

ECOLE NATIONALE VÉTÉRINAIRE, AGROALIMENTAIRE ET DE L'ALIMENTATION  
NANTES ATLANTIQUE – ONIRIS

ANNÉE 2020

**RELATIONS ET IMPACTS DU CLIMAT,  
DU STRESS  
ET DES INFECTIONS PAR DES PARASITES SANGUINS  
SUR LES POPULATIONS DE SARCELLES À AILES BLEUES  
(*Anas discors*) DANS LES PRAIRIES CANADIENNES**

THÈSE pour le diplôme d'État de  
DOCTEUR VÉTÉRINAIRE

présentée et soutenue publiquement le 20 novembre 2020  
devant la Faculté de Médecine de Nantes par

**Anne, Marie, Thérèse, Charlotte LE GAC**

Née le 27/10/1995  
à Rennes (35)

JURY

Président : Monsieur Patrick LUSTENBERGER  
Professeur émérite à la Faculté de Médecine de Nantes

Membres : Monsieur François MEURENS  
Professeur à Oniris  
Monsieur Albert AGOULON  
Maître de Conférences à Oniris





ECOLE NATIONALE VÉTÉRINAIRE, AGROALIMENTAIRE ET DE L'ALIMENTATION  
NANTES ATLANTIQUE – ONIRIS

ANNÉE 2020

**RELATIONS ET IMPACTS DU CLIMAT,  
DU STRESS  
ET DES INFECTIONS PAR DES PARASITES SANGUINS  
SUR LES POPULATIONS DE SARCELLES À AILES BLEUES  
(*Anas discors*) DANS LES PRAIRIES CANADIENNES**

THÈSE pour le diplôme d'État de  
DOCTEUR VÉTÉRINAIRE

présentée et soutenue publiquement le 20 novembre 2020  
devant la Faculté de Médecine de Nantes par

**Anne, Marie, Thérèse, Charlotte LE GAC**

Née le 27/10/1995  
à Rennes (35)

JURY

Président : Monsieur Patrick LUSTENBERGER  
Professeur émérite à la Faculté de Médecine de Nantes

Membres : Monsieur François MEURENS  
Professeur à Oniris

Monsieur Albert AGOULON  
Maître de Conférences à Oniris



## Département **BPSA** Biologie, Pathologie et Sciences de l'Aliment

Responsable : **Hervé POULIQUEN** - adjoint : **Emmanuel JAFFRES**

Nutrition et endocrinologie	Patrick NGuyen* (Pr)	
Pharmacologie et Toxicologie	Jean-Claude Desfontis (Pr) Yassine Mallem (Pr) Antoine Rostang (MCC)	Martine Kammerer (Pr) Hervé Pouliquen* (Pr)
Physiologie fonctionnelle, cellulaire et moléculaire	Jean-Marie Bach (Pr) Lionel Martignat (Pr)	Julie Herve (MC) Grégoire Mignot (MC)
Histologie et anatomie pathologique	Jérôme Abadie* (MC) Laetitia Jaillardon* (MC)	Marie-Anne Colle* (Pr) Frédérique Nguyen* (MC)
Pathologie générale, microbiologie et immunologie	François Meurens (Pr) Jean-Louis Pellerin* (Pr)	Emmanuelle Moreau (MC HDR) Hervé Sebbag (MC)
Biochimie alimentaire industrielle	Clément Cataneo (MC) Laurent Le Thuaut (MC) Thierry Serot (Pr)	Joëlle Grua (MC) Carole Prost (Pr) Florence Texier (MC)
Microbiotech	Géraldine Boue (MC) Emmanuel Jaffres (MC) Raouf Tareb (MCC) Bénédicte Sorin (IE)	Nabila Haddad (MC) Mathilde Mosser (MC) Hervé Prevost (Pr)

## Département **SAESP** Santé des Animaux d'Élevage et Santé Publique

Responsable : **Alain CHAUVIN** - adjoint : **Raphaël GUATTEO**

Hygiène et qualité des aliments	Jean-Michel Cappelier* (Pr) Michel Federighi (Pr) Catherine Magras* (Pr) Fanny Renois -Meurens (MC)	Eriic Dromigny (MC HDR) Bruno Le Bizec (Pr) Marie-France Pilet(Pr)
Médecine des animaux d'élevage	Sébastien Assie* (MC) Isabelle Breyton (MC) Alain Douart* (MC) Mily Leblanc Maridor (MC) Anne Relun (MCC)	Catherine Belloc* (Pr) Christophe Chartier* (Pr) Raphaël Guatteo* (Pr)
Parasitologie, aquaculture, Faune sauvage	Albert Agoulon (MC) Ségolène Calvez (MC) Nadine Ravinet (MC)	Suzanne Bastian (MC) Alain Chauvin* (Pr)
Maladies réglementées, zoonoses et réglementation sanitaire	Carole Peroz (MC)	Nathalie Ruvoen* (Pr)
Élevage, nutrition et santé des animaux domestiques	Nathalie Bareille* (Pr) Christine Fourichon* (Pr HDR) Henri Dumon* (Pr) Lucile Martin (Pr)	François Beaudeau* (Pr) Aurélien Madouasse (MC) Nora Navarro-Gonzalez (MCC)

<b>Département DSC Sciences Cliniques</b>		
Responsable : <b>Catherine IBISCH</b> – adjoint : <b>Olivier GAUTHIER</b>		
Anatomie comparée	Eric Betti (MC) Claude Guintard (MC)	Claire Douart (MC)
Pathologie chirurgicale et anesthésiologie	Eric Aguado (MC HDR) Eric Goyenvalle (MC HDR) Caroline Tessier* (MC)	Olivier Gauthier (Pr) Béatrice Lijour (MC) Gwénola Touzot-Jourde* (MC)
Dermatologie, parasitologie des carnivores et des équidés, mycologie	Patrick Bourdeau* (Pr)	Emmanuel BENSIGNOR (Pr Ass)
Médecine interne, imagerie médicale et législation professionnelle vétérinaire	Nora Bouhsina (MCC) Anne Courouze* (Pr) Amandine Drut* (MC) Catherine Ibisch (MC) Odile Senecat (MC)	Nicolas Chouin (MC) Jack-Yves Deschamps (Pr) Marion Fusellier-Tesson (MC) Françoise Roux* (Pr)
Biotechnologies et pathologie de la reproduction	Djemil Bencharif (MC HDR) Jean-François Bruyas* (Pr)	Lamia Briand (MC HDR) Francis Fieni* (Pr)
<b>Département GPA Génie des Procédés Alimentaires</b>		
Responsable : <b>Olivier ROUAUD</b> - adjoint : <b>Sébastien CURET-PLOQUIN</b>		
Lionel Boillereaux (Pr) Marie De Lamballerie (Pr) Francine Fayolle (Pr) Vanessa Jury (MC) Alain Lebail (Pr) Jean-Yves Monteau (MC HDR) Laurence Pottier (MC) Cyril Toubanc (MC)	Sébastien Curet Ploquin (MC) Dominique Della Valle (MC HDR) Michel Havet (Pr) Emilie Korbel (MCC) Catherine Loisel (MC) Olivier Rouaud (Pr) Eve-anne Norwood (MCC)	
<b>Département MSC Management, Statistiques et Communication</b>		
Responsable : <b>Michel SEMENOU</b> - adjoint <b>Pascal BARILLOT</b>		
Mathématiques, statistiques, Informatique	Véronique Cariou (MC) El Mostafa Qannari (Pr) Chantal Thorin (Pr AG.)	Philippe Courcoux (MC) Michel Semenou (MC) Evelyne Vigneau (Pr)
Economie, gestion	Pascal Barillot(MC) Florence Beaugrand (MC) Sonia EL Mahjoub (MC) Samira Rousseliere (MC)	Ibrahima Barry (MCC) Sibylle Duchaine (MC) Jean-Marc Ferrandi (Pr)
Langues et communication	Marc Bridou (PLPa) David Guyler (ens. cont.) Shaun Meehan (ens. cont.)	Franck Insignares (IE) Linda Morris (PCEA)

BTs : **Laurence Freret (PCEA)** Christophe Caron (PLPA), Pascale Fleury(PCEA), Virginie Magin (Ens. Cont.), Françoise Brichet (IAE).

Professeurs émérites : Poncelet

guide de lecture des tableaux suivants :Pr : Professeur, Pr. AG : Professeur agrégé. MC : maître de Conférences, MCC : MC contractuel, PLPA : Professeur Lycée Professionnel Agricole, PCEA : Professeur Certifié Enseignement Agricole, IE : Ingénieur d'Etudes ; IAE : Ingénieur de l'Agriculture et de l'Environnement ; ens. cont.: enseignant contractuel; HDR : Habilité à Diriger des Recherches

\* Vétérinaire spécialiste d'une spécialité européenne, américaine ou française

**La reproduction d'extraits est autorisée avec mention de la source. Toute reproduction partielle doit être fidèle au texte utilisé. Cette thèse devra donc être citée comme suit :**

LE GAC, A. (2020). Relations et impacts du climat, du stress et des infections par des parasites sanguins sur les populations de Sarcelles à ailes bleues (*Anas discors*) dans les prairies canadiennes. Thèse de doctorat vétérinaire, Faculté de Médecine, Nantes. Oniris : Ecole Nationale Vétérinaire, Agroalimentaire et de l'Alimentation Nantes Atlantique, 193 p.

## **REMERCIEMENTS** – *Aux membres du jury*

### **À Monsieur Patrick Lustenberger,**

*Professeur émérite à la Faculté de Médecine de Nantes*

Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence du jury de cette thèse,  
Hommages respectueux.

### **À Monsieur François Meurens,**

*Professeur en Virologie et Immunologie à Oniris*

Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter la direction de cette thèse,  
Pour vos nombreux et précieux conseils, votre disponibilité et votre soutien dans la  
rédaction de ce manuscrit,  
Pour m'avoir permis de découvrir Saskatoon et de réaliser ce projet au Canada,  
Mes plus sincères remerciements.

### **À Monsieur Albert Agoulon,**

*Maître de conférence en Parasitologie à Oniris*

Pour m'avoir fait l'honneur de siéger à mon jury de thèse,  
Mes plus sincères remerciements.

## **REMERCIEMENTS – À ceux ayant permis la réalisation de cette étude**

### **Au Professeur Catherine Soos,**

*Professeur au département de Pathologie du Western College of Veterinary Medicine (WCVM), University of Saskatchewan (Canada)*

Pour m'avoir proposé ce sujet de thèse passionnant et avoir accepté d'encadrer ce travail,  
Pour m'avoir fait confiance et pour tous vos conseils et apports à cette étude,  
Pour votre bienveillance et votre accueil chaleureux,  
Mes plus sincères remerciements.

### **À Ajaypal Kahlon,**

Pour tous tes conseils avisés et le temps précieux que tu m'as accordé,  
Pour ton soutien dans l'écriture de ce manuscrit,  
Pour la réalisation des dosages de corticostérone dans les plumes,  
Mes plus sincères remerciements.

### **À toute l'équipe d'Environment and Climate Change Canada (ECCC) et du WCVM,**

Pour leur accueil,  
Et plus particulièrement à Ajaypal Kahlon, Landon McPhee, Jamille McLeod, Mariana Villegas, Karen Gesy et Fiona Stubert pour le temps consacré et l'aide qu'ils m'ont apportée pendant la collecte des données, et pour les moments inoubliables passés sur le terrain,  
Très sincères remerciements.

### **À l'équipe de United-States Fish and Wildlife Service (USFWS),**

Pour toute l'aide apportée dans la collecte des données,  
Sincères remerciements.

### **Au personnel du Laboratoire du département de pathologie vétérinaire du WCVM,**

Pour la réalisation de la coloration des frottis sanguins,  
Remerciements.

**REMERCIEMENTS** – *À toutes les équipes qui m'ont accueillie en stage au cours de mes études,*

Et en particulier :

**À l'équipe de la Clinique Vétérinaire de la Gare à Fougères (35),**

Pour m'avoir transmis la passion du métier de vétérinaire et pour tout ce que vous m'avez appris,  
Pour avoir soigné mes animaux,  
Avec toute mon amitié, mes plus sincères remerciements.

**À Emmanuel Risi et à l'équipe FauneVet du Centre Hospitalier Vétérinaire Atlantia de Nantes (44),**

Pour m'avoir partagé votre passion des NAC,  
Sincères remerciements.

**À Véronique Mentré et à l'équipe de l'Arche des NAC à Pontoise (95),**

Pour votre confiance et les connaissances que vous m'avez transmises,  
Pour vos précieux conseils,  
Sincères remerciements.

**À toute l'équipe de la Clinique Vétérinaire des Halles à Strasbourg (67),**

Pour m'apprendre tant de choses et me permettre de continuer à me former tous les jours,  
Pour l'année inoubliable que je vais passer avec vous,  
Promis, je reviens avec des gâteaux bretons.

## **REMERCIEMENTS – À ma famille,**

### **À mon père,**

Pour ta relecture attentive et tes nombreux conseils avisés,  
Pour ton soutien sans faille et pour m'avoir transmis la passion d'apprendre et la passion des siestes,  
Pour m'avoir permis de devenir ce que je suis et d'accomplir mon rêve.  
Pour être là aujourd'hui et depuis toujours.

### **À ma mère,**

Pour ton amour et soutien de tous les jours,  
Pour m'avoir permis de me construire jour après jour et de réaliser mon rêve,  
Parce que tu as toujours été là pour moi et Jochin,  
Parce que je sais que tu vas pleurer en lisant ces lignes et parce que moi aussi.

### **À Josselin,**

Pour ta relecture et soutien dans la rédaction de cette thèse,  
Pour tous les souvenirs qu'on a pu se créer et qu'on continuera à se créer,  
Parce que l'avenir est au Groenland,  
Parce que tu es le meilleur grand-frère qu'une petite sœur puisse avoir,  
tout simplement.

**À Cachou et Dune,** parce que c'est aussi pour vous que je fais ce métier.

### **À Mâm, Grand-père, Papi, et Mamie,**

Pour avoir été des modèles et pour avoir cru en moi.  
Vous me manquez.

### **À toute ma famille,**

Mes oncles et tantes, Anne-Marie, Christèle, Christophe, Hervé, Jean-Luc, Marie-Noëlle, Olivier, Pascale ; mes cousins, Gaëlle, Pierre, Marion, Erwan, Gwenn, Claire, Jeanne, et Brendan, Audrenn, Tanguy, Morgan, Mael, Evan, Gwendal, Enora, Ewen (à quand la prochaine cousinade ?). On ne choisit pas sa famille, mais si c'était le cas, je vous aurais choisis quand même. On se voit à Noël !  
À ma tata Brigitte, et mon tonton Christian.

## REMERCIEMENTS – À mes amis,

À **Pampers**, ma coloc, pour notre rencontre improbable dans un covoiturage la veille de la rentrée en école véto, pour notre colocation improvisée en première année avec trafic de micro-onde puis notre vraie colocation, pour nos soirées sushi et masque d'escargot, pour ta bonne humeur savoyarde et ton amour (ou pas) du fromage, tes « C'est quelle heure ? » et ton éternel à la dernière minute, pour notre partage de poncho à Rome (« si je ne t'avais pas ») et nos photos bomb, parce que sans toi (et Mushu d'amour) mes années véto n'auraient pas été pareilles. Merci mon petit !

À **Maskrim**, pour nos heures passées en CM dans un amphi quasi vide avec toi ne touchant pas un stylo, parce que t'es juste une personne géniale, avec ton humour et ton soutien sans faille. Et parce que ce surnom a vraiment la classe, il faut le dire ! Je fais un gros bisou à Amélie et Kinai au passage, j'ai hâte de venir squatter chez vous et manger des Mannele !

À **Flo**, pour ta générosité, pour nos débats où nous n'étions jamais d'accord, pour tes tartes au lait qui sont quand même trop bonnes, pour ton nouvel amour pour les petits Ruminants (oublie pas, tu avais promis de me ramener une chèvre). On t'attend à Strasbourg !

À **mes colocs de Nantes**, Pampers (et oui, tu es remerciée deux fois) et Léon, pour nos soirées bières et musique, nos improbables repas avec les restes du frigo, nos après-midi à essayer de tailler cette haie, et nos difficultés à gérer Bernadette.

À **Pauline et Laura**, pour tous les souvenirs que l'on s'est créés en Thaïlande, toutes nos galères qui rapprochent, et nos pizzas au Gorgonzola. Faut qu'on se réorganise une petite soirée bientôt !

À **mes parrains LF** : Goulot, Audrey, Biquet, Chachatte, Dory, Rémi, Elodie, Fifo, Fluffy, Geysier, Huguette, Karto, Maman, Mumu, Foxy, Pachouko, Placenta pour tous tes conseils sur la Thaïlande, et Startouff (parce que si je ne te mettais pas dans mes remerciements, tu aurais encore grogné, bon et puis parce que tu mérites d'y être quand même).

À **mon groupe de 4A**, Maskrim, Flo, Pampers (même trois fois en fait), Zoé, Diane, Marine, Morgane, Alexia, Greg, Maxime, Cylia, Amandine, Mélyss.

À **mes potes de Lyon**,

Et surtout à ma binôme marseillaise Camille, pour nos pancakes et caramel au beurre salé afin de tenir la semaine et pour ton amour pour les dalmatiens.

J'espère que, malgré nos internats respectifs, on va réussir à se voir cette année !

À **Johanne**, parce que malgré tout c'est quand même en partie grâce à toi que j'ai pu partir au Canada pour ma thèse. Et pour tous nos souvenirs inoubliables.

À **tous mes amis du Canada**, notamment Romain, Charles, Blaisia.

Et surtout à toi Chloé, pour toutes nos soirées à découvrir les meilleurs coins de Saskatoon, pour notre rencontre avec un bison, pour notre danse du Rocky Horror Picture Show. Parce que clairement sans toi, mes mois au Canada n'auraient pas été les mêmes. J'espère que tu vas vite pouvoir venir me voir en Europe qu'on se fasse un petit tour de festivals !

A Laurette et Eric pour leur magnifique accueil ! A très bientôt en Bretagne !

## **À tous mes amis d'enfance,**

**À Flo**, pour nos discussions toute la nuit à refaire le monde, nos bonhommes de neige, ton amitié après toutes ses années. On se fait un petit week-end découverte de l'Alsace bientôt ?

**À Ninouille**, pour highjacker la playlist du nouvel an avec Yves Jamait, pour notre amour pour Léo, pour ton canard en plein concert, pour tous nos délires et tous les moments inoubliables qu'on a passés ensemble, du cours de latin côte-côte aux squelettes de dinosaures au Canada. Promis je viens te voir à Birmingham (même si t'as mangé mon hochet !!).

**À Juju**, pour notre road trip en Ecosse (on y retourne quand ?), pour nos ratés à la chorale, nos délires, et bien sûr pour ton bonnet rose et ton manteau vert.

**À Manu**, pour ta grande bonté, ton humour pétillant, nos délires au solfège et notre duo de choc violon piano. Et enfin, n'oublions pas notre tea party qu'on doit se faire !

**À ma petite Chloche**, parce que même si ça fait longtemps qu'on se connaît, rien n'a changé, t'es toujours aussi géniale ! ça résume bien tout, non ?

**À Clarousse**, pour nos soirées à parler, pour ta si belle façon d'aborder le monde, pour ton talent d'artiste (tu décoreras ma clinique hein, t'avais promis ?).

**À Margotte**, pour nos délires de nouvel an et ton amour étrange pour Bruno Mars.

**À Louise**, pour nos 18 ans en commun, c'était classe ça !

**À ma petite Audrey**, pour nos soirées de terminale, nos révisions de sujets de bac, et nos longues discussions. Et parce qu'avec Guillerm, vous êtes juste trop mignons ! J'aurais trop aimé pouvoir visiter New York avec vous.

