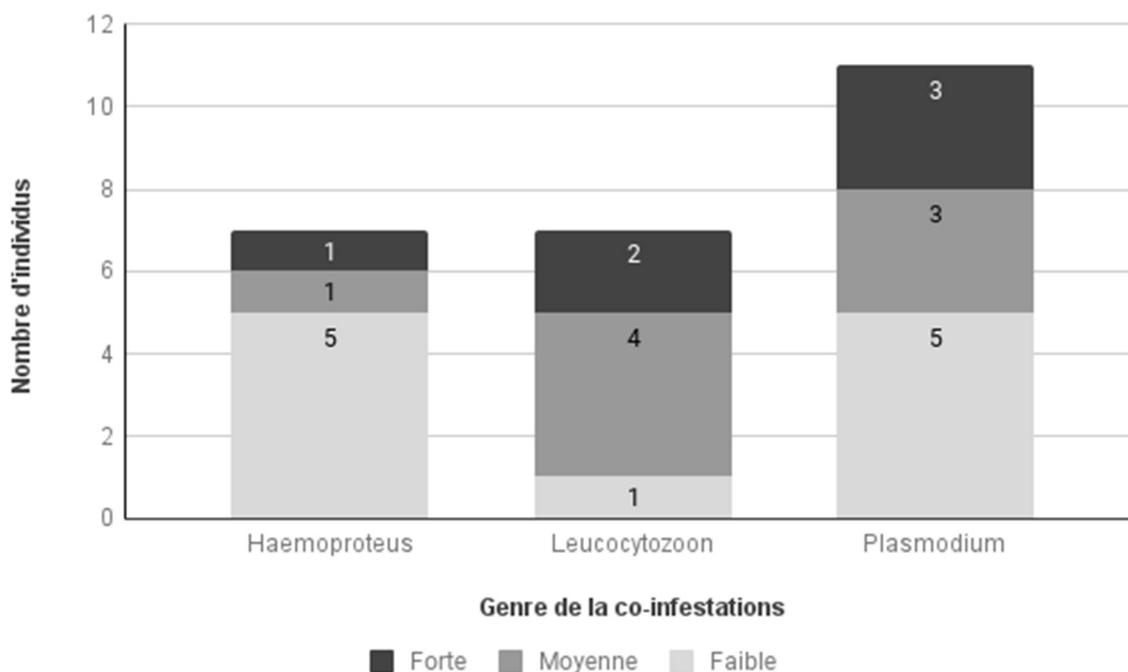
Figure 63 : Répartition géographique des cas de co-infestations chez les corvidés



La quasi-totalité des individus co-infestés est arrivée au cours du mois de Juin 2018, excepté 1 individu arrivé fin mai 2019. Tous les corvidés concernés par une coinfection étaient juvéniles, dépendants (8 individus) ou indépendants (6 individus) quand leur classe d'âge était connue (14/15 cas).

Comme illustré en figure 64, les co-infestations avec le genre *Haemoproteus* étaient majoritairement associées à des parasitémies faibles pour le genre (9 sur 12), de même que pour *Plasmodium* (5 sur 10). En revanche, la majorité des co-infestations avec le genre *Leucocytozoon* était majoritairement associée à des parasitémies moyenne (4 sur 7).

Figure 64 : Répartition des corvidés co-infestés par genre d'hémosporidie et par degré de parasitémie



La plupart des corvidés co-infestés sont soit décédés en soins (60 % soit 9 corvidés / 15 co-infestés) soit euthanasiés (20 % soit 3 corvidés / 15 co-infestés). Un seul individu, co-infesté à *Haemoproteus* et *Plasmodium*, a été relâché.

4. Discussion

L'objectif de cette étude n'était pas d'inférer les résultats obtenus à la population générale de rapaces et corvidés, et cela n'aurait pas été possible du fait de la non représentativité de l'échantillon étudié par rapport cette population. Néanmoins, les résultats obtenus permettent de réaliser une première description de l'infestations par les hémosporidies chez les rapaces et corvidés présents au sein ou à proximité de l'Île-de-France, et de dégager certaines tendances dont la connaissance peut être utile aux centres de soins à la faune sauvage.

A. Autour des matériels et méthodes

a. Population examinée

Tous les prélèvements ont été réalisés par la même personne (moi-même) selon le même protocole, une fois par semaine environ sur tous les nouveaux rapaces et corvidés arrivés encore présents. Tous les rapaces et corvidés n'ont pas pu être inclus dans l'étude : seuls les individus cliniquement stables et pouvant supporter une prise de sang ont été prélevés. D'autres individus sont sortis (relâchés/décès/euthanasie) du centre entre deux sessions de prélèvements. La charge de travail

que représente l'arrivée d'animaux en continu par rapport au nombre de personnes compétentes pour la réalisation de prise de sang n'a pas permis de prélever plus d'individus et implique parfois quelques jours de délais entre l'arrivée de l'animal et le prélèvement. Cependant, cette durée n'a pas excédé 9 jours dans cette étude, ce qui n'aurait eu à priori pas trop d'impact sur les résultats, cette durée étant inférieure au temps nécessaire à la disparition de la parasitémie liée aux hémospodidies.

Les rapaces et corvidés étant maintenus en volière durant la dernière phase de leur convalescence, il y a d'autant plus d'intérêt à les prélever le plus tôt possible, d'une part pour minimiser le stress lié à la capture, et d'autre part la plus grande densité de population au sein du centre par rapport au milieu naturel pourrait augmenter le risque d'infestation en centre en présence du vecteur.

La conséquence directe de l'effectif réduit de l'échantillon de population étudié est le manque de puissance statistique des résultats et l'analyse de certains paramètres n'aurait eu, dans certains cas, aucun sens. Prolonger la durée de l'étude sur plusieurs années aurait pu être un moyen d'augmenter les effectifs. La capture au hasard d'animaux sauvages aurait pu augmenter la représentativité de la cohorte étudiée par rapport à la population de rapaces et corvidés présente en France, mais doit être discutée quant à l'influence d'un tel stress sur l'état de santé des animaux capturés par la suite.

Une autre limite de cette étude est la non prise en compte des traitements appliqués à chaque individu. En effet, si les traitements reconnus comme ayant un effet sur l'hémoparasitisme (antibiotiques comme le triméthoprime-sulfaméthoxazole, la mélarsonine, ou des antipaludéens) ne sont pas utilisés au Chuv-FS, le nursing et les autres traitements vétérinaires contribuent à améliorer l'état clinique de l'animal et peuvent donc réduire indirectement la parasitémie. Une lutte préventive anti-vectorielle aurait aussi pu contribuer à réduire le parasitisme, mais aucune mesure n'est réalisée en ce sens au Chuv-FS.

Un autre biais possible serait lié aux causes possibles d'arrivée des rapaces et corvidés au centre de soins : les rapaces et corvidés reçus dans ce type de centres sont souvent des animaux plus faibles, potentiellement plus susceptibles d'être infestés. Il n'est cependant pas possible de vérifier l'antériorité de la cause d'entrée par rapport à l'infestation ou le contraire. La potentielle influence d'autres pathologies représente donc un biais.

b. Méthodes

Si les prélèvements ont été réalisés par la même personne, la lecture des lames et donc l'analyse morphologique a été réalisée à la fois par le Docteur Veronica Risco-Castillo, maître de conférences à l'EnvA, et moi-même. Il existe donc potentiellement un biais de classement différentiel, d'autant plus que les frottis n'ont pas été analysés immédiatement et étaient potentiellement altérés au moment de l'analyse.

Il aurait été intéressant de faire un second prélèvement si l'état de santé de l'animal le permettait afin de comparer les résultats à des dates différentes, pour décrire une éventuelle évolution de la parasitémie pour chaque individu. De la même manière, la biologie moléculaire (analyses PCR des prélèvements sanguins) et l'anatomie pathologique auraient été des axes intéressants pour cette étude dans l'objectif d'être le plus précis possible dans la description des hémospodioses chez les rapaces et corvidés de l'étude (détection des espèces, observations de lésions d'organes,

observation sur lame d'histologie). L'étude de biologie moléculaire sur les prélèvements sanguins n'a pas pu être réalisée par manque de temps, mais cela est prévu à terme en dehors du cadre de cette thèse. Elle aurait permis de confirmer les analyses morphologiques et d'avoir une détection plus sensible des hémospories, en particulier dans les cas de parasitémie chronique souvent de faible intensité et donc difficile à détecter. Concernant l'anatomie pathologique, l'autopsie des individus n'aurait pas pu être réalisée dans les mêmes conditions, notamment par rapport au temps écoulé entre le décès et la réalisation d'une autopsie qui aurait pu induire un biais important dans les résultats obtenus.

L'étude a aussi rencontré quelques difficultés : l'utilisation de tubes EDTA ne permet pas de faire de frottis à posteriori en cas d'échec à cause de l'hémolyse des érythrocytes. L'utilisation d'une goutte de sang avant de mettre le reste du prélèvement dans le tube était donc nécessaire. Néanmoins, même en prenant ces précautions et en utilisant une technique de prélèvement étudiée pour limiter l'hémolyse, de très nombreux prélèvements sanguins étaient hémolysés. Si les frottis avaient été réalisés en différés, il aurait été préférable d'utiliser des tubes héparinés. La perte d'une partie des frottis ainsi de quelques dossiers de renseignements a aussi diminué l'effectif final de l'étude.

Le choix du site de prélèvement s'est porté sur la veine alaire gauche dans la majorité des cas, d'une part car le prélèvement de sang le plus périphérique possible augmente la sensibilité dans la recherche d'hémospories. D'autre part cette méthode s'est finalement révélée plus simple à réaliser qu'une ponction à la veine jugulaire, à la fois pour la personne contenant l'animal et pour la personne prélevant car la position offrait plus de stabilité pour manipuler le tube capillaire et il était plus facile d'aspirer du sang. Les oiseaux prélevés, même si contenus sur le dos dans une position considérée comme stressante pour eux, étaient finalement manipulés moins longtemps avec cette méthode.