**À Charlène**, pour ta bonne humeur et ton humour cinglant et **à Bart**, pour ton calme apparent au milieu de la bande. On se voit quand ?

**À mes petits B2 d'amour**, ma seconde famille : à Agathe, à Alexiane, à MA13 pour tes discours et ton rire, à Aurel pour nos soirées Jurassic Park et ton talent pour reconnaître les étoiles, à Béré pour ton sourire et ta joie de vivre et nos révisions de G<sub>2</sub>E en écoutant Francis, à Chlochette notre seconde maman, à ma petite Eloïse ma voisine d'internat pour tout ce que tu es et pour ta personnalité rayonnante, à Martin notre chauffeur de covoit, à Isabouille pour nos discussions et tes imitations de Sid (tu me manques mon petit !), à Max pour nos balades en fin de soirées et nos soirées ciné (non, Suicide Squad n'est pas un bon film !), à Jean N'Eudes pour nous avoir sauvé avec ton studio, à Marie pour ton pétillant, à Oscar pour ta philosophie de la vie, à Sarah, à Margaux même si tu disparaissais toujours.

Pour nos soirées inoubliables et nos burgers de 15h. Pour notre coloc lors des oraux. Parce qu'avec vous ces deux années de prépa ont été géniales !

**À Tess**, pour tous nos souvenirs, pour les jours où tu réussis à goûter quelque chose et où j'essaye de te faire manger le plus de choses possibles, pour nos vacances à Naples à se goinfrer des meilleures pizzas de la ville et à se baigner en évitant les méduses, pour ton soutien de tous les jours, pour tous les efforts que tu fais chaque jour, pour ton talent à faire défiler le temps quand on est avec toi, pour nos discussions sans fin.

Crois-en toi, t'es une des personnes les plus merveilleuses que je connaisse !

**À Mini George**, pour nos discussions en français-allemand-anglais et nos petits pains, et  
« La vie en rose ».

**Aux Landeau** pour tous les étés qu'on a passés ensemble.

**Aux petits Godets et Jzuset.**

**Aux Le Bihan** et à Nina, pour nos parties de UNO à 40 cartes, et pour nos délires à la montagne.

**Aux Salomon et aux Lecoguic.**

**À tous mes professeurs** depuis l'école primaire jusqu'à maintenant,

**À Anne-Laure**, pour toutes ces années de piano et la découverte de mon amour pour Chopin.



# Table des matières

<b>Introduction</b> .....	<b>25</b>
<b>I. Climat, stress et infections par les hémoparasites chez les populations d'oiseaux migrateurs : connaissances actuelles et objectifs de l'étude</b> .....	<b>27</b>
<b>A. La Sarcelle à ailes bleues</b> .....	<b>27</b>
<b>B. Les hémoparasites aviaires</b> .....	<b>32</b>
1. Hémosporeidies aviaires.....	32
a) Généralités.....	32
b) <i>Haemoproteus</i> .....	36
c) <i>Plasmodium</i> .....	37
d) <i>Leucocytozoon</i> .....	38
e) Diagnostic différentiel des hémosporeidies.....	40
(1) <i>Haemoproteus</i> .....	40
(2) <i>Plasmodium</i> .....	41
(3) <i>Leucocytozoon</i> .....	42
2. <i>Microfilariae</i> .....	44
3. Autres hémoparasites aviaires.....	45
a) <i>Aegyptianella</i> .....	45
b) <i>Trypanosoma</i> .....	45
4. Le coût du parasitisme chez les hôtes aviaires.....	45
<b>C. Le stress chez les oiseaux</b> .....	<b>47</b>
1. Les réponses au stress chez les oiseaux.....	47
2. Un modèle pour expliquer l'impact des réponses au stress selon les perturbations environnementales : le « <i>Reactive Scope Model</i> ».....	48
3. Méthodes d'étude de la réponse au stress.....	50
a) Mesure de la corticostérone plasmatique.....	50
b) Mesure de la corticostérone dans les plumes.....	51
c) Le rapport hétérophiles sur lymphocytes.....	52
<b>D. Le climat : impacts sur les populations d'oiseaux et la dynamique des maladies infectieuses</b> .....	<b>55</b>
1. Altération des aires de reproduction.....	55
2. Modification de la dynamique migratoire.....	57
3. Modification de la dynamique des maladies infectieuses.....	59
a) Influence de la température.....	59
b) Autres facteurs conditionnant la distribution spatio-temporelle des vecteurs.....	60
4. Interactions entre le climat, les parasites et les hôtes aviaires.....	61
<b>E. Objectifs et hypothèses</b> .....	<b>65</b>
<b>II. Étude expérimentale</b> .....	<b>66</b>
<b>A. Cadre de l'étude</b> .....	<b>66</b>
<b>B. Matériel et Méthodes</b> .....	<b>67</b>
1. Sujets d'étude.....	67
2. Données à collecter.....	69
3. Collecte des données.....	70
a) Données collectées par échantillonnage et prélèvements lors des rassemblements pré-migratoires.....	70

b) Analyse des frottis sanguins .....	75
c) Méthode d'extraction de la corticostérone dans les plumes (Protocole du laboratoire du Dr. SOOS mis à jour en octobre 2019) .....	78
(1) Jour 1 : .....	79
(2) Jour 2 : .....	80
(3) Jour 3 : .....	80
d) Méthode immuno-enzymatique ELISA pour mesurer la corticostérone dans les plumes .....	82
e) Densité de population et des étendues d'eau .....	85
f) Données climatiques .....	87
4. Analyse des données : outils statistiques .....	91
<b>C. Résultats</b> .....	<b>99</b>
1. Description de l'échantillon .....	99
2. Détermination des prévalences apparentes de portage d'hémosporidies chez la Sarcelle à ailes bleues dans les prairies canadiennes de 2007 à 2017 (Objectif 1) .....	101
a) Prévalence apparente de portage d' <i>Haemoproteus</i> .....	105
b) Prévalence apparente de portage de <i>Plasmodium</i> .....	107
c) Prévalence apparente de portage de <i>Leucocytozoon</i> .....	109
d) Prévalence apparente de portage d'hémosporidies aviaires .....	111
3. Analyse des facteurs de risque potentiels associés au portage d'hémosporidies aviaires (Objectif 2a) .....	114
a) Facteurs de risque impliqués dans le portage d'au moins un des genres d'hémosporidies .....	114
b) Facteurs de risque impliqués dans le portage d' <i>Haemoproteus</i> .....	118
c) Facteurs de risque impliqués dans le portage de <i>Plasmodium</i> .....	119
d) Facteurs impliqués dans le portage de <i>Leucocytozoon</i> .....	121
4. Détermination de facteurs de stress responsables chez la Sarcelle à ailes bleues d'élévation des niveaux de CORTf et du rapport H/L (Objectif 2b) .....	123
a) Facteurs de variation du niveau de corticostérone (CORTf) dans les plumes chez les Sarcelles à ailes bleues .....	123
b) Facteurs de variation du rapport H/L chez les Sarcelles à ailes bleues .....	132
<b>D. Discussion</b> .....	<b>143</b>
1. Limites liées aux matériel et méthodes : .....	143
2. Synthèse des résultats obtenus .....	148
a) Description de l'échantillon et des effectifs .....	148
b) Caractéristiques épidémiologiques des hémosporidioses chez la Sarcelle à ailes bleues en Saskatchewan et Alberta de 2007 à 2017 .....	149
(1) Prévalence apparente de portage d'hémosporidies .....	149
(2) Facteurs de risque impliqués dans le portage d'hémosporidies chez la Sarcelle à ailes bleues .....	151
c) Facteurs de stress responsables d'élévation des niveaux de corticostérone dans les plumes (CORTf) et/ou des rapports hétérophiles sur lymphocytes (rapport H/L) chez la Sarcelle à ailes bleues .....	159
(1) Facteurs de variation du niveau de CORTf .....	159
(2) Facteurs de variation du rapport H/L .....	162
3. Perspectives .....	166
<b>Conclusion</b> .....	<b>168</b>
<b>Références</b> .....	<b>169</b>
<b>Annexes</b> .....	<b>177</b>

## Table des annexes

Annexe 1 : Couloirs nord-américains de migration des canards de surface .....	177
Annexe 2 : Sites de prélèvement des Sarcelles à ailes bleues incluses dans l'étude, en Alberta et Saskatchewan, entre 2007 et 2017 .....	178
Annexe 3 : Préparation des réactifs, solutions et contrôles internes pour la mesure de la corticostérone dans les plumes .....	179
Annexe 4 : Modèles de régression logistique construits pour étudier les facteurs de risque impliqués dans le portage d'hémosporidies aviaires chez la Sarcelle à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2008 à 2017 en excluant 2011, lors des rassemblements pré-migratoires.....	181
Annexe 5 : Modèles linéaires généralisés construits pour étudier les facteurs de stress impliqués dans les élévations des niveaux de corticostérone dans les plumes (CORTf) chez la Sarcelle à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2008 à 2017 en excluant 2011, lors des rassemblements pré-migratoires.....	187
Annexe 6 : Modèles linéaires généralisés construits pour étudier les facteurs de stress impliqués dans les élévations du rapport hétérophiles sur lymphocytes (H/L) chez la Sarcelle à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2008 à 2017 en excluant 2011, lors des rassemblements pré-migratoires.....	188
Annexe 7 : Etude comparative des prévalences apparentes de portage d'hémosporidies obtenues par microscopie selon la méthode décrite par Valkiunas et son équipe (Valkiūnas <i>et al.</i> , 2008), et par PCR (Ramey <i>et al.</i> , 2016), chez la Sarcelle à ailes bleues en Saskatchewan et Alberta, en 2012 et 2013.....	190

## Table des figures

Figure 1.1 Plumage nuptial d'un mâle de l'espèce <i>discors</i> du genre <i>Anas</i> .....	28
Figure 1.2 Femelle ou mâle revêtant un plumage d'éclipse de l'espèce <i>Anas discors</i> .....	29
Figure 1.3 Comparatif des tailles des espèces de canards de surface communes en Amérique du Nord.....	30
Figure 1.4 Cycle général des hémospories aviaires .....	35
Figure 1.5 Gamétocytes intra-érythrocytaires d' <i>Haemoproteus</i> chez la Sarcelle à ailes bleues ( <i>Anas discors</i> ) .....	40
Figure 1.6 Formes parasitaires intra-érythrocytaires de <i>Plasmodium</i> chez la Sarcelle à ailes bleues ( <i>Anas discors</i> ) .....	41
Figure 1.7 Macro-gamétocyte de <i>Leucocytozoon</i> chez la Sarcelle à ailes bleues ( <i>Anas discors</i> ) .....	42
Figure 1.8 Microfilaire chez la Sarcelle à ailes bleues ( <i>Anas discors</i> ) .....	44
Figure 1.9 Inclusions intra-érythrocytaires d' <i>Aegyptianella</i> chez la Sarcelle à ailes bleues ( <i>Anas discors</i> ) .....	45
Figure 1.10 Illustration du "Reactive Scope Model" et du concept de réponse allostatique .....	49
Figure 1.11 Schéma simplifié des interactions au sein de la triade "climat-stress-infection par les hémoparasites" et conséquences sur les populations d'hôtes aviaires .....	64
Figure 2.1 Illustration du modèle-type des pièges à appâts standards utilisés pour la capture des canards barboteurs .....	67
Figure 2.2 Transfert des oiseaux du piège à appâts dans la boîte flottante...	68
Figure 2.3 Illustration des différences au niveau des plumes d'ailes obtenues sur des cadavres de deux mâles, un juvénile et un adulte, et de deux femelles, une juvénile et une adulte, pour la détermination de l'âge et du sexe à partir du plumage chez la Sarcelle à ailes bleues .....	72
Figure 2.4 Prélèvements effectués chez une Sarcelle à ailes bleues capturée à <i>Last Mountain Lake</i> .....	74
Figure 2.5 Position et trajet réalisés lors de la lecture du frottis sanguin pour la numération leucocytaire.....	75
Figure 2.6 Leucocytes chez la Sarcelle à ailes bleues ( <i>Anas discors</i> ).....	77
Figure 2.7 Localisation de la coupe effectuée pour retirer le calamus.. .....	79
Figure 2.8 Déroulement du processus d'extraction au méthanol de la corticostérone des plumes selon le protocole du laboratoire du Dr Soos. ....	81
Figure 2.9 Principe de la technique ELISA utilisée dans cette étude.....	82
Figure 2.10 Préparation des tubes étalons de corticostérone utilisés dans le processus ELISA.....	83
Figure 2.11 Organisation de la plaque ELISA .....	84

Figure 2.12 Territoires dont sont issus les données de densité de population et les densités en étendues d'eau peu profondes de l'étude.....	86
Figure 2.13 Méthode de collecte des données géographiques, démographiques, cliniques, étiologiques et climatiques pour chaque sarcelle d'intérêt pour l'étude .....	90
Figure 2.14 Obtention du $b_{SMA}$ d'après la méthode décrite par Peig and Green, 2009 .....	92
Figure 2.15 Répartition annuelle des Sarcelles à ailes bleues incluses dans l'étude .....	100
Figure 2.16 Prévalences apparentes des hémospories dans les prairies canadiennes, de 2007 à 2017, chez la Sarcelle à ailes bleues.....	101
Figure 2.17 Prévalences apparentes de portage d' <i>Haemoproteus</i> chez la Sarcelle à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2007 à 2017 .....	105
Figure 2.18 Prévalences apparentes de portage de <i>Plasmodium</i> chez la Sarcelle à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2007 à 2017 .....	107
Figure 2.19 Prévalences apparentes de portage de <i>Leucocytozoon</i> chez la Sarcelle à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2007 à 2017 .....	109
Figure 2.20 Prévalences apparentes de portage d'au moins un des genres d'hémospories chez la Sarcelle à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2007 à 2017 .....	111
Figure 2.21 Probabilité d'infection par au moins un genre d'hémospories chez les Sarcelles à ailes bleues en fonction des résidus de la densité de Sarcelles à ailes bleues .....	116
Figure 2.22 Probabilité d'infection par au moins un genre d'hémospories chez les Sarcelles à ailes bleues en fonction de l'âge .....	116
Figure 2.23 Probabilité d'infection par au moins un genre d'hémospories chez les Sarcelles à ailes bleues en fonction du sexe .....	117
Figure 2.24 Probabilité d'infection par au moins un genre d'hémospories chez les Sarcelles à ailes bleues en fonction du rapport H/L après transformation logarithmique .....	117
Figure 2.25 Probabilité d'infection par le genre <i>Haemoproteus</i> chez les Sarcelles à ailes bleues en fonction du degré-jour cumulatif du 1er mai au jour de prélèvement.....	118
Figure 2.26 Probabilité d'infection par le genre <i>Plasmodium</i> chez les Sarcelles à ailes bleues en fonction du rapport H/L après transformation logarithmique .....	120
Figure 2.27 Probabilité d'infection par le genre <i>Leucocytozoon</i> chez les Sarcelles à ailes bleues en fonction de l'âge.. .....	122

Figure 2.28 Niveaux de corticostérone dans les plumes (CORTf) selon le sexe chez les Sarcelles à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2008 à 2017 en excluant 2011 .....	124
Figure 2.29 Niveaux de corticostérone dans les plumes (CORTf) selon l'âge chez les Sarcelles à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2008 à 2017 en excluant 2011 .....	124
Figure 2.30 Niveaux de corticostérone dans les plumes (CORTf) en fonction du portage d'au moins un genre d'hémosporidies chez les Sarcelles à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2008 à 2017 en excluant 2011.....	125
Figure 2.31 Niveaux de corticostérone dans les plumes (CORTf) en fonction de la parasitémie chez les Sarcelles à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2008 à 2017 en excluant 2011 .....	125
Figure 2.32 Niveaux de corticostérone dans les plumes (CORTf) en fonction de la vitesse moyenne du vent du 17 mai au jour de prélèvement chez les Sarcelles à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2008 à 2017 en excluant 2011 .....	126
Figure 2.33 Niveaux de corticostérone dans les plumes (CORTf) en fonction de la moyenne des températures journalières moyennes du 17 mai au jour de prélèvement chez les Sarcelles à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2008 à 2017 en excluant 2011 .....	126
Figure 2.34 Effet de l'âge sur les niveaux de corticostérone dans les plumes (CORTf) après transformation logarithmique, chez les Sarcelles à ailes bleues .....	129
Figure 2.35 Effet du sexe sur les niveaux de corticostérone dans les plumes (CORTf) après transformation logarithmique, chez les Sarcelles à ailes bleues .....	129
Figure 2.36 Effet de l'année sur les niveaux de corticostérone dans les plumes (CORTf) après transformation logarithmique, chez les Sarcelles à ailes bleues .....	130
Figure 2.37 Effet de la province sur les niveaux de corticostérone dans les plumes (CORTf) après transformation logarithmique, chez les Sarcelles à ailes bleues .....	130
Figure 2.38 Effet de la densité de population de canards de surface sur les niveaux de corticostérone dans les plumes (CORTf) après transformation logarithmique, chez les Sarcelles à ailes bleues .....	131
Figure 2.39 Rapport hétérophiles sur lymphocytes (H/L) selon le sexe chez les Sarcelles à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2008 à 2017 en excluant 2011.....	133
Figure 2.40 Rapport hétérophiles sur lymphocytes (H/L) selon l'âge chez les Sarcelles à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2008 à 2017 en excluant 2011 .....	133

Figure 2.41 Rapport hétérophiles sur lymphocytes (H/L) en fonction du portage d'au moins un genre d'hémosporidies chez les Sarcelles à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2008 à 2017 en excluant 2011.	134
Figure 2.42 Rapport hétérophiles sur lymphocytes (H/L) en fonction du portage de <i>Plasmodium</i> chez les Sarcelles à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2008 à 2017 en excluant 2011	134
Figure 2.43 Rapport hétérophiles sur lymphocytes (H/L) en fonction de la parasitémie chez les Sarcelles à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2008 à 2017 en excluant 2011	135
Figure 2.44 Rapport hétérophiles sur lymphocytes (H/L) en fonction de la diversité parasitaire chez les Sarcelles à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2008 à 2017 en excluant 2011	135
Figure 2.45 Effet de l'âge sur les rapports H/L après transformation logarithmique, chez les Sarcelles à ailes bleues	138
Figure 2.46 Effet de l'année sur les rapports H/L après transformation logarithmique, chez les Sarcelles à ailes bleues	139
Figure 2.47 Effet des résidus de densité de Sarcelles à ailes bleues sur les rapports H/L après transformation logarithmique, chez les Sarcelles à ailes bleues	139
Figure 2.48 Effet du portage d'au moins un des genres d'hémosporidies sur les rapports H/L après transformation logarithmique, chez les Sarcelles à ailes bleues.	140
Figure 2.49 Effet de l'indice de condition corporelle sur les rapports H/L après transformation logarithmique, chez les Sarcelles à ailes bleues	140
Figure 2.50 Schéma bilan des interactions mises en évidence dans l'étude chez la Sarcelle à ailes bleues dans les prairies canadiennes, au sein de la triade "climat-stress-infection par les hémosporidies"	167

## Table des tableaux

Tableau I.I Particularités des trois genres d'hémosporidies chez la Sarcelle à ailes bleues .....	43
Tableau I.II Méthodes d'études de l'activité adrénocorticale en réponse au stress.....	53
Tableau II.I Données à collecter pour chaque objectif de l'étude .....	69
Tableau II.II Critères de détermination de l'âge et du sexe reposant sur les plumes des ailes chez la Sarcelle à ailes bleues ( <i>Anas discors</i> ) .....	71
Tableau II.III Morphologie des leucocytes de la Sarcelle à ailes bleues sur frottis sanguin coloré avec une coloration Wright Giemsa .....	76
Tableau II.IV Contenu des puits de la plaque ELISA .....	84
Tableau II.V Stations météorologiques dont sont issues les données climatiques de l'étude.....	88
Tableau II.VI Liste des variables à expliquer et explicatives utilisées dans les modèles examinant les facteurs de risque impliqués dans le portage des hémosporidies aviaires chez la Sarcelle à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2007 à 2017 .....	92
Tableau II.VII Répartition des effectifs des Sarcelles à ailes bleues intégrées à l'étude, selon le lieu de capture, le sexe et l'âge ; et proportions correspondantes dans l'échantillon final.....	99
Tableau II.VIII Prévalences apparentes de portage des parasites sanguins mis en évidence par lecture des frottis sanguins colorés des Sarcelles à ailes bleues de l'étude, dans les prairies canadiennes de 2007 à 2017 .....	101
Tableau II.IX Prévalences apparentes d'hémosporidies chez la Sarcelle à ailes bleues ( <i>Anas discors</i> ) dans les prairies canadiennes, de 2007 à 2017...	103
Tableau II.X Caractéristiques du modèle de régression logistique multiple final retenu, avec les variables susceptibles d'expliquer les variations de probabilité de portage d'au moins un des genres d'hémosporidies chez les Sarcelles à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2008 à 2017, en excluant 2011 .....	115
Tableau II.XI Caractéristiques du modèle de régression logistique multiple final retenu, avec les variables susceptibles d'expliquer les variations de probabilité de portage de <i>Plasmodium</i> chez les Sarcelles à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2008 à 2017, en excluant 2011 .....	119
Tableau II.XII Caractéristiques du modèle de régression logistique multiple final retenu, avec les variables susceptibles d'expliquer les variations de probabilité de portage de <i>Leucocytozoon</i> chez les Sarcelles à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2008 à 2017, en excluant 2011 .....	121

Tableau II.XIII Caractéristiques du modèle de régression logistique multiple final retenu, avec les variables susceptibles d'expliquer les variations des niveaux de corticostérone dans les plumes chez les Sarcelles à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2008 à 2017, en excluant 2011 .....	128
Tableau II.XIV Caractéristiques du modèle de régression logistique multiple final retenu, avec les variables susceptibles d'expliquer les variations des rapports hétérophiles sur lymphocytes (H/L) chez les Sarcelles à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2008 à 2017, en excluant 2011.....	137

## Liste des abréviations

**AB** : Alberta

**AChE** : conjugué corticostérone-acétylcholinestérase

**AHY** : *after-hatch year* ou adultes

**AICc** : *corrected Akaike Information Criterion* ou Critère d'Information d'Akaike corrigé pour les échantillons de petite taille

**B<sub>0</sub>** : liaison maximale

**BBL** : *Bird Banding Laboratory*

**BBO** : *Bird Banding Office*

**BCI** : *Body condition index* ou Indice de condition corporelle

**Blk** : blanc

**b<sub>SMA</sub>** : pente de la régression par axe majeur standardisé

**CCH** : *Center for Coastal Health*

**cf.** : se référer à

**CORTf** : corticostérone dans les plumes

**CWS** : *Canadian Wildlife Service*

**ECCC** : *Environment and Climate Change Canada*

**ELISA** : *Enzyme-Linked ImmunoSorbent Assay*

**et al.** : et collaborateurs

**F** : femelles

**g** : unité d'accélération

**GIEC** : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

**H/L** : Hétérophiles sur lymphocytes

**HY** : *hatch-year* ou juvéniles

**L<sub>0</sub>** : moyenne arithmétique de la longueur « tête-bec » de l'échantillon

**LML** : *Last Mountain Lake*

**log(CORTf)** : niveaux de CORTf après transformation logarithmique

**log(H/L)** : rapport hétérophiles sur lymphocytes après transformation logarithmique

**LRT** : *likelihood ratio test*

**M** : mâles

**n** : nombre d'individus

**NSB** : *Non-specific binding* ou liaison non-spécifique

**OR** : *Odds ratio*

**PCR** : *Polymerase Chain Reaction* ou réaction par polymérisation en chaîne

**PBS** : *Phosphate buffer saline* ou solution saline tamponnée au phosphate

**resBWTE\_Density** : résidus de la régression linéaire de la densité de Sarcelles à ailes bleues en fonction de la densité en étendues d'eau peu profondes

**SK** : Saskatchewan

**SMA** : *standardised major axis* ou régression par axe majeur standardisé

**spp.** : espèces (du latin *species pluralis*)

**STAGE** : *Strategic Technology Application of Genomics in the Environment*

**t** : valeur du coefficient du test de Student

**TA** : *Total activity* ou activité totale

**USDA-APHIS** : *United States Department of Agriculture - Animal and Plant Health Inspection Service*

**USFWS** : *United-States Fish and Wildlife Service*



## Introduction

Le changement climatique est un phénomène global qui constitue un des défis majeurs du XXI<sup>e</sup> siècle (*Canada and Environment and Climate Change Canada, 2019*). Notre monde est confronté à des modifications environnementales rapides et à large échelle, comprenant un réchauffement global, une altération des écosystèmes, une intensification des pratiques agricoles, une raréfaction des ressources naturelles et une amplification des phénomènes naturels extrêmes (Møller *et al.*, 2010).

Le changement climatique et les modifications des écosystèmes qui en découlent pourraient avoir un impact majeur sur la dynamique des maladies infectieuses (*Millennium Ecosystem Assessment (Program), 2005*). De nombreux facteurs de stress peuvent ainsi agir en synergie sur les écosystèmes, menaçant de façon directe ou indirecte la santé humaine et animale. Les individus répondent à ces facteurs de stress via différents changements comportementaux et physiologiques, initiés suite à la libération de glucocorticoïdes par l'axe hypothalamo-hypophysaire chez les vertébrés (Bortolotti *et al.*, 2009). Les glucocorticoïdes sont les hormones majeures impliquées dans l'allostase, phénomène permettant à un organisme de répondre à différentes situations engendrant un stress, de le surpasser, et de ré-établir au mieux l'homéostasie (Legagneux *et al.*, 2013). Cependant, des niveaux chroniques élevés de glucocorticoïdes peuvent avoir des effets délétères sur la fonction immunitaire, la croissance, le métabolisme, la fonction de reproduction et la survie de l'individu (Bortolotti *et al.*, 2009).

Les perturbations environnementales, en tant que menace pour l'homéostasie des individus, représentent donc un défi adaptatif auquel un individu doit faire face (Bortolotti *et al.*, 2009). L'étude de la corticostérone, le principal glucocorticoïde chez les oiseaux, permet d'examiner les réponses des individus aux perturbations environnementales et de mieux comprendre les impacts des facteurs de stress sur la santé, la survie et les mécanismes adaptatifs des populations d'oiseaux (Legagneux *et al.*, 2013 ; Romero and Fairhurst, 2016).

De plus, si ces perturbations environnementales engendrent un stress avec libération de niveaux élevés de corticostérone et une potentielle diminution de l'immunité chez un individu, ce dernier pourrait alors être prédisposé à des maladies contre lesquelles il aurait normalement été en mesure de se défendre (Padgett and Glaser, 2003).

Les prairies canadiennes constituent un des plus importants pivots migratoires de l'hémisphère nord pour les Anatidés ou canards de surface (*Conservation of Migratory Species of Wild Animals, 2014*). Ainsi, des centaines de milliers d'oiseaux venant du nord, du centre ou du sud du continent américain, s'y rassemblent en période de reproduction, faisant des prairies canadiennes une zone clé d'infections croisées et de dispersion d'agents pathogènes, dont des parasites, entre de nombreuses espèces d'oiseaux (Ramey *et al.*, 2016).

La Sarcelle à ailes bleues (*Anas discors*), en tant qu'espèce commune de canard de surface avec la plus grande aire de migration (Nallar *et al.*, 2016), est un modèle idéal pour étudier la prévalence de parasites sanguins aviaires, qui pourraient être disséminés par cette espèce le long des couloirs migratoires.

Les hémospories, comprenant notamment les espèces du genre *Plasmodium*, *Haemoproteus* et *Leucocytozoon*, sont des parasites sanguins transmis par des arthropodes vecteurs et communs à la plupart des espèces d'oiseaux sauvages, dont les Sarcelles à ailes bleues (*Friend and United States Geological Survey*, 1999).

Dans un contexte de changement global, on peut s'attendre à des modifications directes et indirectes des interactions hôte-vecteur-parasite. En effet, les parasites, vecteurs et hôtes dépendent de leur environnement, à la fois pour leur développement, leur survie et leur reproduction. Cependant, il est difficile à l'heure actuelle de proposer une conjecture précise concernant les effets des infections parasitaires sur les hôtes aviaires, au sein d'un scénario de changement climatique qui affecte la triade hôte-vecteur-parasite (Møller *et al.*, 2010).

En plus d'étudier l'épidémiologie des hémospories aviaires chez la Sarcelle à ailes bleues dans les prairies canadiennes, l'objectif de cette étude expérimentale est d'examiner les relations entre le climat et le stress chez cet oiseau migrateur de la famille des *Anatidae*, et de déterminer si les réponses au stress ont des conséquences ultérieures sur l'état corporel et sur la probabilité d'infection par des hémospories.

Ces objectifs seront explorés en seconde partie de ce manuscrit, consacrée à la présentation de l'étude : son cadre et ses objectifs, le matériel et les méthodes utilisées, puis les résultats obtenus qui seront discutés en lien avec les données de la littérature. Auparavant, dans une première partie, quelques caractéristiques écobioécologiques des Sarcelles à ailes bleues et de leurs hémoparasites seront présentées, ensuite les caractéristiques et moyens de mesures du stress chez les oiseaux seront développés, pour enfin aborder les connaissances actuelles sur l'impact du climat sur les populations d'oiseaux et les infections par les hémoparasites.

# I. Climat, stress et infections par les hémoparasites chez les populations d'oiseaux migrateurs : connaissances actuelles et objectifs de l'étude

## A. La Sarcelle à ailes bleues

La Sarcelle à ailes bleues (*Anas discors*) est une espèce de petits canards barboteurs commune sur le continent américain (Guillemain and Elmberg, 2014 ; Rohwer *et al.*, 2002).

Cette espèce migratrice se reproduit dans les prairies du centre-nord des États-Unis et du centre du Canada. Elle hiverne dans le sud des États-Unis ainsi que dans le nord de la région néotropicale, au sud du Tropique du Cancer (Ramey *et al.*, 2016 ; Wilson *et al.*, 2017). Lors de la saison de reproduction, l'abondance des individus de cette espèce dépend de l'état des zones humides, avec une moins forte densité lors des années sèches. De plus, si les femelles ont tendance à revenir dans leurs régions natales et de reproduction d'une année sur l'autre comme chez la plupart des espèces de canards migrateurs, la Sarcelle à ailes bleues est cependant beaucoup plus opportuniste (Rohwer *et al.*, 2002). Certaines années, il est possible de la trouver hors de ses zones habituelles de reproduction, selon la couverture en zones humides propices, constituées d'étendues d'eau temporaires ou permanentes peu profondes (Bennett, 1938).

Parmi les Anatidés, la Sarcelle à ailes bleues est une exception car c'est une espèce à migration obligatoire qui initie sa migration d'automne en fin d'été, de mi-août à début septembre, bien avant la plupart des autres espèces de canards de surface (Rohwer *et al.*, 2002). Les individus de cette espèce sont également parmi les derniers à initier la migration de printemps vers les zones de reproduction (Bergeron *et al.*, 2015). La plupart des Sarcelles à ailes bleues migrent via le couloir migratoire du Mississippi et le couloir central, bien que certaines sarcelles migrent via le couloir migratoire atlantique plus à l'est (carte des couloirs migratoires en Annexe 1). Les individus migrant via le couloir migratoire central ou du Mississippi partent des prairies canadiennes (Saskatchewan, Alberta, Manitoba), traversent le Golfe du Mexique, pour arriver dans les aires d'hivernage de la zone néotropicale. Les individus empruntant le couloir atlantique quittent les aires de reproduction du nord-est des États-Unis pour migrer vers le sud via la Floride, pour arriver en Guyane, Colombie et Brésil (Garvon *et al.*, 2016 ; Wilson *et al.*, 2017).

Comme chez les autres espèces du genre *Anas*, la mue a lieu à la fin de la saison de reproduction (Fowler and Cubas, 2001). Les mâles initient leur mue annuelle légèrement plus tôt que les femelles, qui attendent généralement que leur progéniture ait fini de grandir avant de muer (Rohwer *et al.*, 2002).

Les individus de cette espèce se différencient des autres canards barboteurs de taille similaire par le *patch* bleu-ciel sur les plumes de couverture de l'aile et par le *speculum* ou miroir vert métallique sur les plumes secondaires de l'aile (Figure 1.1). Chez les mâles, ce miroir est iridescent (Carney, 1992).

Le dimorphisme sexuel est marqué dans cette espèce la majorité de l'année. Les mâles ont un croissant blanc entre l'œil et le bec, et une tache blanche à l'arrière de leur flanc (Figure 1.1). Les juvéniles des deux sexes ont un plumage similaire aux femelles pendant les premiers mois de vie. Puis, les mâles acquièrent dans leur première année un plumage nuptial très similaire à celui des mâles adultes. Après la saison de reproduction, les mâles revêtent un plumage d'éclipse, proche du plumage des femelles (Figure 1.2) (Rohwer *et al.*, 2002).



**Figure 1.1 Plumage nuptial d'un mâle de l'espèce *discors* du genre *Anas*** (source © Jay McGowan/Maucaulay Library at the Cornell Lab of Ornithology (ML28629141)). Le patch bleu-ciel sur les plumes de couverture et le speculum vert métallique iridescent sont bien visibles en vol.



**Figure 1.2** Femelle ou mâle revêtant un plumage d'éclipse de l'espèce *Anas discors* (source © Jay McGowan/Maucaulay Library at the Cornell Lab of Ornithology (ML43349981)).

La Sarcelle à ailes bleues constitue un excellent modèle pour cette étude bioécologique. Elle est en effet l'une des espèces de canards de surface avec la plus grande aire de migration, migration à la fois transnationale et transcontinentale (Garvon *et al.*, 2016). Elle pourrait ainsi participer à la dispersion d'agents pathogènes aviaires, comme les parasites sanguins, entre des aires géographiques éloignées. La Sarcelle à ailes bleues pourrait donc jouer un rôle dans l'échange intercontinental des hémoparasites entre les plaines d'Amérique du Nord et les territoires plus au Sud de l'Amérique tropicale dans un contexte de changement climatique (Ramey *et al.*, 2016).

De plus, du fait de leur relative petite taille comparativement à d'autres espèces de canards de surface (Figure 1.3), les individus de cette espèce font face à de lourdes contraintes que ce soit en termes de besoins énergétiques, du risque de prédation ou encore face aux différentes conditions environnementales (Guillemain and Elmberg, 2014).

En tant qu'espèce ubiquitaire du centre-nord de l'Amérique du Nord, la Sarcelle à ailes bleues est utilisée dans cette étude comme indicateur pour évaluer l'influence du climat sur les populations aviaires, et les conséquences sur les infections par les parasites sanguins.



Figure 1.3 Comparatif des tailles des espèces de canards de surface communes en Amérique du Nord (d'après les illustrations de Hines, 1978).

### **Bilan sur la Sarcelle à ailes bleues (*Anas discors*) :**

- Espèce migratrice de petits canards barboteurs, commune sur le continent américain et caractérisée par :
  - des aires de reproduction localisées dans les prairies du centre-nord des États-Unis et du centre du Canada, au niveau de zones humides constituées d'étendues d'eau peu profondes
  - un *patch* bleu-ciel sur les plumes de couverture de l'aile et un *speculum* vert métallique sur les plumes secondaires de l'aile
  - un dimorphisme sexuel marqué en période de reproduction, avant la mue.
- Modèle intéressant dans l'évaluation de l'influence du climat sur les populations aviaires, à la fois concernant le stress et les infections par les parasites sanguins :
  - espèce commune dans les prairies canadiennes
  - grande aire de migration avec possibilité de dispersion transcontinentale de pathogènes aviaires
  - petite taille laissant supposer des contraintes lourdes s'appliquant en termes de besoins énergétiques, de prédation, et face aux perturbations environnementales.

## B. Les hémoparasites aviaires

La présence de parasites dans les populations d'oiseaux sauvages est la règle plutôt qu'une exception. Cela n'implique pas forcément une maladie, et ainsi la plupart des parasites identifiés chez les oiseaux n'entraînent pas de signes cliniques. Cependant, la combinaison de divers facteurs comme une mauvaise condition corporelle, des co-infections par d'autres agents pathogènes comme le virus de l'influenza aviaire, ou d'autres types de stress, peut mener à l'expression d'une maladie parasitaire même lors d'infection par un parasite qui ne cause généralement pas de signes cliniques (Rush *et al.*, 2016).

Les hémoparasites sont fréquemment rencontrés dans les populations d'oiseaux, dont les Anatidés (Atkinson *et al.*, 2008 ; Rush *et al.*, 2016). De plus, du fait de la relative facilité à prélever du sang chez les espèces de la famille des Anatidés, les parasites sanguins sont de bons modèles potentiels pour étudier la dynamique des maladies infectieuses parasitaires dans les populations d'oiseaux sauvages.

### 1. Hémosporidioses aviaires

#### a) Généralités

Les hémosporidioses aviaires sont des maladies parasitaires à transmission vectorielle causées par des hémosporidies, terme regroupant des protozoaires parasites trouvés dans les cellules sanguines et les tissus de nombreuses espèces d'oiseaux. Parmi ces hémosporidies, trois genres proches sont communs à la plupart des espèces d'oiseaux sauvages et regroupent plus de 200 espèces décrites : *Haemoproteus spp.*, *Plasmodium spp.*, *Leucocytozoon spp.* (Atkinson and Van Riper III, 1991 ; Friend and United States Geological Survey, 1999 ; Martinsen *et al.*, 2008).

Les Anatidés, comprenant les oies, cygnes, canards et espèces apparentées comme les bernaches ou les ouettes, seraient fréquemment infectés par des hémosporidies. Ainsi, plus de 75% des espèces de canards de surface examinées hébergeraient des parasites d'un ou de plusieurs des trois genres précédemment cités (Friend and United States Geological Survey, 1999). *Haemoproteus* est le genre le plus représenté et a été mis en évidence chez environ 67% des espèces d'oiseaux infectées, suivi par *Plasmodium* puis *Leucocytozoon*, trouvés respectivement chez 41,5 et 39% des espèces aviaires infectées (Atkinson and Van Riper III, 1991).

Chez la Sarcelle à ailes bleues, les études menées par Bennett *et al.* (1974, 1975, 1982), examinant des frottis sanguins collectés dans les prairies canadiennes et américaines, ont rapporté des prévalences apparentes de 2,3 à 13,8%, 2,3 à 5,6% et 1,5 à 2,3% respectivement pour *Haemoproteus*, *Leucocytozoon* et *Plasmodium spp.* (Bennett *et al.*, 1974, 1975, 1982). Une étude plus récente menée par Ramey et son équipe utilisant des outils de biologie moléculaire rapporte des prévalences apparentes différentes, avec des pourcentages respectifs pour 2012 et 2013 de 12,7% et 7,0% pour *Plasmodium*, de

12% et 6% pour *Leucocytozoon*, et de 1,3% et 2,6% pour *Haemoproteus* (Ramey *et al.*, 2016).