B. Interprétation des résultats

a. Espèces concernées

Les 6 espèces de rapaces et 4 espèces de corvidés représentées dans cette étude font partie des espèces les plus couramment décrites en France. L'échantillon, sans être parfaitement représentatif, s'approche de la population globale francilienne et française de rapaces et corvidés.

On constate que les corvidés sont plus représentés que les rapaces au sein de l'échantillon global. Ceci peut s'expliquer par la localisation très urbaine du Chuv-FS : les corvidés tels que la Corneille noire et la Pie bavarde sont très fréquents en milieu urbain et craignent peu la présence de l'homme, ce qui est moins le cas des rapaces qui ont aussi une densité de population moins importante que les corvidés.

b. Origine géographique

Le lieu de découverte des rapaces et corvidés amenés au Chuv-FS étaient majoritairement l'Île-de-France. Cependant la répartition géographique semblait plus étendue pour les rapaces qui étaient parfois amenés depuis les Deux-Sèvres ou la Nièvre alors que la majorité des corvidés venaient du Val-de-Marne et de Paris, soit les départements les plus proches et les plus accessibles en transports du Chuv-FS de l'EnvA. Une hypothèse pour expliquer cette différence serait la différence

de motivation des découvreurs à parcourir de plus longues distance en faveur des rapaces qui bénéficient d'une meilleure image que les corvidés au sein de notre société.

c. Saison d'arrivée

La date d'arrivée au centre et non celle de prélèvement a été prise en compte car il était question d'étudier ici la pression parasitaire avant l'arrivée en centre. La majorité des individus inclus dans cette étude sont arrivés au printemps et pendant l'été. Ces saisons sont aussi de manière générale la période de plus forte activité d'accueil pour les centres de soins. Elle est probablement liée d'une part au plus grand nombre de découvreurs potentiels par le fait d'une météo plus propice aux promenades en extérieur durant ces saisons. D'autre part, c'est aussi la saison de reproduction de nombreuses espèces dont les rapaces et corvidés. Il n'est donc pas étonnant d'observer une répartition plus importante des effectifs durant le printemps et l'été.

d. Hémosporidioses chez les rapaces

Les rapaces étaient présents en effectif assez réduit dans cette étude : seulement 37 individus ont été prélevés. Contrairement au corvidés, il y avait une proportion semblable de rapaces adultes et de rapaces juvéniles toutes espèces confondues. Néanmoins, chez certaines espèces comme la chouette hulotte, les juvéniles explorent leur environnement hors du nid avant de savoir voler, sous la surveillance de leurs parents. Certains promeneurs non avertis de ce comportement normal de l'espèce pourraient alors croire à tort que l'animal est en difficulté et l'amener en centre de soins, expliquant l'effectif plus abondant de chouettes hulottes juvéniles par rapport aux autres rapaces (10 juvéniles sur 13 chouettes hulotte prélevées).

Chez les rapaces de cette étude, le taux de prévalence global pour les hémosporidies était d'environ 33 %. Un résultat proche a été observé dans le sud de la France, avec un taux d'infestation des rapaces moyen de 33 % sur plusieurs années (Jacquesson, 2019). Aucun faucon crécerelle parmi les 9 individus de cette espèce présents dans l'étude n'était détecté comme infesté par une hémosporidie. La chouette hulotte a été la seule espèce de rapace chez qui les trois genres d'hémosporidies ont été détectés. Cette constatation est, au vu du faible effectif, probablement liée à un biais d'échantillonnage, d'autant que l'infestation aux hémosporidies a été décrite chez le Faucon crécerelle en France (Jacquesson, 2019).

Les analyses statistiques n'ont pas permis la confirmation des associations entre les rapaces et les genres d'hémosporidie. Néanmoins *Leucocytozoon* a été aussi fréquemment retrouvé (41,7 % des rapaces infestés) que *Plasmodium*. Cette observation a également été réalisée dans le sud de la France (Jacquesson, 2019). *Leucocytozoon* était pourtant décrit comme peu retrouvé chez les rapaces (Valkiunas 2010), une explication serait une augmentation des simuliés dans la région étudiée ou alors une adaptation de *Leucocytozoon* aux rapaces.

La parasitémie provoquée par *Leucocytozoon* semble être différente par rapport à *Haemoproteus* et *Plasmodium* qui ont un profil semblable. *Leucocytozoon* n'a ici concerné que des individus juvéniles, contrairement aux deux autres genres qui ont concernés les 3 classes d'âge. Les individus infestés sont arrivés aussi plus tardivement dans l'année pour *Leucocytozoon* (été et automne) par rapport aux autres qui arrivaient majoritairement au printemps et à l'été. L'origine des infestés semblait être plus rurale pour *Haemoproteus* et *Plasmodium* (plutôt départements éloignés de Paris) tandis que la répartition géographique de *Leucocytozoon* semble être plus homogène. Enfin, la majorité des

infestations à *Leucocytozoon* était moyenne à forte, tandis qu'elle était majoritairement faible pour *Haemoproteus* et *Plasmodium*. Cependant ces deux derniers genres ne concernaient que des adultes, peut être y a-t-il un lien global entre classe d'âge et degré de parasitémie qu'il n'est pas possible de vérifier à cause du faible effectif, plutôt qu'un lien entre degré de parasitémie et genre d'hémosporidie. Ces observations sont en accord avec ce qui a été décrit pour *Leucocytozoon* chez les rapaces : le système immunitaire des juvéniles serait immature et causerait des infestations plus fréquentes chez ces individus qui développeraient des parasitémies élevées sans pour autant en décéder (Powers *et al.*, 1994).

Enfin, les infestations aux hémosporidies ne semblent pas influencer le relâché des rapaces. En effet, le taux de relâché était semblable (environ 72 %) chez les rapaces infestés comme non-infestés. Une étude chez les rapaces et corvidés dans le sud de la France a constaté un résultat similaire (Jacquesson, 2019). Les hémosporidioses n'ont donc pas influencé l'état clinique des rapaces de cette étude au point de compromettre leur relâché plus que d'autres pathologies. Cependant, les simules étant déjà présentes en Île-de-France, le relâché de ces animaux pourrait représenter un risque supplémentaire de dissémination de *Leucocytozoon*.

e. Hémosporidioses chez les corvidés

Les corvidés représentent un plus grand nombre d'individus que les rapaces avec 150 individus prélevés sur environ un an. Ce groupe d'espèce est présent en effectifs plus importants que les rapaces en Île-de-France, ce constat n'est donc pas étonnant. Aussi, la proportion de jeunes est plus importante : la population de corvidés étudiée contient 75 % de juvéniles. Ce résultat peut être relié à la saisonnalité des découvertes et à la période de reproduction : les découvreurs sont potentiellement plus nombreux à la belle saison, qui est aussi la période de reproduction des corvidés.

Les corvidés arrivés pendant l'été étaient en moyenne 4 fois plus infestés que ceux arrivés pendant une autre saison. Les analyses statistiques ont montré que cette différence était significative. Ce résultat n'est pas étonnant car il coïncide avec les conditions les plus favorables à l'infestation : la présence des vecteurs, la période de reproduction et donc les changements hormonaux impliquant une baisse d'immunité chez les oiseaux (Bennett et Fallis, 1960 ; Powers *et al.*, 1994 ; Siikamäki *et al.*, 1997 ; Atkinson *et al.*, 2008).

Le taux de relâché est moins bon que chez les rapaces (35 %) mais est le même pour les infestés comme pour les non-infestés. Les hémosporidioses n'ont donc pas influencé l'état clinique des rapaces de cette étude au point de compromettre leur relâché plus que d'autres pathologies. La différence du taux de relâchés entre rapaces et corvidés pourrait s'expliquer avec une cause d'entrée sous-jacente, ou un lien avec la proportion de chaque classe d'âge dans les deux groupes.

Le taux global de l'infestation est plus important que chez les rapaces (48 % de corvidés infestés par au moins une hémosporidie) et le genre *Plasmodium* est significativement plus présent que les autres genres chez les corvidés. Un résultat similaire a été retrouvé dans une population de corvidés dans le sud de la France (Jacquesson, 2019), et semble être globalement retrouvé dans la littérature scientifique où les corvidés sont plus fréquemment infestés par *Plasmodium* (Bennett *et al.*, 1993), voire jouent le rôle de réservoir et sont impliqués dans la transmission indirecte des parasites à

d'autres espèces aviaires, comme cela a été le cas avec les manchots du zoo de la Palmyre (Leclerc, 2008).

La majorité des infestations ont été identifiées chez des corvidés arrivés au printemps et à l'été pour les trois genres d'hémosporidies. Même si la part de juvéniles était plus importante dans les cas d'infestations, les analyses statistiques n'ont pas permis de conclure quant à cette tendance compte tenu des effectifs largement inférieurs des corvidés adultes. Cette constatation ne serait pourtant pas incohérente avec ce qui a été déjà décrit : le printemps et l'été sont les saisons reconnues comme les plus favorables à la transmission d'hémosporidies aux rapaces et corvidés.

La majorité des infestations était de faible intensité quel que soit le genre de l'hémosporidie. En revanche, les degrés moyens et forts ont été uniquement retrouvés chez les juvéniles dans le cas d'*Haemoproteus* et *Leucocytozoon*, tandis que tous les degrés d'intensité ont été retrouvés dans les 3 classes d'âge pour *Plasmodium*.

f. Co-infestations

Les cas de co-infestations ont exclusivement été retrouvés chez les corvidés dans cette étude. Les co-infestations concernent 10 % des corvidés de l'échantillon et 20,5 % des corvidés infestés. *Plasmodium* concernait la majorité des cas de co-infestations et son association avec *Haemoproteus* était aussi la plus importante. Des résultats similaires ont été notés dans une étude concernant les corvidés dans le sud de la France, à la nuance près que *Haemoproteus* était majoritaire devant *Plasmodium* (Jacquesson, 2019).