L'infection avec absence de signes cliniques visibles semble être la règle sur le terrain, bien que certains individus puissent exprimer des signes généraux en phase aiguë comme de la faiblesse, une baisse d'état général et de l'anorexie. S'ils survivent à cette phase aiguë, les oiseaux deviennent infectés chroniques avec une immunité relative permettant une certaine résistance aux réinfections (Atkinson and Van Riper III, 1991). Ces infectés chroniques constituent les réservoirs du ou des parasites, qui survivent alors aux périodes de non-activité vectorielle (*Friend and United States Geological Survey*, 1999). Cependant, il reste de nombreuses zones d'ombre concernant la pathogénicité de ces parasites et leur impact sur les populations d'oiseaux sauvages. Notamment, les effets à long terme d'infections latentes ou chroniques sur la santé d'un individu restent peu connus (Atkinson *et al.*, 2008). De nombreuses études suggèrent que le stress est un facteur essentiel dans les rechutes des infections latentes et chroniques (Atkinson et Van Riper III 1991). Les quelques connaissances actuelles sur la pathogénicité d'*Haemoproteus*, *Plasmodium* et *Leucocytozoon* seront développées dans les parties relatives à chacun des genres.

Les infections par ces parasites intracellulaires sanguins sont saisonnières, car leur transmission dépend de la présence d'insectes vecteurs hématophages de l'ordre des Diptères (Atkinson and Van Riper III, 1991). Ainsi, en Amérique du Nord, la plupart des oiseaux migrateurs sont infectés au printemps après leur arrivée sur les zones de reproduction, lorsque les conditions de transmission sont alors optimales. En effet, les températures et parallèlement les populations de vecteurs augmentent progressivement au printemps. Les oiseaux peuvent également ré-exprimer des infections à bas-bruit suite au stress de la migration. De plus, la saison de reproduction implique la présence d'individus juvéniles non-immuns et sensibles (*Friend and United States Geological Survey*, 1999).

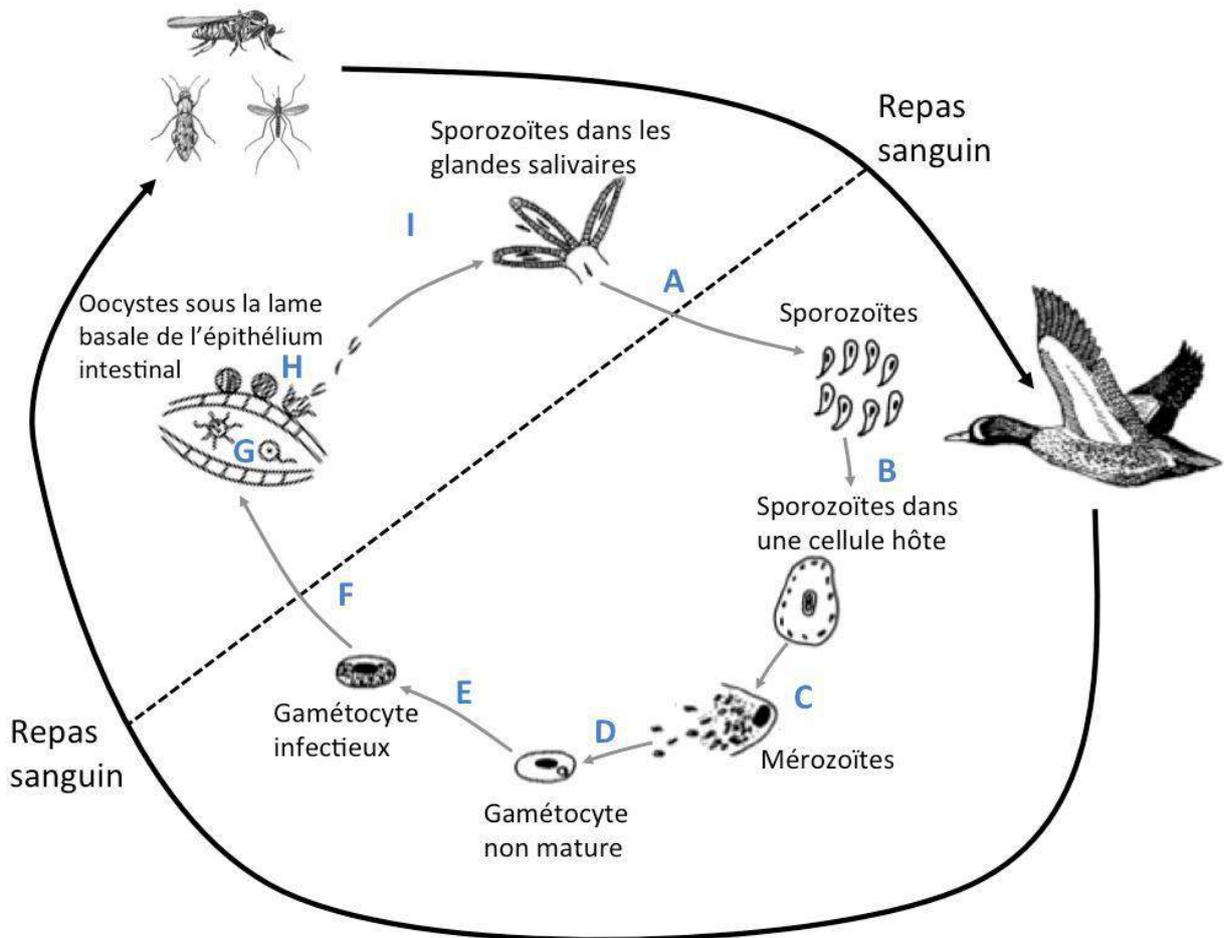
Des espèces d'hémosporidies aviaires ont été mises en évidence dans la plupart des régions du monde, à l'exception notable de l'Antarctique en raison de l'absence de populations de vecteurs adaptés (Mullen, 2019; Smith and Ramey, 2015).

Des différences de distribution géographique, de prévalence et d'espèces hôtes sont néanmoins observées. Ces différences sont liées à de nombreux facteurs dont la sensibilité variable des espèces hôtes, ainsi que la répartition dans différents habitats et l'abondance des hôtes et vecteurs (Ballweber, 2004 ; *Friend and United States Geological Survey*, 1999). Ces deux derniers facteurs sont notamment directement dépendants des conditions environnementales (Elbers *et al.*, 2015 ; Santiago-Alarcon *et al.*, 2012). De plus, les vecteurs des trois genres d'hémosporidies sont classés dans des taxons différents avec des habitats généralement différents et des comportements distincts en ce qui concerne les repas sanguins (Martinsen *et al.*, 2008). Des études sur la distribution des hémosporidies en Amérique du Nord ont en effet montré que la transmission active de ces parasites coïncide avec la distribution géographique des vecteurs (*Friend and United States Geological Survey*, 1999).

Si les hémospories aviaires sont phylogénétiquement proches des parasites responsables de la malaria chez l'Homme, elles ne sont pas capables d'infecter un individu humain et n'ont pas de caractère zoonotique (Atkinson *et al.*, 2008).

Les espèces des genres *Haemoproteus*, *Plasmodium* et *Leucocytozoon* ont des cycles parasitaires similaires (Figure 1.4) (Atkinson and Van Riper III, 1991). Cependant, il y a des différences en ce qui concerne les tissus infectés et la proportion des différents stades parasitaires sanguins (Martinsen *et al.*, 2008).

Les stades infectieux, appelés sporozoïtes, sont présents dans les glandes salivaires des arthropodes vecteurs hématophages (Campbell, 2015). À l'occasion d'un repas sanguin, les sporozoïtes sont transmis à un nouvel hôte, envahissent les tissus de celui-ci, et une ou plusieurs générations se succèdent avant qu'ils deviennent des mérozoïtes (Valkiūnas, 2005). Ces derniers pénètrent alors dans les érythrocytes où ils évoluent en gamétocytes infectieux. Un autre vecteur peut ingérer ces gamétocytes infectieux intra-érythrocytaires, qui vont alors produire de nombreux sporozoïtes par reproduction sexuée au sein du vecteur. Ces sporozoïtes envahissent les glandes salivaires du vecteur et pourront être transmis à un autre oiseau lors du prochain repas sanguin (Campbell, 2015 ; Valkiūnas, 2005).



**Figure 1.4 Cycle général des hémosporidies aviaires** (basée sur les descriptions et illustrations de Friend and United States Geological Survey, 1999 et Valkiūnas, 2005). (A) Repas sanguin d'un insecte vecteur hématophage infecté sur un individu hôte sensible. (B) Invasion des tissus hôtes par les sporozoïtes et schizogonie. (C) Libération de nombreux mérozoïtes. (D) Pénétration des mérozoïtes dans les érythrocytes de l'hôte infecté. (E) Maturation intra-érythrocytaire en gamétocyte infectieux. (F) Un nouveau vecteur se nourrit sur l'hôte aviaire et devient infecté. (G) Gamétogenèse et reproduction sexuée dans la lumière intestinale du vecteur. (H) Pénétration du zygote à travers l'épithélium intestinal moyen et développement d'un oocyste encapsulé sous la lame basale. (I) Sporogonie, rupture de l'oocyste mature et pénétration des sporozoïtes dans les glandes salivaires du vecteur.

Du fait des nombreuses connaissances scientifiques concernant les hémosporidies aviaires, de leur prévalence élevée et de leur large distribution, elles constituent une excellente approche pour répondre à des questions d'ordre écologique, comportemental et évolutif.

Les particularités des trois genres principaux d'hémosporidies retrouvés chez la Sarcelle à ailes bleues sont présentées ci-dessous.

## b) *Haemoproteus*

Les espèces du genre *Haemoproteus* sont parmi les parasites les plus répandus chez les oiseaux de presque toutes les régions du monde (Atkinson *et al.*, 2008).

Cependant, les connaissances relatives à leur potentielle pathogénicité et leur rôle comme agents de maladie dans les populations d'oiseaux sauvages restent encore incomplètes. Ainsi, les rapports incriminant des espèces hautement pathogènes ayant pu entraîner des cas sévères de myosite sont peu décrits et documentés, et aucun cas de haute pathogénicité n'a été rapporté chez les Anatidés (Valkiūnas, 2005). Certains de ces cas feraient suite à une association hôte-parasite inhabituelle, par exemple par exposition de nouveaux hôtes sensibles à des parasites du genre *Haemoproteus* parasitant normalement une espèce proche (Atkinson *et al.*, 2008).

Malgré la persistance de nombreuses inconnues, de plus en plus d'études ont mis en évidence des effets mesurables de ces parasites sur la survie et la reproduction des hôtes (Atkinson *et al.*, 2008).

Les vecteurs connus d'*Haemoproteus* sont des insectes hématophages de la famille des *Ceratopogonidae*, genre *Culicoides*, ainsi que de la famille des *Hippoboscidae* (Taylor *et al.*, 2016). Des études ont montré qu'il existait une certaine spécificité vecteur-parasite. Ainsi, seules certaines espèces de vecteurs permettent une sporogonie complète avec la production de sporozoïtes pour une espèce de parasite donnée (Atkinson *et al.*, 2008). Par exemple, le vecteur connu de l'espèce *Haemoproteus nettionis*, qui infecte les oiseaux de l'ordre des Ansériformes dont fait partie la Sarcelle à ailes bleues, est *Culicoides downesi* (Atkinson *et al.*, 2008 ; Valkiūnas, 2005).

Les vecteurs du genre *Culicoides*, moucheron piqueurs appelés aussi « brûlots » en français canadien du fait de leur piqûre douloureuse, ont une répartition mondiale sur tous les continents excepté l'Antarctique (Valkiūnas, 2005). Le développement d'un parasite du genre *Haemoproteus* au sein d'un vecteur dure 6 à 10 jours environ (Mullen, 2019). Les sites de reproduction de ces vecteurs sont constitués de milieux aquatiques et semi-aquatiques variés avec des substrats organiques riches : zones de marécages, ruisseaux, marges d'étangs peu profondes, tourbières, mares, mangroves, cavités naturelles dans du bois et fumier (Lysyk and Galloway, 2014). Les adultes sont trouvés majoritairement à proximité de ces zones, mais ils peuvent aussi se déplacer sur de courtes distances (en moyenne 2 kilomètres) pour trouver un partenaire ou selon la présence d'hôtes et de conditions climatiques favorables (Mullen, 2019). Des déplacements sur des centaines de kilomètres ont aussi été rapportés, les vecteurs se laissant porter par des vents chauds (15 à 40°C) et non turbulents (Elbers *et al.*, 2015).

Les adultes femelles sont télophages (Mullen, 2019). Leur période d'activité dépend de la température, saisonnière et journalière, de l'intensité lumineuse, des cycles lunaires, de l'humidité relative, des changements de pression atmosphérique et des conditions météorologiques (Taylor *et al.*, 2016). Globalement, les adultes sont actifs entre 10 et 35°C (Elbers *et al.*, 2015), au crépuscule ou la nuit, par temps nuageux et humide (Taylor *et al.*, 2016), et lorsque la vitesse du vent ne dépasse pas 2,5 mètres par seconde pour la plupart des espèces. En effet, du fait de leur petite taille, un vent trop

important interfère avec leur capacité de vol et d'orientation vers un hôte (Mullen, 2019). Cette vitesse du vent pourrait même être inférieure pour certaines espèces, avec une vitesse maximale tolérée de 1 mètre par seconde (Elbers *et al.*, 2015).

Ces conditions d'activité déterminent les pics d'abondance des adultes avec des motifs saisonniers. Ils peuvent cependant être présents tout au long des mois chauds de l'année, c'est-à-dire de mai à septembre selon les zones concernées (Mullen, 2019).

### c) *Plasmodium*

Les parasites du genre *Plasmodium* qui infectent les oiseaux sont des parasites cosmopolites, ayant pour la plupart un large spectre d'hôtes, et sont responsables de la malaria aviaire (Atkinson *et al.*, 2008).

Ces parasites se distinguent des autres hémospodidies par la présence de formes de reproduction asexuée dans les érythrocytes circulants. Ainsi, dans les infections par *Plasmodium*, des schizontes et des gamétocytes sont présents dans les globules rouges (Atkinson *et al.*, 2008; Atkinson and Van Riper III, 1991).

La plupart des infections par des parasites du genre *Plasmodium* chez les espèces d'oiseaux sauvages sont chroniques et l'intensité parasitaire peut être très faible (Valkiūnas, 2005). En effet les individus infectés développent une forte réponse immunitaire humorale et cellulaire, mais ne semblent pas réussir à éliminer le parasite (Atkinson *et al.*, 2008). Si les infections sont majoritairement sub-cliniques, certaines espèces du genre *Plasmodium* sont néanmoins capables d'entraîner des infections aiguës avec de l'anémie sévère, une perte de condition corporelle, voire la mort chez des individus sensibles, en particulier les juvéniles (*Friend and United States Geological Survey*, 1999). De plus, si l'immunité de l'hôte est compromise par un stress, une baisse d'immunité ou une co-infection, il y a un risque de recrudescence de l'infection sous-jacente (Valkiūnas, 2005). Des études de plus en plus nombreuses ont également montré que l'infection par des parasites du genre *Plasmodium* aurait un impact négatif sur la reproduction et la survie des hôtes atteints (Atkinson *et al.*, 2008).

L'espèce *Plasmodium relictum* a été mise en évidence chez différents oiseaux sauvages et notamment des canards (Mullen, 2019).

Les parasites du genre *Plasmodium* sont transmis par des vecteurs de la famille des *Culicidae*, et majoritairement par les moustiques des genres *Culex*, *Culiseta* et *Aedes* (Mullen, 2019). En tant que vecteurs d'autres maladies avec notamment un impact majeur sur la santé humaine, les *Culicidae* constituent une famille d'arthropodes très étudiée. Certaines espèces de *Culicidae* sont compétentes pour transmettre seulement un nombre limité de parasites du genre *Plasmodium*, alors que d'autres sont généralistes. Cette différence pourrait s'expliquer à la fois par la diversité génétique du vecteur et du parasite. Il a notamment été prouvé que le moustique *Culex tarsalis* est un des vecteurs pouvant transmettre *Plasmodium relictum* dans des conditions naturelles (Santiago-Alarcon *et al.*, 2012).

Les habitats de ces moustiques sont divers, mais tous nécessitent la présence d'eau stagnante pendant au moins la période larvaire et nymphale (Lysyk and Galloway, 2014). Les sites aquatiques peuvent être temporaires ou permanents, avec une préférence pour les zones humides temporaires et semi-permanentes (Nallar *et al.*, 2016), notamment des flaques d'eau éphémères exposées au soleil (Elbers *et al.*, 2015). La niche écologique occupée par chaque espèce de moustique dépend d'un ensemble de conditions, dont la disponibilité et l'abondance en ces sites aquatiques adéquats, la distribution des espèces hôtes et la présence de sites de repos terrestres pour les adultes (Elbers *et al.*, 2015).

Les repas sanguins des femelles sont déterminés par un rythme circadien endogène, et ont lieu au crépuscule, ou quand l'intensité lumineuse mime le crépuscule (Mullen, 2019). Les adultes sont majoritairement actifs à des températures comprises entre 10 et 35°C, avec une diminution majeure du nombre de captures en-dessous de 16°C (Elbers *et al.*, 2015). Les moustiques sont présents de mai à septembre dans les prairies canadiennes, avec une augmentation de la population courant mai et pendant le mois de juin, un plateau en juillet-août, puis un déclin en septembre (Lysyk, 2010).

Les parasites du genre *Plasmodium* interfèrent avec la salivation des vecteurs qu'ils infectent. Cela a pour conséquence d'obliger les moustiques vecteurs à réaliser plusieurs repas sanguins sur un ou plusieurs hôtes la même nuit, et donc injecter le parasite plusieurs fois (Mullen, 2019). De plus, les moustiques infectés seraient plus attirés par les hôtes potentiels du parasite ; et les hôtes infectés chroniquement seraient plus attractifs pour ces vecteurs, que ces derniers soient infectés ou non (Cornet *et al.*, 2013 ; Mullen, 2019).

#### *d) Leucocytozoon*

Si les parasites du genre *Leucocytozoon* sont distribués sur tous les continents à l'exception de l'Antarctique, la plus forte prévalence et la plus grande diversité d'espèces est trouvée dans la région holarctique (Valkiūnas, 2005). Il existe de nombreuses espèces de *Leucocytozoon*, mais seul un nombre restreint est connu pour être pathogène (Atkinson *et al.*, 2008). L'espèce pathogène d'importance pour les canards de surface est *Leucocytozoon simondi*, qui a été trouvée chez 46 espèces d'oiseaux dans 17 pays, dont la Sarcelle à ailes bleues en Amérique du Nord (Atkinson *et al.*, 2008). C'est la seule espèce actuellement décrite du genre *Leucocytozoon* qui parasite des individus de l'ordre des Ansériformes (Valkiūnas, 2005). *L. simondi* est responsable de mortalité chez les jeunes canards sauvages, et peut entraîner des signes généraux comme de l'anorexie, de la léthargie associée à une anémie importante et de la diarrhée chez certains adultes. Cependant, chez ces derniers, l'infection est souvent inapparente surtout dans sa forme latente ou chronique (Atkinson *et al.*, 2008). L'infection chronique par *L. simondi* pourrait cependant avoir des effets sub-létaux sur la santé des individus, augmentant la vulnérabilité de l'hôte à d'autres infections, aux prédateurs et compromettant sa valeur

adaptative concernant notamment la reproduction et la migration (Atkinson *et al.*, 2008 ; Mullen, 2019).