C. Perspectives

Cette étude confirme l'arrivée de rapaces et corvidés infestés aux hémosporidies en centre de soins ainsi que la présence des trois genres d'hémo-parasites (*Haemoproteus*, *Leucocytozoon* et *Plasmodium*) en Île-de-France. Malgré le faible nombre d'animaux analysés, le genre *Leucocytozoon* était bien représenté chez les rapaces, notamment chez ceux provenant de zones urbaines. Ces derniers pourraient alors participer à représenter indirectement un risque vis-à-vis des hémosporidies pour les autres oiseaux occupant ces territoires, dont ceux accueillis au Chuv-FS.

Le printemps et l'été semblent néanmoins être les saisons les plus à risque concernant l'infestation aux hémosporidies chez les rapaces et corvidés étudiés. Les parasites trouvent en effet des conditions climatiques plus favorables et un plus grand nombre d'hôtes vecteurs pour leur développement. Les belles saisons marquent aussi le pic d'activité des centres de soins à la faune sauvage, ce qui amène à avoir des populations d'oiseaux en convalescence plus denses que dans leur milieu naturel. En présence du vecteur associé, cette plus forte densité augmente le risque d'infestation pendant le séjour des oiseaux au centre, même si ce fait n'a pas pu être confirmé dans cette étude. Il est donc préférable de gérer l'hospitalisation des rapaces et corvidés de la manière la plus extensive possible. Pour la même raison, une lutte anti-vectorielle est aussi recommandée en centre (utilisation d'insecticides, filets, etc).

De plus, si cette étude n'a pas permis de déterminer s'il existait un risque de transmission inter-espèce d'hémosporidies, elle a été décrite dans d'autres centres de soins ou parcs zoologiques

(Leclerc, 2008). Séparer les différentes espèces d'oiseaux entre elles lors de leur séjour en centre pourrait limiter ce risque, même si les conséquences décrites en France ne sont majoritairement pas dramatiques en l'état actuel. Aussi, les centres de soins regroupent des animaux d'origine géographique variées, et sous réserve d'une transmission au sein du centre par la présence de vecteurs, un possible brassage de lignées ou de genres d'hémosporidies serait possible au sein d'une ou plusieurs espèces d'oiseaux.

Si l'infestation plus fréquente des juvéniles n'a pas été démontrée statistiquement ici, une tendance en faveur de leur plus grande susceptibilité d'infestation semble se dessiner, et avec un plus fort degré d'infestation des jeunes par rapport aux adultes. Ces individus pourraient donc nécessiter une plus grande attention en centre.

Il a été observé que l'infestation aux hémosporidies est majoritairement sans influence sur le relâché potentiel des rapaces et corvidés. Au vu du coût que représentent les traitements spécifiques contre les hémosporidies et par les résistances potentielles aux antipaludéens, il est conseillé de n'envisager de traiter uniquement les animaux effectivement infestés et présentant des signes cliniques.

Enfin, cette étude portait sur les rapaces et corvidés arrivés au Chuv-FS de l'EnvA. L'étude de l'hémoparasitisme sur d'autres espèces aviaires présentes en Île-de-France pourrait la compléter. Aussi, il serait intéressant d'étudier l'hémoparasitisme des populations d'oiseaux arrivant dans d'autres centres de soins en France, par exemple ceux associés aux autres écoles vétérinaires. La communauté scientifique semble aussi de plus en plus s'intéresser aux hôtes vecteurs. Davantage d'études en ce sens en France pourraient aussi compléter les connaissances existantes sur les hémosporidioses aviaires.

Conclusion

Cette étude s'est intéressée à la situation épidémiologique vis-à-vis des hémospories chez les rapaces et corvidés arrivés au centre de soins de la faune sauvage de l'École nationale vétérinaire d'Alfort et présente une analyse statistique descriptive et inférentielle axée sur la présence ou non des genres *Haemoproteus*, *Leucocytozoon* et *Plasmodium*. Les résultats obtenus ont montré une variabilité de prévalence et du degré de l'infestation au sein des espèces de rapaces et corvidés.

La présence des hémospories était détectée chez 33 % des rapaces et 48 % des corvidés accueillis entre mai 2018 et mai 2019. L'origine des corvidés était majoritairement urbaine (Paris et petite couronne) et principalement péri-urbaine pour les rapaces. Chez les corvidés, *Plasmodium* était le genre d'infestation le plus fréquent et 20 % des infestations étaient liées à plusieurs genres d'hémospories. Chez les rapaces en revanche, aucun cas de co-infestation n'a été détecté, et *Leucocytozoon* était le genre majoritairement détecté dans ce groupe. Bien que non démontré statistiquement, il semblerait que les juvéniles arrivant pendant le printemps et l'été soient les individus les plus à risque d'être infestés.

Aussi, les résultats obtenus ont montré un taux de relâché similaire entre les individus infestés et non-infestés, confirmant l'affirmation que les hémosporioses aviaires sont la plupart du temps des affections subcliniques qui ne déclenchent pas nécessairement une maladie impactant l'état clinique des oiseaux au point de compromettre leur relâché. Cette observation souligne le rôle des centres de soins dans la gestion du risque lié à la dissémination des hémospories et dans la lutte antivectorielle.

Enfin, les résultats constatés dans cette étude et les tendances soulignées ont permis d'émettre un certain nombre de recommandations aux centres de soins quant à l'existence et à la gestion du risque d'hémoparasitisme dans leurs structures et de proposer de nouvelles perspectives d'études concernant les espèces aviaires et les régions étudiées afin de comparer les résultats obtenus chez des oiseaux appartenant à des espèces et biotopes différents.

Liste des références bibliographiques

- ADL S.M., BASS D., LANE C.E., *et al.* (2019) Revisions to the Classification, Nomenclature, and Diversity of Eukaryotes. *J. Eukaryot. Microbiol.* 66(1), 4-119
- AHMED F.E., MOHAMMED A.H. (1978) Haemoproteus columbae: course of infection, relapse and immunity to reinfection in the pigeon. *Z. Parasitenkd. Berl. Ger.* 57(3), 229-236
- APANIUS V., KIRKPATRICK C.E. (1988) Preliminary report of Haemoproteus tinnunculi infection in a breeding population of American kestrels (Falco sparverius). *J. Wildl. Dis.* 24(1), 150-153
- ARISUE N., HASHIMOTO T. (2015) Phylogeny and evolution of apicomplexans and apicomplexan parasites. *Parasitol. Int.* 64(3), 254-259
- ATKINSON C.T., GREINER E.C., FORRESTER D.J. (1986) Pre-erythrocytic development and associated host responses to Haemoproteus meleagridis (Haemosporina: Haemoproteidae) in experimentally infected domestic turkeys. *J. Protozool.* 33(3), 375-381
- ATKINSON C.T., THOMAS N.J., HUNTER D.B. (Éd.) (2008) Parasitic diseases of wild birds. Ames, Iowa, Wiley-Blackwell
- ATKINSON C.T., VAN RIPER C. (1991) Pathogenicity and epizootiology of avian haematozoa: Plasmodium, Haemoproteus, and Leucocytozoon. In *Bird-parasite interactions: Ecology, evolution, and behavior, Oxford ornithology series.* pp 19-48
- BAKER D.A. (2010) Malaria gametocytogenesis. *Mol. Biochem. Parasitol.* 172(2), 57-65
- BAKER K.C., RETTENMUND C.L., SANDER S.J., *et al.* (2018) Clinical effect of hemoparasite infections in snowy owls (Bubo scandiacus). *J. Zoo Wildl. Med.* 49(1), 143-152
- BALASUBRAMANIAM S., MULDER R.A., SUNNUCKS P., *et al.* (2013) Prevalence and diversity of avian haematozoa in three species of Australian passerine. *Emu - Austral Ornithol.* 113(4), 353-358
- BALENGHIEN T., DELECOLLE J. c (2009) Les Culicoides moucheron vecteurs du virus de la fièvre catarrhale ovine. *Insectes* 154 (3), 25-29
- BENNETT G.F., MONTGOMERIE R., SEUTIN G. (1992) Scarcity of Haematozoa in Birds Breeding on the Arctic Tundra of North America. *The Condor* 94(1), 289-292
- BENNETT G.F., BISHOP M.A., PEIRCE M.A. (1993) Checklist of the avian species of Plasmodium Marchiafava & Celli, 1885 (Apicomplexa) and their distribution by avian family and Wallacean life zones. *Syst. Parasitol.* 26(3), 171-179
- BENNETT G.F., FALLIS A.M. (1960) Blood parasites of birds in Algonquin Park, Canada, and a discussion of their transmission. *Can. J. Zool.* 38(2), 261-273
- BUSSIÉRAS J., CHERMETTE R. (1992) Abrégé de parasitologie vétérinaire. Fascicule II Protozoologie. Service de Parasitologie de l'École nationale vétérinaire d'Alfort
- CAMPBELL T.W. (2015) Exotic animal hematology and cytology, 4^e ed. Ames, Iowa, Wiley-Blackwell
- CARDONA C.J., IHEJIRIKA A., MCCLELLAN L. (2002) Haemoproteus lophortyx infection in bobwhite quail. *Avian Dis.* 46(1), 249-255
- CARMONA M., FINOL H.J., MARQUEZ A., NOYA O. (1996) Skeletal muscle ultrastructural pathology in Serinus canarius infected with Plasmodium cathemerium. *J. Submicrosc. Cytol. Pathol.* 28(1), 87-91
- CHAKAROV N., BLANCO G. (2021) Blood Parasites in Sympatric Vultures: Role of Nesting Habits and Effects on Body Condition. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 18(5), 2431
- CIADAMIDARO S., MANCINI L., RIVOSECCHI L. (2016) Black flies (Diptera, Simuliidae) as ecological indicators of stream ecosystem health in an urbanizing area (Rome, Italy). *Ann. Ist. Super. Sanita* 52(2), 269-276
- CLARK N.J., CLEGG S.M., LIMA M.R. (2014) A review of global diversity in avian haemosporidians (Plasmodium and Haemoproteus: Haemosporida): new insights from molecular data. *Int. J. Parasitol.* 44(5), 329-338
- DAWSON R.D., BORTOLOTTI G.R. (2000) Effects of Hematozoan Parasites on Condition and Return Rates of American Kestrels. *The Auk* 117(2), 373-380

- DE ANGELI DUTRA D., FECCHIO A., MARTINS BRAGA É., POULIN R. (2021) Migratory birds have higher prevalence and richness of avian haemosporidian parasites than residents. *Int. J. Parasitol.* 51(10), 877-882
- DESSER S.S., RYCKMAN A.K. (1976) The development and pathogenesis of *Leucocytozoon simondi* in Canada and domestic geese in Algonquin Park, Ontario. *Can. J. Zool.* 54(5), 634-643
- EARLE R.A., BASTIANELLO S.S., BENNETT G.F., KRECEK R.C. (1993) Histopathology and morphology of the tissue stages of *Haemoproteus columbae* causing mortality in Columbiformes. *Avian Pathol.* 22(1), 67-80
- EVANS M., OTTER A. (1998) Fatal combined infection with *Haemoproteus noctuae* and *Leucocytozoon ziemanni* in juvenile snowy owls (*Nyctea scandiaca*). *Vet. Rec.* 143(3), 72-76
- FAUNE ALFORT (s. d.) Historique du centre. In *Faune Alfort*. [<https://www.faune-alfort.org/qui-sommes-nous/historique/>] (consulté le 27/01/2022).
- FECCHIO A., CHAGAS C.R.F., BELL J.A., KIRCHGATTER K. (2020) Evolutionary ecology, taxonomy, and systematics of avian malaria and related parasites. *Acta Trop.* 204, 105364
- FERRELL S.T., SNOWDEN K., MARLAR A.B., GARNER M., LUNG N.P. (2007) Fatal hemoprotozoal infections in multiple avian species in a zoological park. *J. Zoo Wildl. Med.* 38(2), 309-316
- FIX A.S., WATERHOUSE C., GREINER E.C., STOSKOPF M.K. (1988) *Plasmodium relictum* as a cause of avian malaria in wild-caught magellanic penguins (*Spheniscus magellanicus*). *J. Wildl. Dis.* 24(4), 610-619
- GABALDON A., ULLOA G., ZERPA N. (1985) *Fallisia* (*Plasmodioides*) *neotropicalis* subgen. nov. sp.nov. from Venezuela. *Parasitology* 90(2), 217-225
- GANSER C., MONADJEM A., MCCLEERY R.A., NDLELA T., WISELY S.M. (2020) Is it best on the nest? Effects of avian life-history on haemosporidian parasitism. *Int. J. Parasitol. Parasites Wildl.* 13, 62-71
- GARVIN M.C., HOMER B.L., GREINER E.C. (2003) Pathogenicity of *Haemoproteus danilewskyi*, Kruse, 1890, in blue jays (*Cyanocitta cristata*). *J. Wildl. Dis.* 39(1), 161-169
- GILMAN S., BLUMSTEIN D.T., FOUFOPOULOS J. (2007) The Effect of Hemosporidian Infections on White-Crowned Sparrow Singing Behavior. *Ethology* 113(5), 437-445
- GIORGIADIS M. (2017) Les hémospories chez les Strigiformes : étude de l'infestation dans les parcs zoologiques français. Thèse de doctorat vétérinaire. Ecole nationale vétérinaire d'Alfort
- GONSALVES L., BICKNELL B., LAW B., WEBB C., MONAMY V. (2013) Mosquito consumption by insectivorous bats: does size matter? *PloS One* 8(10), e77183
- GREINER E.C., BENNETT G.F., WHITE E.M., COOMBS R.F. (1975) Distribution of the avian hematozoa of North America. *Can. J. Zool.* 53(12), 1762-1787
- GRILO M.L., VANSTREELS R.E.T., WALLACE R., *et al.* (2016) Malaria in penguins - current perceptions. *Avian Pathol.* 45(4), 393-407
- GRIM K.C., MCCUTCHAN T., LI J., *et al.* (2004) Preliminary results of an anticircumsporozoite DNA vaccine trial for protection against avian malaria in captive African black-footed penguins (*Spheniscus demersus*). *J. Zoo Wildl. Med.* 35(2), 154-161
- GUTIÉRREZ-LÓPEZ R., GANGOSO L., MARTÍNEZ-DE LA PUENTE J., *et al.* (2015) Low prevalence of blood parasites in a long-distance migratory raptor: the importance of host habitat. *Parasit. Vectors* 8(1), 189
- GUTIÉRREZ-LÓPEZ R., MARTÍNEZ-DE LA PUENTE J., GANGOSO L., SORIGUER R., FIGUEROLA J. (2020) *Plasmodium* transmission differs between mosquito species and parasite lineages. *Parasitology* 147(4), 441-447
- HAMILTON W.D., ZUK M. (1982) Heritable true fitness and bright birds: a role for parasites? *Science* 218(4570), 384-387
- HANEL J., DOLEŽALOVÁ J., STEHLÍKOVÁ Š., *et al.* (2016) Blood parasites in northern goshawk (*Accipiter gentilis*) with an emphasis to *Leucocytozoon toddi*. *Parasitol. Res.* 115(1), 263-270
- HARL J., HIMMEL T., VALKIŪNAS G., *et al.* (2022) Avian haemosporidian parasites of accipitriform raptors. *Malar. J.* 21(1), 14

- HAYWORTH A.M., VAN RIPER C., WEATHERS W.W. (1987) Effects of *Plasmodium relictum* on the metabolic rate and body temperature in canaries (*Serinus canarius*). *J. Parasitol.* 73(4), 850-853
- HELLGREN O., WALDENSTRÖM J., BENSCH S. (2004) A new PCR assay for simultaneous studies of *Leucocytozoon*, *Plasmodium*, and *Haemoproteus* from avian blood. *J. Parasitol.* 90(4), 797-802
- HELLGREN O., KELBSKOPF V., ELLIS V.A., *et al.* (2021) Low MSP-1 haplotype diversity in the West Palearctic population of the avian malaria parasite *Plasmodium relictum*. *Malar. J.* 20(1), 265
- HERNÁNDEZ-LARA C., ESPINOSA DE LOS MONTEROS A., IBARRA-CERDEÑA C.N., GARCÍA-FERIA L., SANTIAGO-ALARCON D. (2018) Combining morphological and molecular data to reconstruct the phylogeny of avian Haemosporida. *Int. J. Parasitol.* 48(14), 1137-1148
- HIMMEL T., HARL J., MATT J., WEISSENBOCK H. (2021) A citizen science-based survey of avian mortality focusing on haemosporidian infections in wild passerine birds. *Malar. J.* 20(1), 417
- HOLLIN T. (2017) Analyse de l'interactome de la Ser/Thr protéine phosphatase de type 1 (PP1) chez *Plasmodium falciparum* : caractérisation moléculaire et fonctionnelle de Gametocyte EXported Protein 15. Médecine humaine et pathologie. Université du Droit et de la Santé - Lille II
- HUIJBEN S., SCHAFTENAAR W., WIJSMAN A., PAAIJMANS K., TAKKEN W. (2009) Avian malaria in Europe: An emerging infectious disease? *J. Appl. Microbiol.* 1(4), 59-74
- HUNTER D.B., ROHNER C., CURRIE D.C. (1997) Mortality in fledgling great horned owls from black fly hematophaga and leucocytozoonosis. *J. Wildl. Dis.* 33(3), 486-491
- IOC WORLD BIRD LIST (s. d.) Crows, mudnesters, melampittas, Ibis, birds-of-paradise « IOC World Bird List. [<https://www.worldbirdnames.org/bow/crows/>] (consulté le 31/01/2022).
- ITO A., GOTANDA T. (2004) Field efficacy of recombinant R7 vaccine against chicken leucocytozoonosis. *J. Vet. Med. Sci.* 66(5), 483-487
- JACQUESSON T. (2019) Les hémospories des rapaces et corvidés : étude épidémiologique rétrospective chez des oiseaux accueillis à l'hôpital de faune sauvage Garrigues Cévennes de Ganges de 2011 à 2017. Thèse de doctorat vétérinaire. Ecole nationale vétérinaire d'Alfort
- JENKINS T., THOMAS G.H., HELLGREN O., OWENS I.P.F. (2012) Migratory behavior of birds affects their coevolutionary relationship with blood parasites. *Evolution* 66(3), 740-751
- JIMÉNEZ-PEÑUELA J., FERRAGUTI M., MARTÍNEZ-DE LA PUENTE J., SORIGUER R.C., FIGUEROA J. (2021) Urbanization effects on temporal variations of avian haemosporidian infections. *Environ. Res.* 199, 111234
- JOSHI V., DIMRI U., ALAM S., GOPALAKRISHNAN A. (2017) Buparvaquone therapy in a rock pigeon infected with *Haemoproteus columbae* showing torticollis. *J. Parasit. Dis.* 41(2), 514-516
- KARADJIAN G., PUECH M.-P., DUVAL L., *et al.* (2013) *Haemoproteus synnii* in *Strix aluco* from France: morphology, stages of sporogony in a hippoboscid fly, molecular characterization and discussion on the identification of *Haemoproteus* species. *Parasite* 20, 32
- KARELL P., BENSCH S., AHOLA K., ASGHAR M. (2017) Pale and dark morphs of tawny owls show different patterns of telomere dynamics in relation to disease status. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 284(1859), 20171127
- KEELING P.J., RAYNER J.C. (2015) The origins of malaria: there are more things in heaven and earth *Parasitology* 142(S1), S16-S25
- KOCAN R.M., CLARK D.T. (1966) Anemia in ducks infected with *Leucocytozoon simondi*. *J. Protozool.* 13(3), 465-468
- KORPIMÄKI E., TOLONEN P., BENNETT G.F. (1995) Blood parasites, sexual selection and reproductive success of European kestrels. *Écoscience* 2(4), 335-343
- LE GUILLOU G., CRBPO (2020) La Mouche-Plate N° 6. [https://crbpo.mnhn.fr/IMG/pdf/la_mouche_plate_n_6.pdf] (consulté le 20/01/2022).
- LE GUILLOU G., CRBPO (2021) La Mouche-Plate N° 7. [<https://www.birdringingstation-schlammwiss.com/app/download/10198647884/La+Mouche-Plate+n%C2%B0+7.pdf?t=1620754276>] (consulté le 20/01/2022).