*L. simondi* est transmis par des mouches de la famille des *Simuliidae* (ou mouches noires), à l'instar des autres espèces du genre *Leucocytozoon*, exceptés *L. caulleryi* et *L. sabrezei* transmis par des moucherons du genre *Culicoides* (Taylor *et al.*, 2016). Parmi les vecteurs connus de *L. simondi*, ceux qui auraient un plus grand rôle dans la transmission seraient *Simulium anatinum* et *Simulium rugglesi*. Les vecteurs de la famille des *Simuliidae* sont trouvés à proximité de rivières, ruisseaux ou de n'importe quelle source d'eau non stagnante, nécessaire au développement des stades immatures (Mullen, 2019). Les femelles adultes sont telmophages et se nourrissent préférentiellement dans les zones faiblement emplumées des hôtes aviaires comme le cou ou la région péri-oculaire. Contrairement aux vecteurs d'*Haemoproteus* et de *Plasmodium spp.*, ces vecteurs ont une activité diurne (Valkiūnas, 2005). Celle-ci dépend de la température, de l'intensité lumineuse, de la vitesse du vent et de l'humidité. Ainsi, le vol s'effectue notamment à une température supérieure à 10°C et les adultes Simulidés sont plus abondants lorsque la couverture nuageuse est plus forte. Les autres paramètres déterminant l'occurrence saisonnière sont dépendants de l'espèce de vecteur (Mullen, 2019). L'utilisation de canards sentinelles dans l'est du Canada a montré que la transmission de *L. simondi* avait lieu essentiellement en juin et juillet. De plus, sa prévalence chez les canards de surface est plus faible les années de sécheresse à l'ouest du Canada, du fait d'une présence plus limitée en habitats appropriés pour les mouches noires vectrices (Atkinson *et al.*, 2008).

Comme pour les autres hémospories, la transmission de *Leucocytozoon spp.* dépend de la présence du vecteur adéquat et de la présence d'un nombre suffisant de gamétocytes dans la circulation périphérique de l'hôte pour infecter le vecteur. Pour *Leucocytozoon*, une augmentation du nombre de gamétocytes circulants est induite par des changements hormonaux liés notamment à la migration de printemps, à la fonction de reproduction, à l'augmentation de la durée du jour ou encore à un stress (Valkiūnas, 2005). Ce mécanisme est responsable de rechutes au printemps, qui facilitent l'infection des vecteurs juste avant la période de production d'oisillons et donc la transmission du parasite à des individus sensibles naïfs (Atkinson *et al.*, 2008).

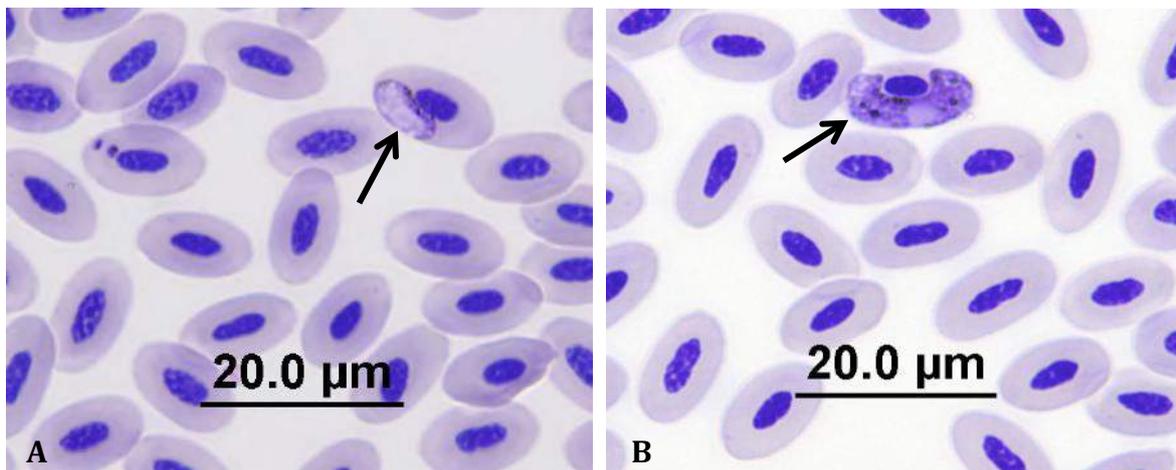
La parasitémie diminue ensuite généralement après la saison de reproduction et l'infection demeure à bas bruit, conservant les ressources parasitaires par la non-production de nouveaux parasites hors de la saison des vecteurs. Moins de dommages sont également causés à l'hôte, qui servira de réservoir pour le parasite, jusqu'à une éventuelle rechute au printemps suivant (Atkinson *et al.*, 2008 ; Valkiūnas, 2005).

### e) Diagnostic différentiel des hémospories

Les infections par les hémospories sont généralement diagnostiquées par lecture de frottis sanguins colorés avec une coloration de Wright Giemsa (Rush *et al.*, 2016).

#### (1) *Haemoproteus*

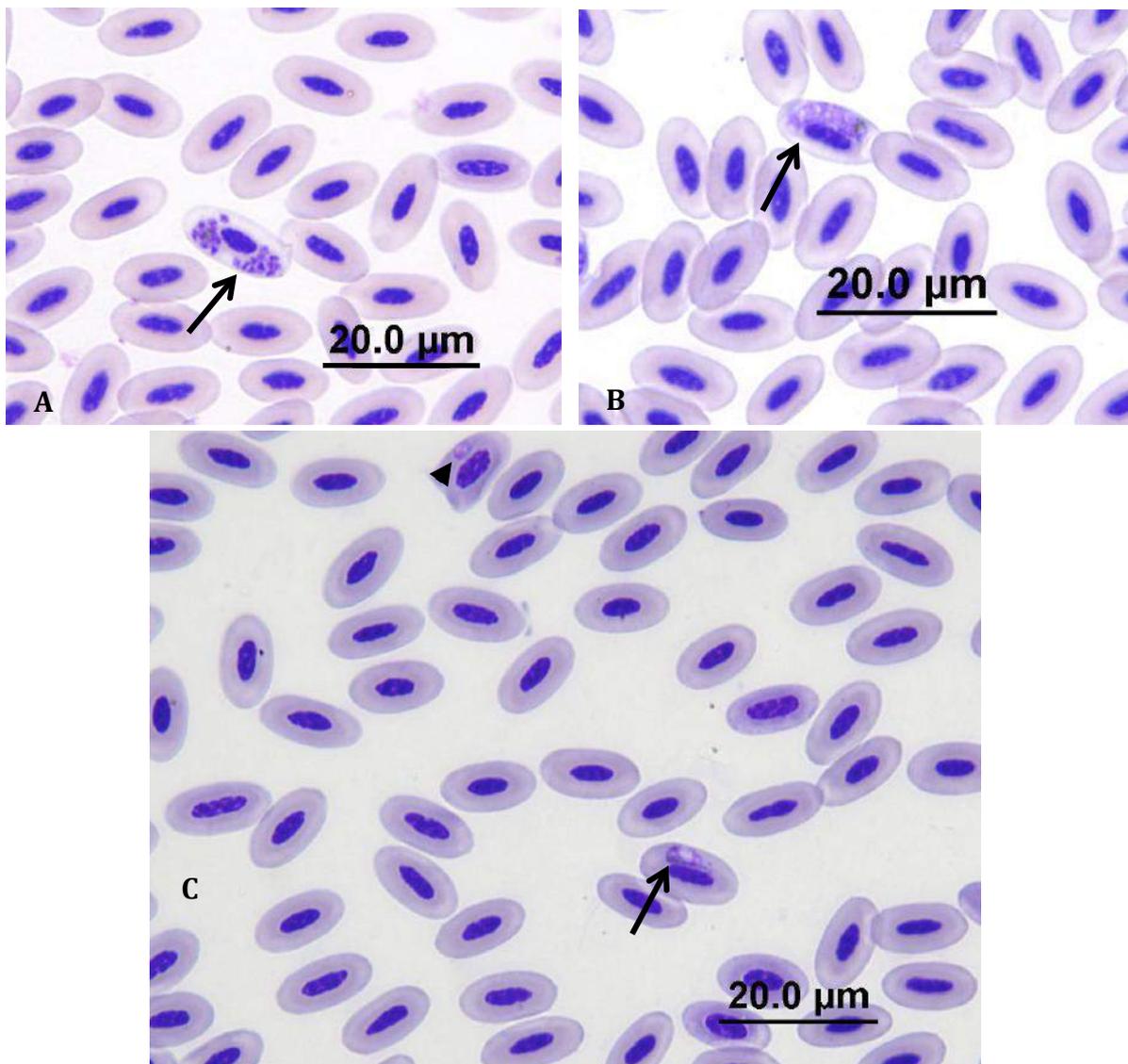
*Haemoproteus spp.* est trouvé dans les érythrocytes du sang périphérique au stade de gamécyte (Valkiūnas, 2005). L'apparence du gamécyte intra-érythrocytaire est variable selon le stade de maturité. D'une forme circulaire occupant une faible proportion du cytoplasme (Figure 1.5 (A)), le gamécyte tend ensuite à s'allonger et encercler le noyau de la cellule hôte infectée, prenant la forme d'un fer à cheval (Figure 1.5 (B)) (Friend and United States Geological Survey, 1999). Le gamécyte mature occupe généralement plus de la moitié du volume cytoplasmique de la cellule hôte, mais n'entraîne qu'un faible élargissement de celle-ci et qu'un faible déplacement du noyau qui n'est jamais poussé contre les parois de la cellule. Les cellules infectées peuvent contenir des granules réfringentes dorées à noires correspondant à de l'hémozoïne (Figure 1.5 (B)), pigment produit et déposé lors de la digestion de l'hémoglobine de la cellule hôte par le parasite (Campbell, 2015). Occasionnellement, des macrogamètes et microgamètes extra-érythrocytaires, ainsi que des ookinètes résultant de leur union, peuvent être trouvés sur un étalement de sang périphérique. Les macrogamètes sont des éléments parasitaires ronds, de taille inférieure à un érythrocyte, et contenant des granules d'hémozoïne. Les microgamètes sont des éléments petits, fusiformes et très fins. Ils peuvent être mis en évidence surtout lorsqu'il existe un délai entre le prélèvement et la réalisation du frottis sanguin (Campbell, 2015).



**Figure 1.5 Gamécytes intra-érythrocytaires d'*Haemoproteus* chez la Sarcelle à ailes bleues (*Anas discors*).** Frottis sanguins colorés avec une coloration Wright Giemsa, observés au microscope au grossissement x1000. (A) Gamécyte non mature. (B) Gamécyte mature, en forme de fer à cheval, avec présence de granules d'hémozoïne. (© A. Le Gac)

## (2) *Plasmodium*

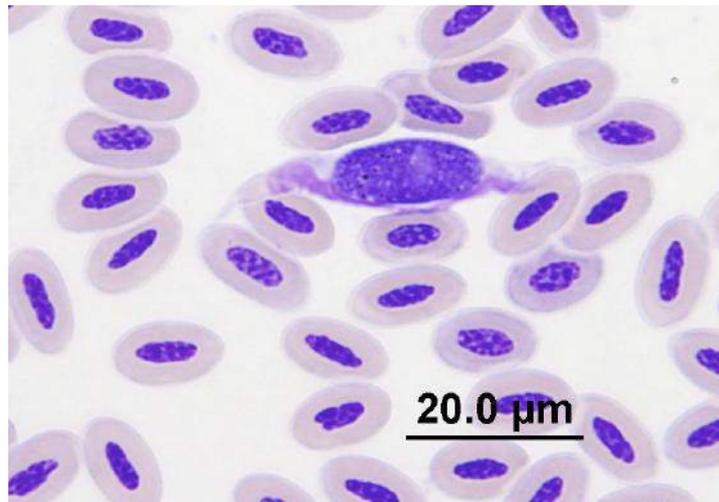
Contrairement aux autres hémospories aviaires, les formes intermédiaires parasitaires trophozoïtes (Figure 1.6 (C)), schizontes (Figure 1.6 (A)) et gamétocytes (Figure 1.6 (B) et (C)) peuvent être toutes les trois rencontrées dans les cellules infectées. De plus, *Plasmodium spp.* infecte des érythrocytes, mais également des leucocytes et thrombocytes (Valkiūnas, 2005). Les formes parasitaires sont de fines structures granulaires de taille variable au sein du cytoplasme des cellules hôtes, qui peuvent causer un léger élargissement de la cellule et un déplacement important du noyau sur le côté. À l'instar d'*Haemoproteus*, les cellules infectées par *Plasmodium* peuvent contenir des pigments d'hémozoïne (Campbell, 2015 ; Friend and United States Geological Survey, 1999 ; Taylor et al., 2016).



**Figure 1.6** Formes parasitaires intra-érythrocytaires de *Plasmodium* chez la Sarcelle à ailes bleues (*Anas discors*). Frottis sanguins colorés avec une coloration Wright Giemsa, observés au microscope au grossissement x1000. (A) Schizonte. (B) Gamétocyte. (C) Gamétocyte (flèche) et trophozoïte (tête de flèche). (© A. Le Gac)

### (3) *Leucocytozoon*

Les gamétocytes du genre *Leucocytozoon* sont responsables de changements majeurs dans la structure de la cellule hôte, avec généralement élargissement et distorsion importante des érythrocytes infectés (Valkiūnas, 2005). La membrane cytoplasmique de la cellule infectée est alors souvent très fine, voire presque invisible. Les cellules infectées ne contiennent pas de pigments d'hémozoïne à l'inverse des deux autres genres communs d'hémosporidies. Les cellules parasitées apparaissent avec deux noyaux, un correspondant au noyau de la cellule hôte repoussé contre les parois et l'autre adjacent étant le noyau parasite (*Campbell, 2015 ; Friend and United States Geological Survey, 1999*). Les gamétocytes occupent la majeure partie du complexe cellule hôte-parasite. Chez l'hôte aviaire, deux formes morphologiques, ovoïde et/ou allongée, de gamétocytes circulants peuvent être rencontrées (Valkiūnas, 2005). Les macrogamétocytes, qui correspondent à des inclusions parasitaires allongées fortement colorées et granuleuses, occupent 77% de l'aire formée par le complexe (Figure 1.7), alors que les microgamétocytes plus ovoïdes sont généralement peu colorés et plus petits de 5 à 10%. La proportion en macro- et microgamétocytes dépend notamment du stade du cycle parasitaire. L'apparence des gamétocytes peut varier selon l'espèce de *Leucocytozoon* (*Atkinson et al., 2008 ; Campbell, 2015*).



**Figure 1.7 Macro-gamétocyte de *Leucocytozoon* chez la Sarcelle à ailes bleues (*Anas discors*).** Frottis sanguin coloré avec une coloration Wright Giemsa, observé au microscope au grossissement x1000. (© A. Le Gac)

Les particularités relatives à chacun des trois genres communs d'hémosporidies chez la Sarcelle à ailes bleues sont présentées dans le Tableau I.I.

**Tableau I.I Particularités des trois genres d'hémosporidies chez la Sarcelle à ailes bleues**

	<i>Haemoproteus</i>	<i>Plasmodium</i>	<i>Leucocytozoon</i>
<b>Cellules infectées</b>	Érythrocytes	Érythrocytes, leucocytes, thrombocytes	Érythrocytes
<b>Stade(s) parasite(s) rencontré(s) dans les cellules du sang périphérique</b>	Gamétocyte	Gamétocyte, trophozoïte, schizonte	Gamétocyte
<b>Morphologie(s) du parasite</b>	De forme circulaire à forme de fer à cheval	Variables : Gamétocytes indifférenciables par leur forme de ceux d' <i>Haemoproteus</i> ; Schizontes ronds à ovales contenant de nombreux mérozoïtes ; Trophozoïtes ronds à ovales avec une large vacuole	Ovoïde (microgamétocytes) ou allongée (macrogamétocytes) avec des variations selon l'espèce
<b>Modifications morphologiques de la cellule hôte</b>	Léger élargissement de la cellule ; Généralement faible déplacement du noyau (le parasite tend à entourer le noyau)	Léger élargissement de la cellule ; Déplacement généralement important du noyau	Fort élargissement et distorsion de la cellule ; Noyau repoussé contre les parois ; Membrane cytoplasmique presque invisible
<b>Volume cytoplasmique occupé par le parasite</b>	Variable : de moins de 10% à plus de la moitié pour un gamétocyte mature	Variable	La quasi-totalité
<b>Particularités</b>	- Présence de granules d'hémozoïne dans la cellule hôte - Macrogamètes, microgamètes et ookinètes occasionnellement présents dans le sang périphérique	Présence de granules d'hémozoïne dans la cellule hôte	

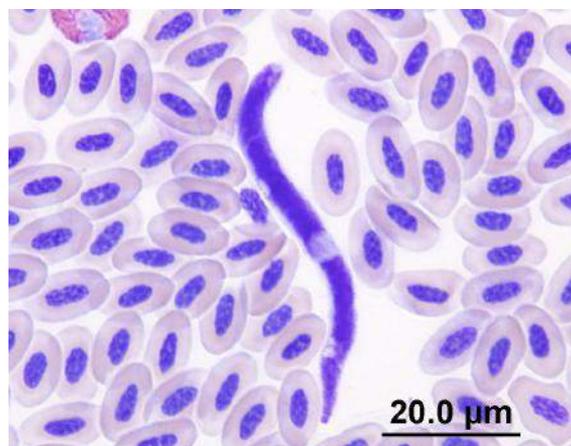
## 2. *Microfilariae*

*Microfilariae* est le premier stade larvaire produit par des nématodes parasites communs chez les oiseaux et appartenant à la super-famille des *Filarioidea*. Ces microfilaries sont retrouvées dans la peau ou véhiculées par le sang des oiseaux. Chez les Anatidés, trois genres ont été mis en évidence : *Pelecitus*, *Splendidofilaria* et *Sarconema* (Atkinson *et al.*, 2008). Ils sont transmis par des arthropodes hématophages vecteurs. Les vecteurs connus sont des poux de l'ordre des *Phthiraptera*, ou des mouches appartenant aux familles des *Simuliidae*, *Culicidae* et *Ceratopogonidae*, ces dernières étant aussi vectrices d'hémosporidies (Mullen, 2019). Ces parasites lorsqu'ils sont transmis par des vecteurs de l'ordre des Diptères auraient des spectres d'hôtes larges, et pourraient être sporadiques ou endémiques chez différentes espèces au sein d'une même communauté d'oiseaux (Atkinson *et al.*, 2008).

Les stades adultes se reproduisent dans l'hôte et la femelle adulte produit des microfilaries qui entrent alors dans la circulation périphérique générale ou dans la peau de l'hôte. Ces microfilaries peuvent alors être ingérées par un vecteur, au sein duquel le parasite va se développer jusqu'à un stade infectieux et migrer vers la tête du vecteur. Lors du prochain repas sanguin de ce dernier, la larve infectante va sortir et pénétrer la peau du futur hôte par la zone d'effraction faite par l'arthropode vecteur. Une fois dans le corps de l'hôte, le développement se poursuit jusqu'au stade adulte (Atkinson *et al.*, 2008).

Peu d'espèces de filaires aviaires seraient pathogènes, et celles qui le sont entraineraient majoritairement des infections subcliniques (Atkinson *et al.*, 2008). Cependant, des espèces de microfilaries seraient en mesure de déprimer le système immunitaire de l'hôte par immunomodulation, en diminuant la capacité de l'organisme hôte à produire des lymphocytes, pouvant ainsi faciliter les co-infections par d'autres parasites comme les hémosporidies (Clark *et al.*, 2016).

Les microfilaries présentes dans la circulation périphérique peuvent être mises en évidence sur étalement sanguin (Figure 1.8), chez de nombreuses espèces d'oiseaux partout dans le monde (Campbell, 2015).



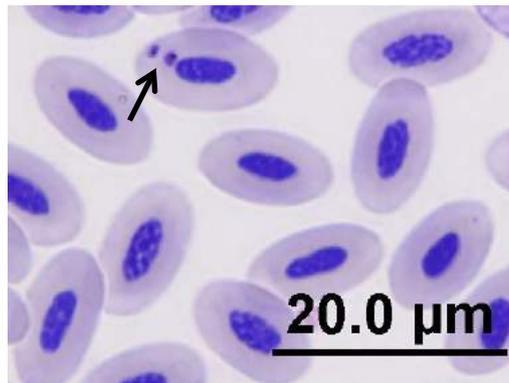
**Figure 1.8** Microfilarie chez la Sarcelle à ailes bleues (*Anas discors*). Frottis sanguin coloré avec une coloration Wright Giemsa, observé au microscope au grossissement x600. (© A. Le Gac)

### 3. Autres hémoparasites aviaires

D'autres parasites intra-érythrocytaires n'appartenant pas au groupe des hémospories peuvent être présents sur les frottis sanguins étudiés (Valkiūnas, 2005).