- LECLERC A. (2008) Infections à Plasmodium chez les oiseaux sphénisciformes (manchots). Thèse de doctorat vétérinaire. Ecole nationale vétérinaire d'Alfort
- LEE S.-H., KWAK D., KIM K.-T. (2018) The first clinical cases of Haemoproteus infection in a snowy owl (*Bubo scandiacus*) and a goshawk (*Accipiter gentilis*) at a zoo in the Republic of Korea. *J. Vet. Med. Sci.* 80(8), 1255-1258
- LERTWATCHARASARAKUL P., SALAKIJ C., PRASOPSOM P., *et al.* (2021) Molecular and Morphological Analyses of Leucocytozoon Parasites (Haemosporida: Leucocytozoidae) in Raptors From Thailand. *Acta Parasitol.* 66(4), 1406-1416
- LIM L., MCFADDEN G.I. (2010) The evolution, metabolism and functions of the apicoplast. *Philos. Trans. R. Soc. B* 365(1541), 749-763
- LPO, COMITÉ D'HOMOLOGATION RÉGIONAL, MASSIN Y. (2021) Les oiseaux rares en Île-de-France en 2020 Vingtième rapport du Comité d'homologation régional Le Passer n°54. [<https://cdnfiles1.biolovision.net/www.faune-iledefrance.org/userfiles/Homologation/RapportCHRIDF2020.pdf>] (consulté le 20/01/2022).
- LPO (2022) observatoire-rapaces.lpo. [http://observatoire-rapaces.lpo.fr/index.php?m_id=20074] (consulté le 15/01/2022).
- LPO Île-de-France (2022) . [<https://lpo-idf.fr/>] (consulté le 27/01/2022).
- LPO Île-de-France, Corneille noire et Corbeau freux (2022) . [<https://www.lpo-idf.fr/?pg=sp&sp=136>] (consulté le 26/01/2022).
- LPO Île-de-France, la Chevêche d'Athena (2022) . [<https://www.lpo-idf.fr/?pg=sp&sp=43>] (consulté le 26/01/2022).
- LPO Île-de-France, la Chouette effraie (2022) . [<https://www.lpo-idf.fr/?pg=sp&sp=56>] (consulté le 26/01/2022).
- LPO Île-de-France, la Chouette hulotte (2022) . [<https://www.lpo-idf.fr/?pg=sp&sp=126>] (consulté le 26/01/2022).
- LPO Île-de-France, la Pie bavarde (2022) . [<https://www.lpo-idf.fr/?pg=sp&sp=112>] (consulté le 26/01/2022).
- LPO Île-de-France, le Busard Saint-Martin (2022) . [<https://www.lpo-idf.fr/?pg=sp&sp=90>] (consulté le 27/01/2022).
- LPO Île-de-France, le Chouca des tours (2022) . [<https://www.lpo-idf.fr/?pg=sp&sp=157>] (consulté le 26/01/2022).
- LPO Île-de-France, le Faucon crécerelle (2022) . [<https://www.lpo-idf.fr/?pg=sp&sp=84>] (consulté le 26/01/2022).
- LPO Île-de-France, le Faucon hobereau (2022) . [<https://www.lpo-idf.fr/?pg=sp&sp=118>] (consulté le 26/01/2022).
- LPO Île-de-France, le Geai des chênes (2022) . [<https://www.lpo-idf.fr/?pg=sp&sp=81>] (consulté le 27/01/2022).
- LPO Île-de-France, le Hibou moyen-duc (2022) . [<https://www.lpo-idf.fr/?pg=sp&sp=78>] (consulté le 26/01/2022).
- LPO Île-de-France, l'Épervier d'Europe (2022) . [<https://www.lpo-idf.fr/?pg=sp&sp=139>] (consulté le 26/01/2022).
- LPO, LESSAFIRE G. (2016) Nidification du Faucon hobereau à Bagneux (92); Synthèse ornithologique 2011. *In Le Passer, revue d'ornithologie francilienne, Paris, LPO 49-1*
- LPO, MALHER F. (2017a) Synthèse ornithologique 2012-2014 : non-passereaux, volet 1. *In Le Passer, revue d'ornithologie francilienne, Paris, LPO 50-1.* [https://lpo-idf.fr/site/_fichiers/passers/LePasser_50_1.pdf] (consulté le 20/01/2022).
- LPO, MALHER F. (2017b) L'Épervier d'Europe et le déclin du moineau domestique. *In Le Passer, revue d'ornithologie francilienne, Paris, LPO 50-2.* [https://lpo-idf.fr/site/_fichiers/passers/LePasser_50_2.pdf] (consulté le 20/01/2022).
- LPO, MALHER F. (2018) Notes d'ornithologie francilienne. *In Le Passer, revue d'ornithologie francilienne, Paris, LPO 51-1.* [https://lpo-idf.fr/site/_fichiers/passers/LePasser_51_1.pdf] (consulté le 20/01/2022).
- LPO, OBSERVATOIRE DES RAPACES (2022a) Faucon hobereau - observatoire-rapaces.lpo.fr. [http://observatoire-rapaces.lpo.fr/index.php?m_id=20060] (consulté le 26/01/2022).

- LPO, OBSERVATOIRE DES RAPACES (2022b) Faucon pèlerin - observatoire-rapaces.lpo.fr. [http://observatoire-rapaces.lpo.fr/index.php?m_id=20062] (consulté le 26/01/2022).
- LPO, OBSERVATOIRE DES RAPACES (2022c) Autour des palombes - observatoire-rapaces.lpo.fr. [http://observatoire-rapaces.lpo.fr/index.php?m_id=20054] (consulté le 26/01/2022).
- LPO, OBSERVATOIRE DES RAPACES (2022d) Bondrée apivore - observatoire-rapaces.lpo.fr. [http://observatoire-rapaces.lpo.fr/index.php?m_id=20049] (consulté le 26/01/2022).
- LPO, OBSERVATOIRE DES RAPACES (2022e) Buse variable - observatoire-rapaces.lpo.fr. [http://observatoire-rapaces.lpo.fr/index.php?m_id=20053] (consulté le 26/01/2022).
- LPO, OBSERVATOIRE DES RAPACES (2022f) Epervier d'Europe - observatoire-rapaces.lpo.fr. [http://observatoire-rapaces.lpo.fr/index.php?m_id=20057] (consulté le 26/01/2022).
- LPO, OBSERVATOIRE DES RAPACES (2022g) Chouette hulotte - observatoire-rapaces.lpo.fr. [http://observatoire-rapaces.lpo.fr/index.php?m_id=20108] (consulté le 26/01/2022).
- LPO, OBSERVATOIRE DES RAPACES (2022h) Effraie des clochers - observatoire-rapaces.lpo.fr. [http://observatoire-rapaces.lpo.fr/index.php?m_id=20109] (consulté le 26/01/2022).
- LPO, OBSERVATOIRE DES RAPACES (2022i) Chevêche d'Athéna - observatoire-rapaces.lpo.fr. [http://observatoire-rapaces.lpo.fr/index.php?m_id=20105] (consulté le 26/01/2022).
- LPO, OBSERVATOIRE DES RAPACES (2022j) Hibou moyen-duc - observatoire-rapaces.lpo.fr. [http://observatoire-rapaces.lpo.fr/index.php?m_id=20112] (consulté le 26/01/2022).
- MALEY G.J., DESSER S.S. (1977) Anemia in *Leucocytozoon simondi* infections. I. Quantification of anemia, gametocytemia, and osmotic fragility of erythrocytes in naturally infected Pekin ducklings. *Can. J. Zool.* 55(2), 355-358
- MARTINSEN E.S., PERKINS S.L., SCHALL J.J. (2008) A three-genome phylogeny of malaria parasites (*Plasmodium* and closely related genera): evolution of life-history traits and host switches. *Mol. Phylogenet. Evol.* 47(1), 261-273
- MCCUTCHAN T.F., GRIM K.C., LI J., *et al.* (2004) Measuring the effects of an ever-changing environment on malaria control. *Infect. Immun.* 72(4), 2248-2253
- MENDES L., PIERSMA T., LECOQ M., SPAANS B., RICKLEFS R. (2005) Disease-limited distributions? Contrasts in the prevalence of avian malaria in shorebird species using marine and freshwater habitats. *Oikos* 109, 396-404
- MILTGEN F., LANDAU I., RATANAWORABHAN N., YENBUTRA S. (1981) [Parahaemoproteus desseri n. sp.; gametogony and schizogony in the natural host: *Psittacula roseata* from Thailand, experimental sporogony in *Culicoides nubeculosus* (author's transl)]. *Ann. Parasitol. Hum. Comp.* 56(02), 123-130
- MØLLER A.P., NIELSEN J.T. (2007) Malaria and risk of predation: a comparative study of birds. *Ecology* 88(4), 871-881
- MORII T., FUJITA J., AKIBA K., *et al.* (1990) Protective immunity to *Leucocytozoon caulleryi* in chickens by a killed vaccine. *Parasitol. Res.* 76(7), 630-632
- MORII T. (1992) A Review of *Leucocytozoon caulleryi* Infection in Chickens. *J. Protozool. Res.* 2(4), 128-133
- MUSEUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE (2022a) Falconiformes Sharpe, 1874 - Rapaces diurnes. In *Inventaire National du Patrimoine Naturel*. [https://inpn.mnhn.fr/espece/cd_nom/186050] (consulté le 27/01/2022).
- MUSEUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE (2022b) Strigiformes - Rapaces nocturnes (Chouettes, Hiboux). In *Inventaire National du Patrimoine Naturel*. [https://inpn.mnhn.fr/espece/cd_nom/186170] (consulté le 27/01/2022).
- MUTLOW A., FORBES N. (2000) Haemoproteus in raptors: pathogenicity, treatment, and control. *Proc. 21st Annu. Conf. Expo Assoc. Avian Vet. 30 August-1 Sept. 2000 Portland USA*, pp 157-163.
- NARTSHUK E.P., MATYUKHIN A.V., SHAPOVAL A.P. (2019) First record of the parasitic louse fly *Ornithomya comosa* (Diptera: Hippoboscidae) in Europe and western Russia. *Zoosystematica Ross.* 28(2), 356-359
- NOBEL PRICE (1907) In *NobelPrize.Org*. [https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/1907/laveran/lecture/] (consulté le 17/11/2021).
- O'DONOGHUE P. (2017) Haemoprotozoa: Making biological sense of molecular phylogenies. *Int. J. Parasitol. Parasites Wildl.* 6(3), 241-256