#### a) *Aegyptianella*

*Aegyptianella pullorum* est une espèce de piroplasma qui peut être rencontrée chez les canards de surface et parfois être responsable de signes cliniques comme de l'anémie, de l'anorexie et de la diarrhée. Sur un frottis sanguin coloré, ce parasite correspond à une inclusion intra-cytoplasmique de taille variable (1 à 4µm) et de forme ronde à elliptique (Campbell, 2015) (Figure 1.9).



**Figure 1.9 Inclusions intra-érythrocytaires d'*Aegyptianella* chez la Sarcelle à ailes bleues (*Anas discors*).** Frottis sanguin coloré avec une coloration Wright Giemsa, observé au microscope au grossissement x1000. (© A. Le Gac)

#### b) *Trypanosoma*

Les trypanosomes ne sont présents qu'occasionnellement chez les canards de surface et sont transmis par les mêmes arthropodes vecteurs que les hémospories, à savoir moustiques, mouches de la famille des *Hippoboscidae* et de la famille des *Simuliidae*. Présents dans le sang périphérique et majoritairement non pathogéniques, leur morphologie est très proche de celle des trypanosomes rencontrés chez les mammifères, avec une membrane ondulante, un kinétoplaste et un flagelle à une extrémité (Campbell, 2015).

### 4. Le coût du parasitisme chez les hôtes aviaires

La présence d'un parasite implique un coût chez l'hôte, lié à de nombreux mécanismes, comme la compétition entre le parasite et l'hôte pour les ressources ou le coût de la défense contre les parasites pour l'hôte (Atkinson *et al.*, 2008). Outre l'impact lié à une potentielle maladie parasitaire, la présence d'un parasite peut donc avoir des conséquences indirectes en agissant sur la valeur adaptative de l'individu hôte et donc indirectement diminuer les taux de survie des individus parasités (Atkinson and Van Riper III, 1991). En effet, un oiseau a une quantité d'énergie disponible liée à l'énergie assimilée et stockée. L'utilisation d'une partie de cette énergie pour se défendre contre

les parasites et leurs conséquences sur l'organisme, signifie que la part d'énergie allouée à la reproduction, la croissance ou l'évitement des prédateurs est diminuée (Atkinson *et al.*, 2008). Ainsi, si un parasite peut a priori être peu pathogène, l'impact indirect peut être important. Cet impact peut être visible à l'échelle de l'individu dont la vulnérabilité aux prédateurs serait augmentée, et à l'échelle de la population avec une reproduction des individus parasités moins efficace, caractérisée par une baisse de la fécondité et une progéniture moins viable. Les effets sub-létaux des infections par les hémospodidies et leurs conséquences sur le long terme lors d'infections chroniques ou latentes, auraient ainsi un réel impact négatif à l'échelle de la population et sur la valeur adaptative des individus (Asghar *et al.*, 2015).

La difficulté reste d'évaluer les impacts négatifs des parasites (Atkinson and Van Riper III, 1991). En effet, ces impacts ne sont pas distribués de façon homogène au sein d'une population et certains peuvent être non détectables au moment du prélèvement. Ainsi, les effets d'une infection chronique ou latente par des parasites sanguins pourraient ne se manifester qu'après un délai suffisamment long, via notamment un raccourcissement des télomères entraînant une mort cellulaire et des défaillances organiques. Si le prélèvement a lieu dans un délai trop court depuis l'installation de cette infection chez un individu, les effets seraient encore invisibles (Asghar *et al.*, 2015). De plus, les individus parasités pourraient être pris de façon disproportionnée par les prédateurs et donc non prélevés sur le terrain (Atkinson *et al.*, 2008).

Les effets d'une infection par des parasites sanguins, du fait des impacts directs et indirects, engendrent donc pour l'individu un stress physiologique, qui peut être mesuré par différents outils pour mieux appréhender le coût du parasitisme sur les hôtes aviaires (Blas, 2015 ; Townsend *et al.*, 2018).

### **Bilan sur les hémoparasites aviaires**

- Les parasites sanguins aviaires sont :
  - fréquemment rencontrés chez les Anatidés
  - transmis par des arthropodes vecteurs hématophages
  - généralement mis en évidence par lecture de frottis sanguins colorés avec une coloration de Wright Giemsa
  - responsables d'infections souvent inapparentes, chroniques ou latentes, avec possibles rechutes lors de stress.
- Les hémospodidies aviaires, dont les trois genres principaux sont *Haemoproteus*, *Plasmodium*, *Leucocytozoon*, ont été choisies pour cette étude bioécologique du fait :
  - d'une prévalence rapportée élevée
  - d'une large distribution, spatio-temporellement dépendante des arthropodes vecteurs
  - d'un échantillonnage relativement aisé chez les Anatidés, par prise de sang
  - du stress physiologique engendré par ces parasites pouvant avoir des impacts négatifs chez l'hôte aviaire en termes de reproduction, de croissance et de survie.

## C. Le stress chez les oiseaux

### 1. Les réponses au stress chez les oiseaux

Au cours de leur vie, les oiseaux subissent de profonds changements physiologiques, morphologiques et comportementaux. Chez les vertébrés, le système endocrinien intègre les signaux internes et externes et orchestre des réponses adaptées au mieux aux signaux reçus (Hill *et al.*, 2012). Si certains de ces changements arrivent en réponse à des fluctuations prévisibles du milieu (exemple : cycle circadien, l'enchaînement des saisons), des perturbations imprévisibles se surimposent et nécessitent de la part des individus une réponse adaptative d'urgence. Ces perturbations comprennent notamment des conditions climatiques extrêmes, une destruction de l'habitat, une maladie ou encore une pénurie de nourriture. Perçues comme des stimuli nocifs, ces perturbations entraînent donc l'activation de l'axe hypothalamo-hypophysaire et la libération d'une importante quantité de glucocorticoïdes dans la circulation sanguine, responsables des changements initiés pour répondre à ce stress (Atkinson *et al.*, 2008).

Les glucocorticoïdes, parfois appelées hormones du stress, entraînent différentes modifications métaboliques, dont une mobilisation de l'énergie corporelle, la régulation du système immunitaire, et l'inhibition de fonctions coûteuses en énergie comme la digestion, la croissance et la reproduction (Hill *et al.*, 2012). Il existe un niveau basal de glucocorticoïdes circulants, car ces hormones sont également essentielles aux fonctions naturelles et à l'homéostasie d'un individu en conditions non stressantes (Blas, 2015).

Les fluctuations journalières et saisonnières des niveaux de glucocorticoïdes sont donc des facteurs majeurs impliqués dans l'allostase, c'est-à-dire le processus permettant à l'individu de faire face aux changements, qu'ils soient prévisibles ou non, et de retrouver un équilibre des différents systèmes physiologiques essentiels à la vie (Legagneux *et al.*, 2013). Face à un facteur de stress, les niveaux de glucocorticoïdes, médiateurs majeurs de l'allostase, peuvent donc augmenter rapidement, au-dessus du niveau basal.

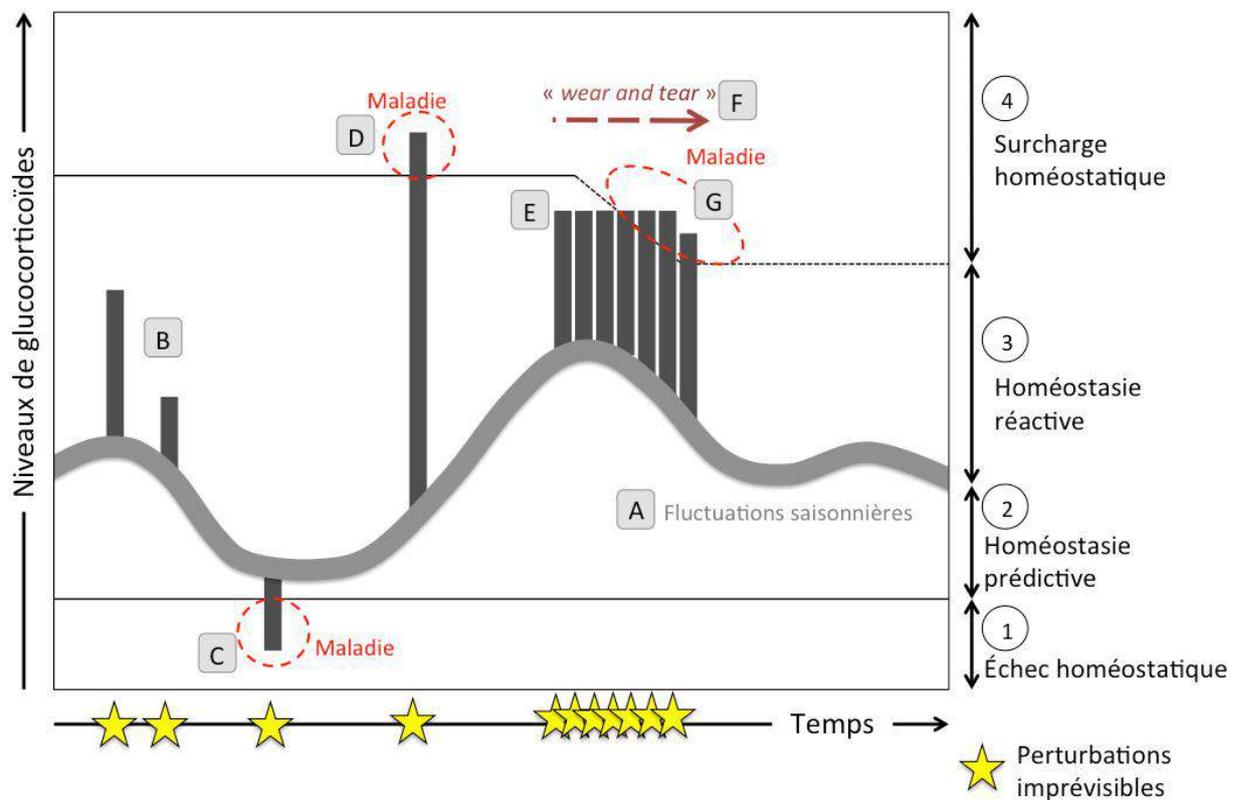
Cependant, des niveaux élevés et persistants de glucocorticoïdes ont des effets délétères sur la fonction immune, la capacité cognitive, la croissance, la fonction de reproduction et la survie de l'individu (Bortolotti *et al.*, 2009, 2008 ; Legagneux *et al.*, 2013).

L'impact négatif des niveaux élevés d'hormones du stress sur le système immunitaire augmente donc la vulnérabilité de l'oiseau, notamment aux infections.

## 2. Un modèle pour expliquer l'impact des réponses au stress selon les perturbations environnementales : le « *Reactive Scope Model* »

Les oiseaux ne vont pas percevoir et réagir aux perturbations environnementales de la même façon selon le caractère prévisible ou imprévisible de celles-ci (Blas, 2015). Romero et ses collègues ont créé un modèle appelé « *Reactive Scope Model* » permettant de caractériser le stade physiologique des individus au cours du temps en réponse aux perturbations, extrinsèques comme des changements environnementaux, ou intrinsèques comme de la malnutrition ou le coût de la fonction de reproduction. Ce modèle est donc un outil pour aborder et mieux comprendre la diversité des réponses aux perturbations environnementales variant selon les facteurs de stress (Romero *et al.*, 2009). Ainsi, ils ont réparti les niveaux de glucocorticoïdes en quatre gammes : l'homéostasie prédictive et l'homéostasie réactive correspondant au cadre normal de réponse d'un individu ; l'échec homéostatique en cas de réponse insuffisante, et la surcharge homéostatique avec une élévation trop élevée ou trop durable des niveaux de glucocorticoïdes. Ces deux dernières gammes correspondent à des réponses inadaptées qui compromettent la santé de l'individu (Figure 1.10).

Afin de répondre à la demande d'énergie nécessaire face aux changements environnementaux prédictibles comme l'alternance des saisons, les niveaux de glucocorticoïdes vont fluctuer au sein de la gamme d'homéostasie prédictive. À l'inverse, les perturbations imprévisibles ou facteurs de stress vont entraîner une élévation rapide des niveaux de glucocorticoïdes au-delà de la gamme prédictive, afin de faire face à la perturbation avec des changements physiologiques et comportementaux (Romero *et al.*, 2009). Le modèle propose alors deux manières de dépasser la gamme réactive normale, pour atteindre la gamme pathologique de surcharge homéostatique : soit l'élévation en glucocorticoïdes est majeure et ce pic est donc responsable de maladie ; soit le niveau reste élevé dans la gamme d'homéostasie réactive pendant une longue période, ce qui va entraîner le rétrécissement progressif de l'étendue de cette gamme réactive. L'élévation chronique modérée va donc mener à terme à une maladie. Cette dernière situation modélise la diminution progressive de la capacité de l'individu de faire face à la perturbation. Cela est dû au coût physiologique pour l'individu de l'utilisation et du maintien des systèmes physiologiques permettant l'allostase (Figure 1.10).



**Figure 1.10 Illustration du "Reactive Scope Model" et du concept de réponse allostatique** (basée sur les illustrations et descriptions de Romero et ses collègues, 2009). Les niveaux de glucocorticoïdes sont subdivisés en quatre gammes. La première gamme nommée « échec homéostatique » (1) correspond aux niveaux insuffisants au maintien de l'homéostasie. Face à une perturbation imprévisible, une réponse insuffisante ne permet pas à l'individu de répondre efficacement et peut donc mener à une altération de la santé voire au décès de l'individu (C). La gamme d'homéostasie prédictive (2) correspond aux variations des niveaux de glucocorticoïdes face à des changements environnementaux prévisibles, comme les fluctuations saisonnières (A). En cas de perturbations imprévisibles, les niveaux de glucocorticoïdes augmentent pour permettre à l'individu de répondre au stress engendré. Si l'augmentation est ponctuelle et contenue au sein de la gamme d'homéostasie réactive (3), l'homéostasie est maintenue sans effet délétère pour l'individu (B). À l'inverse, si l'augmentation dépasse le seuil maximal de la gamme d'homéostasie réactive pour atteindre la surcharge homéostatique (4), les glucocorticoïdes peuvent causer des dommages à l'organisme et être responsables de maladie ou de la mort de l'individu (D). En cas d'augmentation chronique des niveaux de glucocorticoïdes (E) lors de stress prolongé ou répétitif, la capacité de l'individu à faire face à ce stress va diminuer par abaissement du seuil de surcharge homéostatique. Ce phénomène correspond au concept du « wear and tear » (F), c'est-à-dire au coût du maintien de la réponse allostatique sur le long terme. Un stress prolongé ou répétitif aura donc des conséquences négatives sur l'organisme à long terme (G).

Ces différentes perturbations imprévisibles, comme des événements météorologiques extrêmes, une attaque de prédateur, une maladie aiguë ou chronique, ou une infection par des parasites, peuvent perturber le cycle de la vie d'un individu et potentiellement entraîner sa mort du fait d'une balance énergétique négative. Ainsi, si les élévations de glucocorticoïdes dans la gamme normale réactive sont des réponses adaptatives adéquates, des élévations trop importantes ou chroniques manquent de valeur adaptative, du fait des effets délétères sur l'organisme. Ces effets délétères comprennent l'arrêt de la fonction de reproduction, l'arrêt de sécrétion d'hormone de croissance, la compromission de la fonction immunitaire ou encore la mort neuronale (Romero *et al.*, 2009 ; Blas, 2015).

De plus, la réponse face à un facteur de stress peut varier chez un individu selon son stade physiologique (étendue de sa gamme normale d'homéostasie), et varie également d'un individu à l'autre au sein d'une population du fait de différences de patrimoines génétiques et de plasticités phénotypiques, comme une exposition à l'âge juvénile lors de la maturation de l'axe hypothalamo-hypophysaire ou des expositions répétées dans les mêmes conditions. Ainsi, si les perturbations environnementales en tant que facteurs de stress peuvent menacer la survie des populations, des adaptations locales pourraient apparaître via des réponses différentes au stress et la survie différentielle d'individus (Blas, 2015).

### 3. Méthodes d'étude de la réponse au stress

Il existe différents outils à disposition des scientifiques pour étudier la réponse adrénocorticale au stress (Blas, 2015).

#### a) Mesure de la corticostérone plasmatique

Une des premières approches est la mesure de la corticostérone plasmatique, la corticostérone étant le glucocorticoïde majeur chez les oiseaux (Hill *et al.*, 2012). Cependant, la mesure de cette hormone du stress dans le sang n'offre qu'un accès limité dans le temps pour évaluer le stress subi par un individu (Bortolotti *et al.*, 2008). En effet, les niveaux élevés déclenchés suite à un stimulus stressant ne seront détectables que dans les minutes suivant ce stress si celui-ci ne s'applique plus (Bortolotti *et al.*, 2009). Cela s'explique par la demi-vie courte de la corticostérone, de quelques minutes à quelques heures au maximum (Vleck *et al.*, 2000). Les niveaux plasmatiques ne sont donc pas réellement représentatifs de la réponse allostatique à long terme d'un individu, car ils n'offrent qu'un accès limité dans le temps pour évaluer le stress subi par un individu (Bortolotti *et al.*, 2008 ; Blas, 2015). De plus, une augmentation rapide des niveaux de corticostérone suite à la capture et à la manipulation de l'oiseau peut être observée, ce qui peut entraîner un biais dans la mesure de la réponse aux autres facteurs de stress environnementaux si l'échantillon n'est pas pris assez rapidement. Enfin, les échantillons sanguins prélevés se dégradent au cours du temps (Freeman and Newman, 2018).

## *b) Mesure de la corticostérone dans les plumes*

Une deuxième approche a donc été développée par Bortolotti et son équipe et consiste en la mesure de la corticostérone dans les plumes (CORTf) (Bortolotti *et al.*, 2008, 2009). Les plumes en croissance sont hautement vascularisées et de nombreux éléments y sont déposés accidentellement par diffusion depuis le compartiment sanguin. Ces éléments, dont la corticostérone systémique, sont alors séquestrés dans la structure kératinisée de la plume. Or, les niveaux plasmatiques de corticostérone fluctuent de façon dynamique en fonction des besoins énergétiques et en réponse aux stimuli de stress. La mesure de la corticostérone dans les plumes constituerait donc le reflet de cette gamme de variation dynamique, car cette corticostérone est intégrée dans la plume en croissance de façon continue à des valeurs basales ou à des amplitudes plus ou moins élevées face à un stress (Romero and Fairhurst, 2016). La croissance des plumes est relativement lente, allant de quelques jours à plusieurs semaines selon le type de plume. Lorsque la croissance de la plume est finie, l'afflux sanguin s'arrête, la plume est isolée et la corticostérone circulante n'y est donc plus déposée. Sachant que chez les oiseaux aucun système de sécrétion de corticostérone n'a été mis en évidence au niveau des plumes (Taves *et al.*, 2011), une corrélation directe positive peut être vue entre le niveau de corticostérone détecté dans les plumes et les niveaux sanguins de corticostérone lors de la croissance de la plume. Des expériences avec de la corticostérone radio-marquée ou avec des implants libérant une dose donnée de corticostérone ont pu confirmer cette hypothèse (Romero and Fairhurst, 2016).