- OLIAS P., WEGELIN M., ZENKER W., *et al.* (2011) Avian malaria deaths in parrots, Europe. *Emerg. Infect. Dis.* 17(5), 950-952
- OTS I., HÖRAK P. (1998) Health impact of blood parasites in breeding great tits. *Oecologia* 116(4), 441-448
- OUTLAW D.C., RICKLEFS R.E. (2010) Comparative gene evolution in haemosporidian (apicomplexa) parasites of birds and mammals. *Mol. Biol. Evol.* 27(3), 537-542
- OUTLAW D.C., RICKLEFS R.E. (2014) Species limits in avian malaria parasites (Haemosporida): how to move forward in the molecular era. *Parasitology* 141(10), 1223-1232
- PACHECO M.A., CEPEDA A.S., BERNOTIENÉ R., *et al.* (2018) Primers targeting mitochondrial genes of avian haemosporidians: PCR detection and differential DNA amplification of parasites belonging to different genera. *Int. J. Parasitol.* 48(8), 657-670
- PADILLA L.R., SANTIAGO-ALARCON D., MERKEL J., MILLER R.E., PARKER P.G. (2004) Survey for Haemoproteus spp., Trichomonas gallinae, Chlamydophila psittaci, and Salmonella spp. in Galapagos Islands columbiformes. *J. Zoo Wildl. Med.* 35(1), 60-64
- PEIRCE M.A. (2005) A checklist of the valid avian species of Babesia (Apicomplexa: Piroplasmorida), Haemoproteus, Leucocytozoon (Apicomplexa: Haemosporida), and Hepatozoon (Apicomplexa: Haemogregarinidae). *J. Nat. Hist.* 39(42), 3621-3632
- PERKINS S.L., SCHALL J.J. (2002) A molecular phylogeny of malarial parasites recovered from cytochrome b gene sequences. *J. Parasitol.* 88(5), 972-978
- PERMIN A., JUHL J. (2002) The development of Plasmodium gallinaceum infections in chickens following single infections with three different dose levels. *Vet. Parasitol.* 105(1), 1-10
- PINEDA-CATALAN O., PERKINS S.L., PEIRCE M.A., *et al.* (2013) Revision of hemoproteid genera and description and redescription of two species of chelonian hemoproteid parasites. *J. Parasitol.* 99(6), 1089-1098
- PLATONOVA E., PALINAUSKAS V. (2021) The Impact of Temperature on the Sporogonic Development of the Tropical Avian Malaria Parasite Plasmodium relictum (Genetic Lineage pGRW4) in Culex pipiens Form molestus Mosquitoes. *Microorganisms* 9(11), 2240
- PORNPANOM P., KASORNDORKBUA C., LERTWATCHARASARAKUL P., SALAKIJ C. (2021) Prevalence and genetic diversity of Haemoproteus and Plasmodium in raptors from Thailand: Data from rehabilitation center. *Int. J. Parasitol. Parasites Wildl.* 16, 75-82
- POWERS L., POKRAS M., RIO K., VIVERETTE C., GOODRICH L. (1994) Hemoparasites in Sharp-shinned Hawks (Accipiter striatus) during fall migration. *J. Raptor Res.* 28(3), 178-185
- QUILLFELDT P., MARTÍNEZ J., HENNICKE J., *et al.* (2010) Hemosporidian blood parasites in seabirds—a comparative genetic study of species from Antarctic to tropical habitats. *Naturwissenschaften* 97(9), 809-817
- RAIDA S.R., JAENSCH S.M. (2000) Central nervous disease and blindness in Nankeen kestrels (Falco cenchroides) due to a novel Leucocytozoon-like infection. *Avian Pathol.* 29(1), 51-56
- REMPLE J.D. (2004) Intracellular Hematozoa of Raptors: A Review and Update. *J. Avian Med. Surg.* 18(2), 75-88
- SCHOCH C.L., CIUFO S., DOMRACHEV M., *et al.* (2020) NCBI Taxonomy: a comprehensive update on curation, resources and tools. *Database* 2020(baaa062), 1-21
- SCHULTZ A. (2007) Patterns of avian haemosporidia in birds within the greater Cape Town area. Thèse Universitaire de master en sciences. University of Cape Town
- SEHGAL R.N.M., HULL A.C., ANDERSON N.L., *et al.* (2006) Evidence for cryptic speciation of Leucocytozoon spp. (Haemosporida, Leucocytozoidae) in diurnal raptors. *J. Parasitol.* 92(2), 375-379
- SEKAR V., RIVERO A., PIGEULT R., *et al.* (2021) Gene regulation of the avian malaria parasite Plasmodium relictum, during the different stages within the mosquito vector. *Genomics* 113(4), 2327-2337
- SHOKRANI H., NOROUZIAN H., DEZFOULIAN O. (2021) Exo-erythrocytic stages of Haemoproteus sp. in common buzzard (Buteo buteo): A histopathological and molecular study. *Int. J. Parasitol. Parasites Wildl.* 16, 64-69
- SIKAMÄKI P., RÄTTI O., HOVI M., BENNETT G.F. (1997) Association Between Haematozoan Infections and Reproduction in the Pied Flycatcher. *Funct. Ecol.* 11(2), 176-183

- SOL D., JOVANI R., TORRES J. (2003) Parasite mediated mortality and host immune response explain age-related differences in blood parasitism in birds. *Oecologia* 135(4), 542-547
- SVOBODOVÁ M., WEIDINGER K., PEŠKE L., *et al.* (2015) Trypanosomes and haemosporidia in the buzzard (*Buteo buteo*) and sparrowhawk (*Accipiter nisus*): factors affecting the prevalence of parasites. *Parasitol. Res.* 114(2), 551-560
- TAVERNIER P., SAGGESE M., SAGESSE M., VAN WETTERE A., REDIG P. (2005) Malaria in an eastern screech owl (*Otus asio*). *Avian Dis.* 49(3), 433-435
- THEODOSOPOULOS A.N., GRABENSTEIN K.C., BENSCH S., TAYLOR S.A. (2021) A highly invasive malaria parasite has expanded its range to non-migratory birds in North America. *Biol. Lett.* 17(9), 20210271
- THURBER M.I., GHAI R.R., HYEROBA D., *et al.* (2013) Co-infection and cross-species transmission of divergent Hepatocystis lineages in a wild African primate community. *Int. J. Parasitol.* 43(8), 613-619
- TOLLINI J., BRECKSEN A., SUREDA A. (2000) Prevention and treatment of avian malaria in a captive penguin colony. *Penguin Conserv.* 13(1), 26-27
- VALKIŪNAS G. (2005) Avian malaria parasites and other haemosporidia. Boca Raton, CRC Press
- VALKIŪNAS G., SEHGAL R.N.M., IEZHOVA T.A., HULL A.C. (2010) Identification of *Leucocytozoon toddi* group (Haemosporida: Leucocytozoidae), with remarks on the species taxonomy of leucocytozoids. *J. Parasitol.* 96(1), 170-177
- VALKIŪNAS G., ILGŪNAS M., BUKAUSKAITĖ D., *et al.* (2018) Characterization of *Plasmodium relictum*, a cosmopolitan agent of avian malaria. *Malar. J.* 17(1), 184
- WIEGMANN A., SPRINGER A., RINAUD T., *et al.* (2021) The prevalence of *Leucocytozoon* spp. in nestlings of three wild raptor species including implications on haematological and blood chemistry values. *Int. J. Parasitol. Parasites Wildl.* 16, 236-243
- WILLIAMS R.B. (1985) Biliverdin production in chickens infected with the malarial parasite *Plasmodium gallinaceum*. *Avian Pathol.* 14(3), 409-419
- WILLIAMS R.B. (2005) Avian malaria: clinical and chemical pathology of *Plasmodium gallinaceum* in the domesticated fowl *Gallus gallus*. *Avian Pathol.* 34(1), 29-47
- WILSON R.J., DENNY P.W., PREISER P.R., *et al.* (1996) Complete gene map of the plastid-like DNA of the malaria parasite *Plasmodium falciparum*. *J. Mol. Biol.* 261(2), 155-172
- WORK T.M., RAMEYER R.A. (1996) *Haemoproteus iwa* n. sp. in great frigatebirds (*Fregata minor* [Gmelin]) from Hawaii: parasite morphology and prevalence. *J. Parasitol.* 82(3), 489-491
- WORLD HEALTH ORGANISATION (2021) World malaria report 2020. [<https://www.who.int/publications-detail-redirect/9789240015791>] (consulté le 07/08/2021).
- YOSHIMOTO M., OZAWA K., KONDO H., *et al.* (2021) A fatal case of a captive snowy owl (*Bubo scandiacus*) with *Haemoproteus* infection in Japan. *Parasitol. Res.* 120(1), 277-288
- YOTOKO K.S.C., ELISEI C. (2006) Malaria parasites (Apicomplexa, Haematozoa) and their relationships with their hosts: is there an evolutionary cost for the specialization?: Malaria parasites and their relationships with hosts. *J. Zool. Syst. Evol. Res.* 44(4), 265-273
- ZHAO W., CAI B., QI Y., *et al.* (2014) Multi-Strain Infections and 'Relapse' of *Leucocytozoon sabraezesi* Gametocytes in Domestic Chickens in Southern China. *PLoS One* 9(4), e94877

Annexe 1 : Lexique

-Anautogène : se dit des femelles diptères qui ont besoin de se nourrir de sang qui contient les protéines nécessaires pour permettre la maturation des oeufs (en opposition aux femelles autogènes qui peuvent se passer de sang pour la maturation des oeufs).

-Apicoplaste : organelle de type plaste non photosynthétique entourée de deux double membranes et contenant de l'ADN circulaire, présente chez les parasites *Apicomplexa* et participant à la pénétration active du parasite dans les cellules de l'hôte. Il serait un vestige de chloroplaste.

-Clades : en phylogénie, un clade ou groupe monophylétique est un groupe d'organismes, vivants ou ayant vécu, comprenant un ancêtre commun particulier et l'ensemble de ses descendants.

-Cryptozoïte : méronte de première génération dans la mérogonie exo-érythrocytaire primaire (le suffixe « -zoïte » est impropre dans ce cas, mais le terme a été consacré par l'usage).

-Cycle hétéroxène : cycle évolutif parasitaire à deux ou plusieurs hôtes. On y distingue un hôte intermédiaire (qui héberge des formes en développement et permet leur évolution) et un hôte définitif (qui héberge les formes adultes, sexuées). L'hôte intermédiaire peut être facultatif ou obligatoire.

-Gamète : produit issu de la gamétogonie. Cellule sexuée (mâle ou femelle), haploïde, destinée à la fécondation, dont le noyau comporte un nombre N de chromosomes égal à la moitié de celui des cellules originelles. La fusion de deux gamètes produit un oeuf (ou zygote).

-Gamétocyte : produit de la transformation du mérozoïte au cours de la gamétogonie, qui donnera un ou plusieurs gamètes.

-Gamétogonie : formation de gamétocytes à partir de mérozoïtes et qui donneront à terme des gamètes.

-Haploïde : une cellule est haploïde lorsque chaque noyau ne possède qu'un seul exemplaire de chaque chromosome. Ceci s'oppose aux cellules diploïdes, qui contiennent des chromosomes en double exemplaire ($2n$ chromosomes)

-Hématophage : qui se nourrit de sang.

-Hémozoïne : pigment issu de la digestion de l'hémoglobine par certaines hémospories dans les érythrocytes.

-Macrogamète : gamète femelle d'hémosporie ayant atteint sa maturité, de dimensions plus grandes que le gamète mâle (microgamète).

-Macrogamétocyte : gamétocyte femelle de plus grande dimension que le gamétocyte mâle.

-Mérogonie (=schizogonie) : multiplication asexuée, consistant en de nombreuses divisions noyau, transformant le trophozoïte en méronte.

-Mérontes (=schizontes) : issu de la transformation du trophozoïte, contenant plusieurs noyaux en division. Le méronte donne des cellules-filles appelées mérozoïtes (ou schizozoïtes) libérées à la suite de la rupture du méronte.

- Mérozoïte** : élément uninucléé, provenant de la division et du découpage du schizonte (ou méronte) dans le cycle de reproduction des sporozoaires.
- Métacryptozoïte** : méronte de deuxième génération dans la mérogonie exo-érythrocytaire secondaire (le suffixe « -zoïte » est impropre dans ce cas, mais le terme a été consacré par l'usage).
- Microgamète** : gamète mâle d'hémosporidie issu des microgamétocytes, qui chez *Plasmodium* possède un flagelle.
- Microgamétocyte** : gamétocyte mâle de dimension plus petite que le gamétocyte femelle.
- Nématocère** : sous-ordre d'insectes à antennes allongées à plus de 6 articles, diptères à allure de moucheron ou de moustique, par opposition à ceux ressemblant à des mouches (brachycères = antennes courtes).
- Oeuf (=zygote)** : cellule à 2n chromosomes résultant de la fusion des cellules sexuelles mâle et femelle, appelée aussi cellule-oeuf.
- Oocyste** : forme enkystée du gamète femelle fertilisé d'un hémosporidie, après son passage sous forme d'ookinète.
- Ookinète** : oeuf mobile résultant de l'union des gamètes, au cours de la phase de reproduction sexuée des sporozoaires.
- Orthorrhaphes** : Insectes diptères dont seules les femelles se nourrissent de sang. Leurs larves sont céphalées et leurs lymphes sont mobiles
- Paraphylétique** : en phylogénie, un groupe est dit paraphylétique quand il ne rassemble pas tous les descendants d'un ancêtre commun qu'il contient.
- Pecten** : structure choroïdienne oculaire richement vascularisée présente chez les oiseaux
- Phanérozoïte** : méronte issu de la mérogonie post-érythrocytaire.
- Schizogonie (=mérogonie)** : multiplication ou reproduction asexuée, consistant en de nombreuses divisions noyau, transformant le trophozoïte en méronte.
- Solénophagie** : Type de nutrition chez les insectes par ponction sanguine directement dans un capillaire sanguin de l'hôte.
- Spores** : formes à paroi épaisse, se formant à l'intérieur du protozoaire, voire à l'intérieure d'un kyste. Leur production peut se faire par sporogonie. Corpuscule unicellulaire ou pluricellulaire pouvant donner naissance sans fécondation à un nouvel individu.
- Sporogonie** : série de divisions asexuées ayant lieu à l'intérieur de l'oocyste, à la suite de la fécondation, et aboutissant à la formation de spores ou de sporozoïtes.
- Sporozoïte** : forme unicellulaire et allongée du parasite, produit de la sporogonie, et constituant la forme infestante dans l'hôte vecteur.
- Syncitium** : Masse de cytoplasme qui contient plusieurs noyaux. Chez les hémosporidies, le syncitium est un fragment de méronte avec au moins deux noyaux.
- Telmophagie** : ponction sanguine en créant dans le derme une petite poche sanguine, dont le contenu est ensuite absorbé.

-Trophozoïte : chez les hématozoaires, stade asexué du protozoaire capable de se nourrir.

-Zygote (=oeuf) : cellule à $2n$ chromosomes résultant de la fusion des cellules sexuelles mâle et femelle, appelée aussi cellule-oeuf.

Annexe 2 : Protocole de prélèvement et frottis sanguin

Matériel nécessaire :

Gants en latex pour l'opérateur et l'aide
Gants en cuir pour l'aide si nécessaire
Ethanol 70% dans une pissette
Aiguille 25 gauge (orange) de 16mm de long, une par oiseau
Pipette Pasteur cotonnée en verre de 150 mm de long
Tétine de pipetage
Lames de microscopes, environ 4 par oiseau
Tube à EDTA (bouchon violet), 1 par oiseau
Compresse
Crayon de papier
Marqueur indélébile

Consignes :

Deux personnes sont nécessaires pour réaliser une prise de sang à la veine brachiale : une personne dédiée à la contention et une autre personne pour le prélèvement sanguin.

Rassembler le matériel.

Identifier les lames qui vont être utilisées pour le frottis sanguin : noter à une extrémité de la lame et au crayon de papier (la coloration du frottis dissoudrait le feutre) la date du jour, le numéro de registre de l'oiseau au CEDAF et le numéro de la lame si plusieurs sont réalisées.

Identifier le tube EDTA : noter au feutre indélébile sur chaque tube la date du jour et le numéro de registre de l'oiseau au CEDAF.

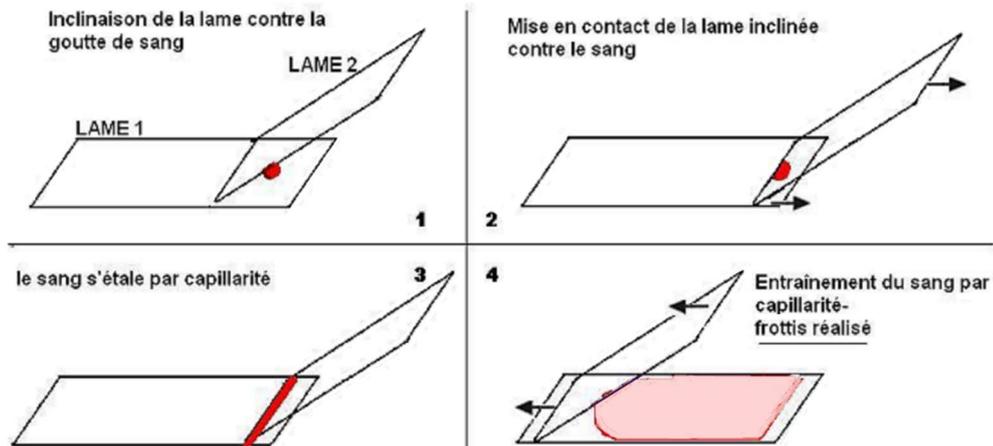
Enfiler les gants avant de toucher l'animal.

La personne dédiée à la contention immobilise l'animal en saisissant le corps d'une main et en maintenant la tête de l'autre. Cela permet d'une part de calmer l'animal en couvrant les yeux et de protéger l'opérateur du bec de l'oiseau d'autre part. Le choix de l'aile étendue se fait en fonction de l'examen clinique de l'animal et en fonction de la préférence manuelle de l'opérateur. L'aide peut poser l'animal sur le dos sur une table d'examen pour plus de facilité. La manipulation est stoppée en cas de stress trop important pour l'oiseau.