La mesure de la corticostérone dans les plumes permet donc d'avoir une mesure du stress subi par un individu sur un plus long terme correspondant à toute la période de croissance de la plume, via des mesures rétrospectives intégrées des titres plasmatiques en corticostérone (Bortolotti *et al.*, 2009; Romero and Fairhurst, 2016). De plus, les oiseaux ne réalisant généralement qu'une mue partielle à un instant donné, différentes plumes d'un même individu peuvent permettre d'accéder à l'activité de l'axe hypothalamo-hypophysaire associée à différents moments de l'année et à différents lieux (Blas, 2015).

Cependant, cette technique ne permet pas de détecter efficacement des événements stressants de courte durée, comme l'attaque d'un prédateur ou la manipulation lors de prélèvements. En effet, l'élévation des titres plasmatiques suite à un facteur de stress aigu est de très courte durée comparée au temps de croissance de la plume. Ainsi, la plus petite période de temps mesurable via cette technique correspond au taux de croissance du type de plume donné dans l'espèce considérée. La mesure des niveaux de corticostérone ne permet donc pas de détecter la réponse à des perturbations vécues sur de très courtes périodes (Romero and Fairhurst, 2016).

Un des autres avantages majeurs de cette technique est la stabilité dans le temps de la corticostérone dans la plume (Bortolotti *et al.*, 2009; Romero and Fairhurst, 2016). Cependant, des altérations physiques peuvent avoir des conséquences sur les mesures de corticostérone, notamment par perte de masse. Les plumes doivent donc être

analysées dans un état semblable le mieux conservé possible pour pouvoir obtenir des valeurs comparables. Le mieux est de les conserver dans un endroit sec à l'abri de la lumière pour éviter d'éventuelles dégradations (Romero and Fairhurst, 2016). De plus, cette méthode est non-invasive, ce qui est un atout éthique majeur (Bortolotti *et al.*, 2008).

La mesure de la corticostérone dans les plumes, couplée avec des données écologiques et physiologiques, constitue donc une fenêtre unique sur les causes et conséquences du stress chez les oiseaux, en apportant un moyen rétrospectif et sur le long-terme (pendant la croissance des plumes) de mesure intégrée de l'activité de l'axe hypothalamo-hypophysaire (Bortolotti *et al.*, 2009, 2008).

### c) *Le rapport hétérophiles sur lymphocytes*

Un autre moyen d'évaluer le stress chez les oiseaux est la détermination du rapport hétérophiles sur lymphocytes (H/L) lors de l'examen d'un frottis sanguin (Vleck *et al.*, 2000). La détermination du rapport H/L a été utilisée par de nombreuses études pour détecter le stress chez les oiseaux, du fait notamment de sa simplicité de réalisation (Clark, 2015). En effet, ce rapport permet à la fois d'évaluer l'activité du système immunitaire d'un individu ainsi que la réponse à des facteurs de stress aigus ou chroniques, comprenant notamment les conditions environnementales et les infections par des parasites sanguins. Le stress peut ainsi se manifester par une hétérophilie et une lymphopénie, résultant en une élévation du rapport H/L (Skwarska, 2019). Ces changements sont liés à l'augmentation des glucocorticoïdes faisant suite au stimulus stressant. Les glucocorticoïdes stimulent la granulocytopoïèse et créent ainsi un afflux de granulocytes, dont les hétérophiles, dans la circulation (Clark, 2015). À l'inverse, les lymphocytes, sous l'effet des glucocorticoïdes, adhèrent aux cellules endothéliales et migrent hors du compartiment sanguin vers d'autres compartiments où ils sont séquestrés, entraînant une réduction du nombre de lymphocytes circulants. L'ampleur du changement dans la proportion de leucocytes dépend de l'intensité et de la persistance du facteur de stress. La numération leucocytaire, avec augmentation du nombre d'hétérophiles et diminution des lymphocytes, commence à changer de façon significative 30 minutes à 1 heure après la capture (Cīrule *et al.*, 2012). Ainsi, le temps entre la capture et l'échantillonnage est une variable importante à prendre en compte lors de l'interprétation du rapport H/L (Wojczulanis-Jakubas *et al.*, 2012).

Ces changements sont plus durables que l'augmentation de la corticostéronémie, et généralement il y a un effet additif des facteurs de stress (Vleck *et al.*, 2000).

En plus d'être un marqueur fiable de la réponse immunitaire et de révéler un stress chez les oiseaux, la détermination du rapport H/L est aussi un moyen d'évaluer l'impact des infections parasitaires sur le système immunitaire et son éventuelle modulation par les parasites (Clark *et al.*, 2016). De plus, des rapports H/L élevés semblent être associés à une vulnérabilité plus importante aux infections (Davis *et al.*, 2008).

Le rapport H/L constitue donc un outil de mesure du stress à court et plus long terme, avec une augmentation de ce rapport fortement corrélée au niveau de glucocorticoïdes libérés en réponse au stress (Davis *et al.*, 2008).

Les spécificités liées aux méthodes de mesure de l'activité adrénocorticale en réponse au stress chez les oiseaux sont présentées dans le Tableau I.II.

**Tableau I.II Méthodes d'études de l'activité adrénocorticale en réponse au stress.**

	Mesure de la corticostérone plasmatique	Mesure de la corticostérone dans les plumes (CORTf)	Rapport H/L
<b>Biais de mesure lié à la capture</b>	Élevé	Négligeable	Faible à élevé selon le délai entre la capture et les prélèvements
<b>Échelle de temps représentée par les échantillons</b>	Court terme	Long terme : période de croissance de la plume prélevée	Court à moyen terme
<b>Fragilité des échantillons</b>	Élevée	Faible : grande stabilité de la corticostérone dans les plumes	Variable : nécessite la réalisation du frottis sanguin directement après le prélèvement, et la coloration et fixation idéalement dans le mois suivant le prélèvement
<b>Potentiel rétrospectif</b>	Absent : la corticostéronémie reflète l'activité immédiate de l'axe hypothalamo-hypophysaire	Élevé	Faible

Il y a cependant une forte variabilité dans la réponse au stress, à la fois concernant les niveaux de corticostérone et les comptages cellulaires (Clark, 2015 ; Blas, 2015). Si une partie de cette variabilité peut être imputée à l'influence de différents facteurs de stress environnementaux, une autre partie est probablement liée à des facteurs intrinsèques individuels et à une réponse différente au stress entre individus. Cela implique la nécessité d'étudier des échantillons assez larges afin de pouvoir détecter des effets au niveau de la population (Vleck *et al.*, 2000).

### **Bilan sur le stress chez les oiseaux**

- En réponse à des perturbations environnementales, l'activation de mécanismes allostatiques et donc la libération de glucocorticoïdes va permettre à un individu d'effectuer des changements physiologiques, morphologiques et comportementaux dans le but de maintenir son homéostasie.
- L'élévation chronique des niveaux de corticoïdes a des effets délétères organiques et systémiques du fait du coût physiologique du maintien de la réponse allostatique sur le long terme, et peut ainsi menacer la survie des individus.
- La corticostérone, glucocorticoïde majeur chez les oiseaux, peut être mesurée dans le sang, mais également dans les plumes avec dans ce cas une perspective de mesure rétrospective et sur le long terme de la réponse au stress chez les oiseaux.
- Le rapport H/L est un autre outil d'évaluation du stress chez les oiseaux à court et moyen terme.

## D. Le climat : impacts sur les populations d'oiseaux et la dynamique des maladies infectieuses

Les espèces évoluant dans un écosystème forment un ensemble de populations structurées appelé peuplement, et occupent l'ensemble des niches écologiques de cet écosystème en équilibre dynamique (Barbault, 1995). Un écosystème est plus ou moins résilient, c'est-à-dire qu'il est plus ou moins capable de faire face à des perturbations et de revenir à un état d'équilibre.

Le changement climatique à l'échelle mondiale entraîne une altération de la structure et fonction de nombreux écosystèmes. Les perturbations anthropogéniques environnementales actuelles et à venir engendrent en effet des contraintes importantes sur les écosystèmes, menaçant leur équilibre. Par conséquent, des modifications des peuplements, dans le temps, dans l'espace et en nombre, sont attendues (Møller *et al.*, 2010).

Cependant, ces modifications ne seront pas homogènes sur l'ensemble du globe. De nombreuses incertitudes demeurent sur les modifications à attendre à l'échelle locale, du fait notamment des différences de résilience entre les différents écosystèmes et des contraintes différentes s'appliquant sur ces écosystèmes (*Millennium Ecosystem Assessment (Program)*, 2005).

Les oiseaux forment un des taxons les plus étudiés. L'étude des conséquences des changements climatiques sur les populations d'oiseaux peut donc être utilisée comme modèle pour identifier les conditions qui auraient un impact majeur sur les fluctuations des peuplements (Møller *et al.*, 2010).

### 1. Altération des aires de reproduction

Un des premiers effets attendus du changement climatique est l'altération des habitats. L'aire de reproduction des canards de surface en Amérique du Nord est constituée majoritairement des zones humides des prairies du centre-nord. Ces zones humides produisent chaque année 50 à 80% des effectifs des canards du continent américain, et représentent ainsi l'habitat le plus productif pour les canards de surface dans le monde. Le sud-est de la province Saskatchewan correspondrait à la zone la plus productive au sein des prairies nord-américaines pendant le XXe siècle (Johnson *et al.*, 2005). La disponibilité en zones humides et le couvert végétal de ces zones sont les deux premiers facteurs déterminant le nombre d'individus et la diversité des espèces d'Anatidés qui vont s'y installer pour la période de reproduction. Il y a donc une corrélation positive entre le nombre de zones humides et le nombre de canards au début de la saison de reproduction.

Les fluctuations climatiques et les conditions météorologiques sont les principaux facteurs qui déterminent l'hydrologie de la région (Bergeron *et al.*, 2015 ; Johnson *et al.*, 2005).

Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) prévoit d'ici 2100 une augmentation globale moyenne de la température terrestre allant de 1,4°C à 5,8°C, selon les mesures qui seront prises pour diminuer le bilan carbone global et les émissions de gaz à effet de serre. Pour le Canada, cette augmentation de la température serait même plus importante, de 2°C à 6°C d'ici la fin du XXI<sup>e</sup> siècle. Cela est dû à la modification de nombreux mécanismes de rétrocontrôle. Par exemple, la fonte des neiges et glaciers entraîne notamment une diminution de la réflexion des rayons solaires, et par conséquent un réchauffement relatif plus important. Ce réchauffement plus important attendu concorde avec les observations faites depuis le milieu du XX<sup>e</sup> siècle. Les données recueillies par les stations météorologiques à travers le Canada montrent en effet une augmentation moyenne de la température de 1,7°C sur la période de 1948 à 2016, soit presque deux fois l'augmentation observée de la température du globe sur la même période (*Canada and Environment and Climate Change Canada, 2019*). La température moyenne continuera à augmenter parallèlement à l'émission de gaz à effet de serre liée aux activités humaines.

Les prévisions concernant les niveaux de précipitations futures sont plus incertaines que celles concernant la température, du fait du peu de données collectées sur le long terme. Selon la majorité des scénarios, les niveaux de précipitations annuelles et en hiver au Canada augmenteraient dans le futur. Cependant, une diminution des précipitations estivales au sud du Canada (régions au sud de 60° latitude nord), donc notamment au niveau des prairies, serait possible en cas de maintien d'un niveau élevé d'émissions de gaz à effet de serre. Une augmentation de la fréquence des niveaux de précipitations extrêmes est également prévue par la plupart des scénarios (*Canada and Environment and Climate Change Canada, 2019*).

Les paramètres température et précipitation conditionnent directement la distribution et disponibilité en eau. La présence de zones humides pourrait être moins importante dans les régions du sud du Canada, du fait de l'augmentation des températures, et donc d'une évaporation plus importante qui outrepasserait l'augmentation des précipitations. Cependant le niveau de confiance de ce scénario reste bas, du fait de l'absence apparente de changements significatifs à long terme des niveaux d'eau et du manque de données actuel. Par contre, des périodes de sécheresse estivale plus fréquentes sont attendues dans les prairies canadiennes (*Canada and Environment and Climate Change Canada, 2019*).

Or, les effectifs des populations de canards de surface sont variables et suivent globalement les conditions locales des plans d'eau (Johnson *et al.*, 2005). Dans un scénario avec un climat plus chaud et plus sec, un déclin des populations de canards de surface dont les Sarcelles à ailes bleues serait attendu, les aires de reproduction devenant trop sèches la plupart des années (*Conservation of Migratory Species of Wild Animals, 2014*).

À cela s'ajoute le drainage des zones humides des prairies canadiennes lié aux activités agricoles, avec 62% des 500 000 hectares de zones humides convertis en terres cultivées de 1985 à 2001 (Rashford *et al.*, 2011). Historiquement, ces zones étaient utilisées par les canards comme zones de reproduction alternatives lors des années de

sécheresse, car ces zones étaient moins touchées (Johnson *et al.*, 2005). Cette tendance d'expansion des terres agricoles pourrait continuer dans les années à venir, du fait de la fertilité des sols au niveau des zones humides, favorable à une agriculture intensive hautement productive (Rashford *et al.*, 2011). La perte d'une majeure partie des zones humides à la faveur de terres agricoles diminuerait donc la résilience de l'écosystème des prairies, ce qui en ferait un habitat de reproduction moins propice lors des années de sécheresse et entraînerait une forte contrainte sur les populations de canards de surface.

Ces différents scénarios montrent la vulnérabilité des populations de canards de surface face à l'altération des aires de reproduction, conséquence directe et indirecte du changement climatique et des modifications anthropologiques. Dans le futur, ces habitats pourraient offrir des conditions moins favorables, ce qui pourrait avoir pour conséquence un déclin des populations d'Anatidés.

Par exemple, à l'issue de périodes de sécheresse prolongée, le Canard pilet (*Anas acuta*) a connu un déclin important de sa population dans les prairies canadiennes dans les années 1980. Les tendances actuelles montrent que les populations de Canard siffleur d'Amérique (*Anas americana*), de Canard noir (*Anas rubripes*), ont discrètement diminué depuis le milieu du XXe siècle. À l'inverse la population d'autres espèces de canards de surface a augmenté ou est restée stable dans cet intervalle de temps, comme pour le Canard chipeau (*Anas strepera*) ou la Sarcelle à ailes bleues (*Anas discors*). Depuis le début des années 1990, cette dernière espèce a vu son nombre d'individus significativement augmenter, avec cependant un déclin du nombre de couples reproducteurs dans l'est du Canada (Bergeron *et al.*, 2015).

Le statut des populations de canard de surface est donc différent selon l'espèce considérée, ce qui pourrait suggérer une plus faible vulnérabilité et une meilleure plasticité face aux changements climatiques et anthropologiques, des adaptations spécifiques, ou encore une politique de conservation plus efficace selon les espèces.

## 2. Modification de la dynamique migratoire

Le changement climatique pourrait également affecter les mécanismes migratoires.

L'observation des dates d'arrivée et de départ chez de nombreuses espèces migratoires a montré une arrivée significativement anticipée sur les aires de reproduction au printemps. Cette tendance est particulièrement observée dans des zones où le réchauffement climatique est plus rapide, avec un lien fort entre les variations de température et une arrivée plus précoce au printemps (Møller *et al.*, 2010).

La date d'arrivée dans les zones de reproduction est cruciale. En effet, une arrivée trop anticipée pourrait être une menace pour l'individu en cas de températures trop froides ou être délétère pour le succès reproducteur avec l'éclosion des oisillons avant le pic d'abondance en ressources. Au contraire, une arrivée trop tardive pourrait signifier moins de disponibilité en habitats propices à la nidification, moins de partenaires potentiels et un déclin des ressources. La date d'arrivée qui serait optimale dépend donc

des conditions environnementales des aires de reproduction, alors que la date d'arrivée effective des oiseaux est influencée par les conditions rencontrées aux aires d'hivernage et aux zones de halte migratoire (Atkinson *et al.*, 2008 ; Mayor *et al.*, 2017). Or, les changements environnementaux affectant ces différentes régions pourraient être très différents, du fait de l'hétérogénéité des modifications environnementales locales. Ainsi, par exemple, l'augmentation des températures dans les aires de reproduction au printemps pourrait être anticipée par rapport aux modifications environnementales vécues par les oiseaux sur les aires d'hivernage. La croissance de la végétation au niveau des sites de reproduction, et l'émergence en parallèle des insectes, se produiraient prématurément aux signaux de départ des aires d'hivernage. Les oiseaux quittant alors trop tardivement les aires d'hivernage ou de halte, biaisés par les conditions environnementales, pourraient arriver sur les aires de reproduction à une période non propice en terme de ressources alimentaires. Ce risque de décalage avec le pic de disponibilité en ressources serait potentiellement majoré pour les oiseaux migrants parcourant de longues distances, dont la Sarcelle à ailes bleues, entre les aires d'hivernage situées dans l'hémisphère sud et les aires de reproduction de l'hémisphère nord (*Conservation of Migratory Species of Wild Animals*, 2014). Les modifications environnementales pourraient également favoriser les migrants parcourant de courtes distances, ceux-ci arrivant en premier sur les aires de reproduction avec un accès aux ressources et aux habitats les plus propices à la nidification, au détriment des migrants longue distance (*Conservation of Migratory Species of Wild Animals*, 2014).

### **Bilan sur le climat et les impacts sur les populations d'oiseaux**

- Les modifications climatiques actuelles menacent l'équilibre des écosystèmes et des fluctuations majeures des populations qui y vivent sont attendues.
- Les zones humides constituent les aires propices de reproduction des canards barboteurs dans les prairies canadiennes. Or, elles sont particulièrement menacées par les changements attendus, dont l'augmentation de la température et les modifications des niveaux de précipitation, mais également par les activités agricoles.
- Les mécanismes migratoires pourraient également être affectés, entraînant ainsi un risque de décalage entre la disponibilité en ressources alimentaires et la présence des oiseaux dans les zones de reproduction.

### 3. Modification de la dynamique des maladies infectieuses

Les changements climatiques peuvent aussi modifier la dynamique des maladies infectieuses, en modifiant les interactions entre l'environnement, les hôtes, les agents pathogènes et les vecteurs (Møller *et al.*, 2010). Ainsi les changements à long terme de la température et des précipitations, l'augmentation de la variabilité climatique et la fréquence plus élevée des événements météorologiques extrêmes attendus auront des impacts majeurs et variés selon le facteur, les espèces concernées, la zone géographique, le moment d'occurrence et la période considérée. Par exemple, une diminution de la disponibilité en plans d'eau pourrait entraîner à court terme une concentration de la faune sauvage autour des points d'eau restants. Cela favoriserait la transmission des agents pathogènes, tout en diminuant les densités de population sur le long terme ce qui diminuerait la transmission. Cependant, les relations entre la densité de population hôte et la transmission de parasites sont complexes et difficiles à prédire. Cela est dû à l'implication de nombreux facteurs imbriqués, comme le cycle parasitaire, les fluctuations saisonnières des populations d'hôtes et de vecteurs ou encore les interactions avec d'autres agents pathogènes (Plowright *et al.*, 2012).

Les maladies parasitaires vectorielles seraient particulièrement sensibles aux changements climatiques, car la distribution spatio-temporelle des espèces de vecteurs responsables de la transmission des parasites est dépendante des conditions climatiques locales (Loiseau *et al.*, 2013 ; Santiago-Alarcon *et al.*, 2012).

#### a) Influence de la température

La température est un des facteurs climatiques qui a le plus d'impact sur la période d'activité, la répartition et l'abondance des populations de vecteurs (Santiago-Alarcon *et al.*, 2012 ; Zamora-Vilchis *et al.*, 2012).