L'opérateur cherche la veine alaire et mouille la zone en regard avec de l'éthanol. L'aile est maintenue entre l'index et le majeur tandis que le pouce de la même main comprime la veine en amont du site de ponction. Une fois la veine identifiée, l'opérateur la ponctionne avec l'aiguille orange. Il n'est pas nécessaire d'insérer toute l'aiguille dans la veine. L'opérateur place ensuite la pipette Pasteur en verre au bout de l'aiguille pour aspirer par capillarité le sang qui sort de la garde.

Lorsque le prélèvement est fait, relâcher la compression, retirer l'aiguille et comprimer le site de ponction avec une compresse. Si l'animal a été maintenu sur le dos pour le prélèvement, la compression peut se faire par l'aide et en position physiologique pour minimiser le stress de l'animal.

Mettre le sang dans le tube EDTA et agiter en conservant l'équivalent d'une goutte par lame dans la pipette Pasteur. Déposer une goutte en bordure lame sur chacune d'entre elles. Réaliser les frottis rapidement, avant que la goutte de sang ne sèche ou ne coagule, de la manière suivante :



svt - académie de versailles

Une fois sèches, colorer les lames au RAL 555 (principalement utilisé dans cette étude) ou au MGG.

Conservation :

Une fois sèches, colorer les lames au RAL 555 (principalement utilisé dans cette étude) ou au MGG : insérer puis ressortir 10 fois de suite la lame dans chaque fixateur/colorant, puis rincer en plaçant sous un faible flux d'eau en évitant de diriger le flux directement sur le sang.

Les tubes EDTA serviront à réaliser une étude génomique et moléculaire au Muséum d'Histoire naturelle ou à faire d'autres frottis.

Annexe 3 : Tableaux de contingence

Examen clinique / Devenir	Relâché	Euthanasie	Mort spontanée	Inconnu
	n	n	n	n
Traumatisme	29	31	17	1
Métabolique/nutritionnel	7	8	10	1
Infectieux	1	0	1	0
Inconnu	42	3	27	6

Type d'infestation	<i>Haemoproteus</i>	<i>Leucocytozoon</i>	<i>Plasmodium</i>	Co-infestation	Non infesté
	n	n	n	n	
Rapace	2	5	5	0	25
Corvidés	27	18	40	15	77

Saison d'arrivée / type d'infestation	<i>Haemoproteus</i>	<i>Leucocytozoon</i>	<i>Plasmodium</i>	Co-infestation	Non infesté
	n	n	n	n	n
Rapace					
Printemps	0	4	3	0	12
Été	1	0	2	0	5
Automne	1	1	0	0	5
Hiver	0	0	0	0	3
Corvidés					
Printemps	17	15	21	9	60
Été	12	2	17	6	8
Automne	0	1	2	0	5
Hiver	0	0	0	0	4

Département d'origine / type d'infestation	<i>Haemoproteus</i> n	<i>Leucocytozoon</i> n	<i>Plasmodium</i> n	Co- infestation n	Non infesté n
Rapace					
Deux-sèvres	0	1	0	0	
Essonne	0	1	0	0	2
Hauts-de-seine	0	1	0	0	
Nièvre	0	0	0	0	1
Oise	1	0	2	0	4
Paris	0	0	0	0	2
Seine-et-marne	0	1	2	0	8
Seine-Saint-Denis	0	1	0	0	2
Val d'Oise	1	0	0	0	1
Val-de-marne	0	0	0	0	3
Yvelines	0	0	0	0	2
Corvidés					
Côte d'Or			1		
Essonne	6	2	1	2	2
Hauts-de-seine	2	1	4	1	3
Paris	5	8	7	4	24
Seine-et-marne	1	0	3	0	7
Seine-Saint-Denis	2	0	7	2	6
Val d'Oise	0	0	0	0	3
Val-de-marne	12	5	11	4	23
Yvelines	0	0	1	0	1

Classe d'âge / type d'infestation	<i>Haemoproteus</i>	<i>Leucocytozoon</i>	<i>Plasmodium</i>	Co-infestation	Non infesté
	n	n	n	n	n
Rapace					
Juveniles dépendants	0	3	0	0	8
Juveniles indépendants	0	2	0	0	4
Adultes	2	0	4	0	13
Corvidés					
Juveniles dépendants	19	12	19	8	31
Juveniles indépendants	7	5	13	6	32
Adultes	2	1	6	0	12

LES HÉMOSPORIDIÉS DES RAPACES ET CORVIDÉS EN CENTRES DE SOINS : ENQUÊTE ÉPIDÉMIOLOGIQUE 2018-2019 AU CENTRE D'ACCUEIL DE FAUNE SAUVAGE DE L'ÉCOLE VÉTÉRINAIRE D'ALFORT (CHUV-FS)

AUTEUR : Sarah HILKA

RÉSUMÉ :

Les hémosporeidies bénéficient d'un regain d'intérêt à l'heure actuelle suite, entre autres, aux dommages qu'elles ont pu causer sur la faune sauvage et à l'importance croissante des centres de soin dans la réhabilitation de l'avifaune. Les objectifs de cette étude étaient de réaliser un état des lieux de la situation épidémiologique de l'hémoparasitisme touchant les rapaces et corvidés accueillis dans un centre de soins de la faune sauvage en Île-de-France, d'identifier de potentiels facteurs influençant l'infestation et sa transmission, afin de proposer des mesures adaptées de gestion du risque représenté par l'hémoparasitisme sur les rapaces et corvidés.

Une étude transversale monocentrique était réalisée sur 37 rapaces (6 espèces) principalement d'origine péri-urbaine et 150 corvidés majoritairement d'origine urbaine (4 espèces) arrivés au Chuv-FS de l'EnvA entre mai 2018 et mai 2019. L'analyse des frottis a permis l'identification morphologique des hémosporeidies et l'estimation de la parasitémie. Cette étude a mis en évidence trois genres d'hémosporeidies (*Haemoproteus*, *Leucocytozoon* et *Plasmodium*). Le taux de relâché très proche parmi les infestés et non infestés (72% des rapaces, 35% des corvidés) montre la faible incidence clinique liée à l'hémoparasitisme. L'analyse statistique des résultats a montré une association positive entre les corvidés juvéniles et l'infection par *Plasmodium* sp., L'infestation à *Plasmodium* en particulier était prédominante chez les corvidés et était aussi plus fréquemment impliquée dans les cas de co-infestations. Bien que non démontré statistiquement, *Leucocytozoon* semblait infester plus fréquemment les rapaces que les autres genres d'hémosporeidies.

Les résultats suggèrent que l'hémoparasitisme chez les rapaces et corvidés en centre de soins est une infestation majoritairement subclinique influençant probablement peu le potentiel relâché des oiseaux. Il est donc important de déterminer la présence des vecteurs dans les centres de soin et le risque de transmission pendant la période de réhabilitation. Ceci permettra d'établir les mesures de gestion de ce risque sur la lutte antivectorielle et permettra de réduire le risque de dissémination des hémosporeidies lors des relâchés.

MOTS CLÉS : HEMOSPORIDIE / PARASITOLOGIE / HAEMOPROTEUS / LEUCOCYTOZOON / PLASMODIUM / EPIDEMIOLOGIE / OISEAU / RAPACES / CORVIDES / CENTRE DE SOINS / FRANCE / ILE-DE-FRANCE

JURY :

Président : Pr Grégory JOUVION

Directrice de thèse : Dr Véronica RISCO-CASTILLO

Examineur : Dr Pascal ARNÉ

HEMOSPORIDIA OF RAPTORS AND CORVIDS IN WILDLIFE HOSPITALS : EPIDEMIOLOGICAL STUDY AT THE VETERINARY WILDLIFE HOSPITAL OF THE NATIONAL VETERINARY SCHOOL OF ALFORT FROM 2018 TO 2019

AUTHOR: Sarah HILKA

SUMMARY:

The scientific interest in Hemosporidia is currently being reawakened, following, amongst others, the damages they have caused on wildlife, as well as the expanding role of wildlife hospitals in matters of avifauna rehabilitation. This study's objectives were twofold: firstly, to compile a global overview of the epidemiological situation concerning hemoparasitism in the raptors and corvids fostered in a wildlife hospital in Île-de-France; secondly, to identify potential key factors in the haemosporidian infestation and its transmission in those species, in order to propose relevant risk mitigation measures.

Between May 2018 and May 2019, a transversal and monocentric study was conducted on birds sheltered at the wildlife hospital of the national veterinary school of Alfort, which included 37 raptors (6 species), mainly of peri-urban origins, and 150 corvids (4 species), mainly of urban origins. The analysis of the resulting blood smears allowed for the morphological identification of Hemosporidia and gave an estimate for the parasitemia.

This study highlighted the presence of three genera of hemosporidia (*Haemoproteus*, *Leucocytozoon* and *Plasmodium*). The close release rates between infested and non-infested birds (72% of raptors, 35% of corvids) shows the weak clinical impact of hemoparasitism. Statistical analysis of the results demonstrated a positive association between juvenile corvids and *Plasmodium* sp. infection. *Plasmodium* infestation was particularly predominant in corvids, and was also more frequently implicated in cases of co-infestations. Though it was not statistically proven, *Leucocytozoon* seems to be infecting raptors more often than any other genera of hemosporidia.

Results suggest that hemoparasitism in raptors and corvids in wildlife hospitals is a largely sub-clinical infestation, and has very little impact of the potential release of the birds. It is therefore crucial to determine the existence of vectors in wildlife hospitals, and to limit the risk of transmission during the rehabilitation period. Thus, it will allow for the implementation of risk management measures concerning vector control and will reduce the risk of dissemination of hemosporidies via released birds.

KEYWORDS: HEMOSPORIDIA / PARASITOLOGY / HAEMOPROTEUS / LEUCOCYTOZOON / PLASMODIUM / EPIDEMIOLOGY / BIRD / RAPTORS / CORVIDS / WILDLIFE HOSPITAL / FRANCE / ILE-DE-FRANCE

JURY:

Chairperson: Pr Grégory JOUVION

Thesis Director: Dr Véronica RISCO-CASTILLO

Reviewer : Dr Pascal ARNÉ