Une augmentation de la température pourrait être associée à un risque plus élevé de transmission des parasites. Cela s'expliquerait par un raccourcissement de la durée du cycle de développement des larves de ces arthropodes vecteurs et un raccourcissement de la durée de développement du parasite au sein du vecteur, avec une sporogonie facilitée (Elbers *et al.*, 2015 ; Loiseau *et al.*, 2013). Par exemple, le développement de parasites du genre *Plasmodium* au sein d'une espèce de moustiques, possible entre 16 et 30°C, est accéléré et optimal à des températures comprises entre 28 et 30°C (Zamora-Vilchis *et al.*, 2012).

Une étude sur les cinq espèces les plus abondantes de moustiques dans les prairies canadiennes, menée par Lysyk et son équipe en 2010 dans le sud de l'Alberta, a montré que le nombre de pièges positifs, c'est-à-dire contenant des moustiques, était corrélé à l'augmentation de la moyenne des températures, deux ou trois semaines avant la capture, et au cumul de degré-jours supérieurs à 5°C (Lysyk, 2010). Ainsi, les vecteurs d'hémoparasites chez les oiseaux vont avoir une activité dépendante de la température, avec une activité dans des températures comprises entre 10 et 35°C pour la majorité des espèces (Elbers *et al.*, 2015). Pour les Culicidés vecteurs de *Plasmodium*, le nombre de

moustiques observés dans les pièges diminue drastiquement lors de températures inférieures à 16°C (Elbers *et al.*, 2015). Dans un contexte de réchauffement climatique, la période d'activité des vecteurs pourrait donc se trouver allongée, ce qui serait un autre facteur d'augmentation du risque de maladies parasitaires.

Des preuves ont également été apportées d'une augmentation de plus en plus grande du nombre de générations complétées par an chez les espèces du genre *Culicoides*, du fait d'une période d'activité plus longue et d'un cycle de vie plus court dans un contexte d'augmentation des températures locales (Elbers *et al.*, 2015).

#### **b) Autres facteurs conditionnant la distribution spatio-temporelle des vecteurs**

L'initiation du vol par les vecteurs, et donc leur répartition spatio-temporelle, est conditionnée par la température mais aussi par d'autres facteurs comme la luminosité, la vitesse du vent, l'humidité ambiante et le niveau de précipitations (Mullen, 2019).

En cas de vitesse du vent trop importante, les vecteurs deviennent inactifs. Par exemple, pour la plupart des espèces de *Culicoides*, une vitesse supérieure à 9 kilomètres par heure (Mullen, 2019), voire à 3,6 kilomètres par heure selon d'autres auteurs (Elbers *et al.*, 2015), interfèrerait avec le vol et l'orientation vers les hôtes.

Ces paramètres climatiques, et l'extension de leur modification, déterminent l'abondance en vecteurs en affectant également leur survie à l'échelle locale. Par exemple, un niveau de précipitation plus élevé n'implique pas nécessairement une population plus importante de moustiques, car les larves et pupes pourraient être délogées de leurs habitats en cas de précipitations trop importantes (Elbers *et al.*, 2015).

Des conditions caractérisées par des températures élevées combinées à une humidité relative haute seraient également associées à une abondance moindre des femelles de la famille des *Ceratopogonidae*, par augmentation du risque de dessiccation pour les vecteurs adultes en vol (van Hoesel *et al.*, 2019).

De plus, les motifs de réponse aux facteurs climatiques diffèreraient selon les espèces de vecteurs. L'étude menée par Lysyk et son équipe a ainsi montré une influence négative des précipitations dans les deux semaines qui précèdent l'échantillonnage pour les espèces de moustiques *Culex tarsalis* et *Culiseta inornata*, l'absence d'effet des précipitations chez les espèces *Aedes dorsalis* et *Aedes campestris*, et un effet positif pour *Aedes vexans* du niveau de précipitations deux à trois semaines avant le piégeage (Lysyk, 2010).

D'une part, l'activité et l'abondance des vecteurs sont donc liées aux conditions climatiques, ce qui influencerait indirectement le risque d'hémoparasitose. D'autre part, la virulence des parasites serait également liée aux conditions climatiques, via notamment la diminution des défenses de l'hôte par réduction de la disponibilité en nourriture contenant les nutriments nécessaires à un bon fonctionnement des grandes fonctions de l'organisme hôte, dont les défenses immunitaires. De plus, des conditions environnementales délétères pourraient entraîner un stress important sur les individus hôtes et ainsi être responsables d'une diminution de la fonction immunitaire, du fait de

niveaux élevés et persistants de glucocorticoïdes (Møller *et al.*, 2010 ; Blas, 2015).

Les facteurs impliqués dans l'impact du changement climatique sur la distribution parasitaire sont donc très nombreux, souvent imbriqués et non limités aux seules conditions environnementales locales (Loiseau *et al.*, 2013). Ainsi, l'importance de mieux comprendre les interactions entre les différents facteurs est majeure pour appréhender les impacts possibles sur les populations d'hôtes aviaires.

#### **Bilan sur le climat et les modifications de la dynamique des maladies infectieuses**

- Les maladies parasitaires vectorielles sont particulièrement sensibles aux changements climatiques du fait de l'implication d'espèces de vecteurs dont la distribution spatio-temporelle est dépendante des conditions climatiques locales.
- L'augmentation des températures serait associée à un risque majoré de transmission des hémoparasites par une augmentation de la période d'activité, une modification de la répartition et de l'abondance des populations de vecteurs, ainsi que par une sporogonie facilitée des parasites.
- L'activité et l'abondance des vecteurs sont aussi liées à d'autres facteurs climatiques, comme la vitesse du vent ou les niveaux de précipitations, qui vont jouer à la fois sur la répartition et la survie de ces populations de vecteurs.
- Le stress qui pourrait être occasionné chez l'hôte par des modifications des conditions climatiques serait un des facteurs d'augmentation de sa vulnérabilité face à une infection par des hémoparasites.

#### **4. Interactions entre le climat, les parasites et les hôtes aviaires**

Les modifications climatiques attendues pourraient avoir des impacts majeurs cumulés sur les oiseaux migrateurs hôtes, du fait notamment d'une altération des habitats, d'un changement de la distribution et disponibilité en zones humides, de pressions anthropogéniques et d'une modification de la dynamique des maladies infectieuses.

Ces modifications extrêmement rapides pourraient rendre certains des indices environnementaux autrefois fiables, comme la photopériode, trompeurs pour les oiseaux en entraînant des décisions comportementales non adaptées aux nouvelles conditions environnementales (Atkinson *et al.*, 2008). Schlaepfer et son équipe ont appelé ce phénomène le « piège évolutif », avec des comportements devenant inadaptés

dans un contexte de modifications environnementales brutales, avec pour conséquence un succès reproducteur moindre ou une survie réduite (Schlaepfer *et al.*, 2002). Il n'y a pas d'études concernant les effets de ces pièges évolutifs sur le parasitisme. Cependant, du fait de la modification des interactions et de la distribution spatio-temporelle de la triade parasite-vecteur-hôte, un scénario de rupture de l'équilibre hôte-parasite devient très probable, avec un impact plus important des infections par les hémoparasites sur les hôtes (Atkinson *et al.*, 2008).

La survie des différentes espèces hôtes va dépendre notamment de leur capacité d'adaptation face aux perturbations environnementales futures. Ces capacités d'adaptation peuvent différer selon le sexe ou l'âge des oiseaux, en fonction des stratégies et compromis choisis (Atkinson *et al.*, 2008). Par exemple, dans certaines espèces, les individus mâles choisiraient d'attribuer une partie importante de leur énergie dans le succès reproducteur, avec notamment l'élaboration d'un plumage nuptial, au détriment des défenses immunitaires. De même, les comportements de parade nuptiale pourraient exposer différemment les individus mâles aux parasites (Zuk and Stoehr, 2010). Ces différences de comportements peuvent donc entraîner une exposition aux parasites et vecteurs différente selon l'âge et le sexe, et donc des prévalences différentes (Burkett-Cadena *et al.*, 2014). Par exemple, une étude, menée par Burkett-Cadena et son équipe, montre que les oiseaux mâles seraient plus exposés aux moustiques vecteurs, avec des repas sanguins pris à 64% sur des mâles, contre 36% pour les femelles (Burkett-Cadena *et al.*, 2014). Une autre étude menée par Calero-Riestra et García sur une population de Pipit rousseline (*Anthus campestris*), une espèce de passereaux migrateurs, a montré une prévalence en parasites sanguins plus importante chez les individus mâles. C'est le cas également pour les mâles de l'espèce *Acrocephalus sechellensis* (van Oers *et al.*, 2010). Cette tendance peut s'expliquer par une exposition différentielle, mais aussi par des effets immunosuppresseurs de certaines hormones, comme les androgènes (Calero-Riestra and García, 2016), et donc en un dimorphisme sexuel des défenses immunitaires (Zuk and Stoehr, 2010). Cependant, ce phénomène pourrait dépendre de l'espèce hôte en question et du parasite. Ainsi, une méta-analyse, réalisée par McCurdy et son équipe sur les parasites sanguins des oiseaux, n'a pas montré de différences significatives de prévalence entre les sexes, excepté pour *Haemoproteus* avec une prévalence qui serait supérieure chez les femelles (McCurdy *et al.*, 1998).

L'âge jouerait également un rôle, avec des juvéniles plus susceptibles aux infections par les parasites sanguins que les adultes, mais également une diminution du taux de survie lors d'infection chez les juvéniles et donc une mortalité sélective des juvéniles infectés (van Oers *et al.*, 2010).

Ces compromis d'investissement d'énergie dans les grandes fonctions comme la reproduction et la défense immunitaire dépendraient de la stabilité environnementale. Par exemple, dans un environnement stable ou avec des modifications prévisibles, une corrélation positive entre la disponibilité en ressources alimentaires et l'attribution d'énergie dans le système immunitaire est observée. Au contraire, dans un

environnement avec des changements rapides et imprévisibles, cette relation n'apparaît plus et l'investissement dans les défenses immunitaires n'est plus lié à la disponibilité en ressources (Houston *et al.*, 2007). Cela pourrait conduire à une diminution de la survie, par un investissement trop faible soit dans la recherche de nourriture lorsque les ressources sont faibles, soit dans les défenses immunitaires alors que les ressources alimentaires seraient suffisantes.

De nombreuses inconnues persistent quant à la capacité d'adaptation des espèces aviaires migratrices au changement climatique (*Conservation of Migratory Species of Wild Animals*, 2014). Les compromis adaptatifs des oiseaux hôtes pourraient influencer leur exposition et leur résistance aux parasites sanguins, parallèlement à une modification possible du coût du parasitisme, comme une vulnérabilité plus importante face aux prédateurs (Atkinson *et al.*, 2008). Il est donc important de considérer les infections par des parasites sanguins dans leur contexte, en tenant compte de l'hôte et de l'environnement, et de leurs interactions (Figure 1.11).

#### **Bilan sur les interactions entre le climat, les parasites et les hôtes aviaires**

- Les changements climatiques pourraient entraîner la modification des interactions et de la distribution spatio-temporelle de la triade parasite-vecteur-hôte et ainsi exercer une pression de sélection forte sur les oiseaux migrateurs hôtes.
- La survie des espèces hôtes face aux perturbations environnementales futures va dépendre de leurs capacités d'adaptation, qui peuvent varier selon l'âge et le sexe des oiseaux du fait de stratégies adaptatives différentes.
- Bien que de nombreuses inconnues persistent sur la capacité des différentes espèces aviaires à s'adapter au changement climatique, la mise en œuvre de compromis adaptatifs pourrait influencer l'exposition et la résistance aux hémoparasites et modifier le coût du parasitisme pour l'hôte.

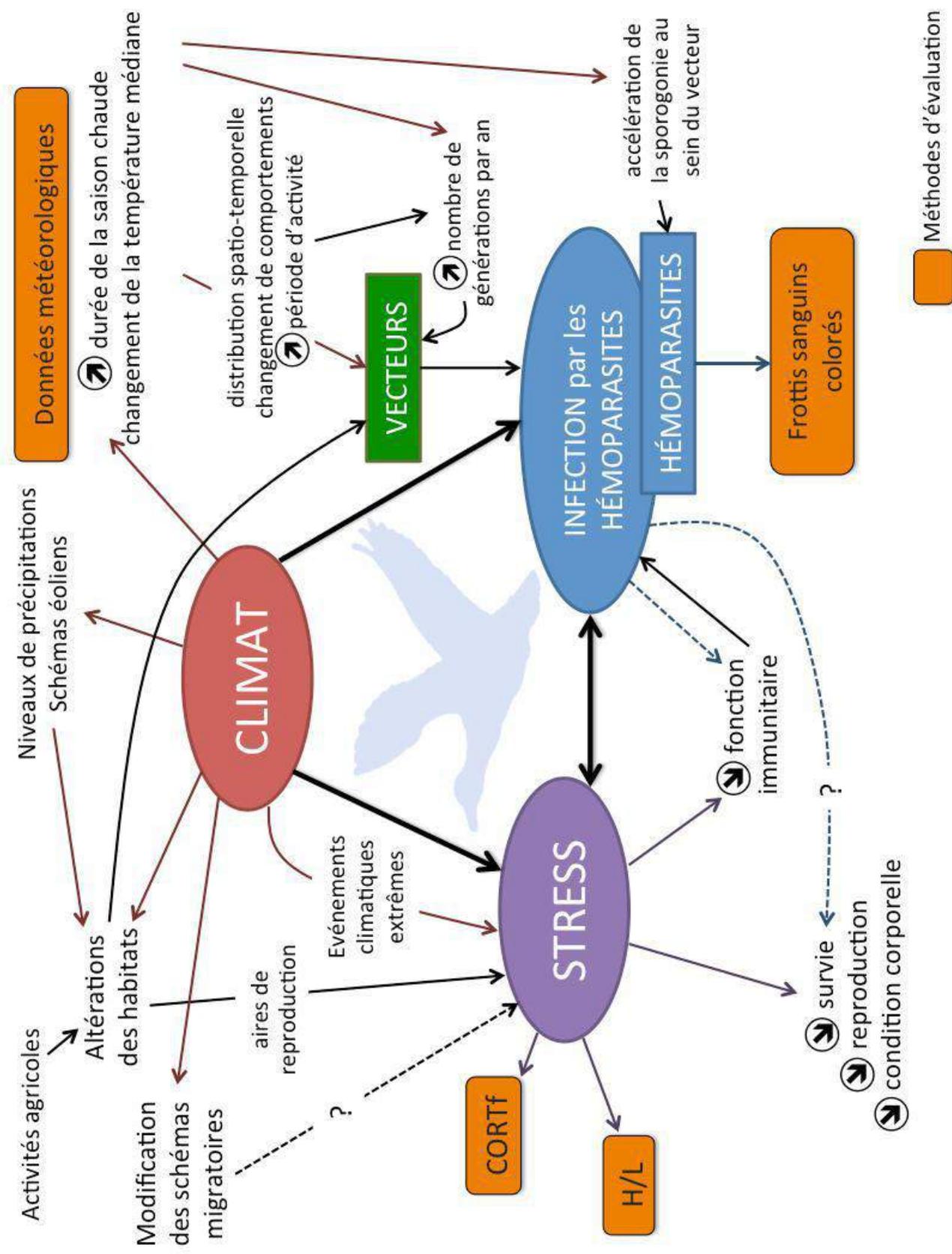


Figure 1.11 Schéma simplifié des interactions au sein de la triade "climat-stress-infection par les hémoparasites" et conséquences sur les populations d'hôtes aviaires. (© A. Le Gac)

## E. Objectifs et hypothèses

L'étude présentée s'intéresse aux relations entre le climat, le stress et les parasites sanguins chez une espèce de canards de surface, la Sarcelle à ailes bleues. Les hémoparasites chez les oiseaux migrateurs ont été largement étudiés par le passé et ont une prévalence élevée et une large distribution, ce qui motive le choix de ces parasites dans la présente étude. En revanche, aucune étude n'a investigué le rôle des modifications climatiques et du stress engendré chez les canards de surface, pour déterminer si les réponses face aux perturbations environnementales ont des impacts sur la condition corporelle et sur la probabilité d'infection par les parasites sanguins.

Cette étude a donc plusieurs objectifs, subdivisés en sous-objectifs :

- Objectif 1 : Détermination des prévalences apparentes de portage d'hémosporidies chez la Sarcelle à ailes bleues dans les prairies canadiennes de 2007 à 2017.
- Objectif 2 : Étude des relations entre le climat, le stress et les infections par les parasites sanguins chez la Sarcelle à ailes bleues.
  - Objectif 2a : Analyse des facteurs de risque potentiels (âge, sexe, facteurs climatiques, niveaux de CORTf élevés, rapport H/L élevé et mauvais état corporel) associés à ce portage.
  - Objectif 2b : Détermination de facteurs de stress responsables chez la Sarcelle à ailes bleues d'élévation des niveaux de CORTf et du rapport H/L.

Les interactions de la triade « climat-stress-infection par les hémoparasites » permettent d'émettre des hypothèses quant aux différents impacts sur les populations d'hôtes aviaires, et particulièrement sur les populations de Sarcelles à ailes bleues, sujets de l'étude.

Les hypothèses émises dans le cadre de l'étude sont les suivantes :

- Les changements climatiques vont entraîner des modifications de dépenses énergétiques ou de réponses au stress chez la Sarcelle à ailes bleues (mesure de la CORTf, rapport H/L) ;
- Les dépenses énergétiques augmentées et les réponses au stress pendant la mue (CORTf, H/L) auront pour conséquences une baisse de l'état général et une probabilité plus forte d'infection par des parasites sanguins ;

## II. Étude expérimentale

### A. Cadre de l'étude

L'étude suivante a été réalisée à l'antenne d'« *Environment and Climate Change Canada* » (ECCC) située à Saskatoon au Canada, en partenariat avec le département de pathologie du « *Western College of Veterinary Medicine* » de l'Université de la Saskatchewan.

ECCC est un département du Gouvernement du Canada responsable de la coordination et de l'organisation des différentes politiques et programmes environnementaux, dans un but de préservation et d'amélioration de la qualité environnementale au Canada.

Les activités d'ECCC sont réparties en quatre grands axes :

- Mise en place de mesures face au changement climatique
- Prévention et contrôle de la pollution de l'eau et de l'air
- Prédiction des conditions météorologiques et environnementales
- Conservation de la faune et flore

Une des préoccupations majeures de ce dernier axe est la conservation des espèces d'oiseaux migrateurs et de leurs aires de reproduction.

De nombreuses études scientifiques sur les oiseaux migrateurs sont réalisées et/ou financées par ECCC. Parmi elles, une autre étude réalisée en parallèle à la présente étude, s'intéresse aux relations et impacts du climat, du stress et de l'infection par le virus de l'influenza aviaire chez les Sarcelles à ailes bleues dans les prairies canadiennes (Ajaypal Kahlon). Les deux études utilisent la même base de données.

Les sources de financements ou contributeurs ayant permis la collecte des données sur les Sarcelles à ailes bleues sur toute la durée de l'étude sont listés ci-dessous : ECCC ; STAGE (Application stratégique des technologies génomiques dans le domaine de l'environnement - *Strategic Technology Application of Genomics in the Environment*) ; Institut de recherche sur les zones humides et canards de surface (*Ducks Unlimited Canada*) ; le Service d'inspection pour la santé animale et la santé des plantes du Ministère américain de l'Agriculture (USDA-APHIS - *United States Department of Agriculture - Animal and Plant Health Inspection Service*) ; l'Association pour la Conservation en Alberta (*Alberta Conservation Association*) ; l'Agence canadienne d'inspection alimentaire (*Canadian Food Inspection Agency*) ; l'Agence de Santé Publique canadienne (*Public Health Agency of Canada*) ; les bureaux provinciaux chargés de l'agriculture, de la faune sauvage et de la santé publique ; CCH (*Center for Coastal Health*) ; USFWS (*US Fish and Wildlife Service*) et CWS (*Canadian Wildlife Service*) .

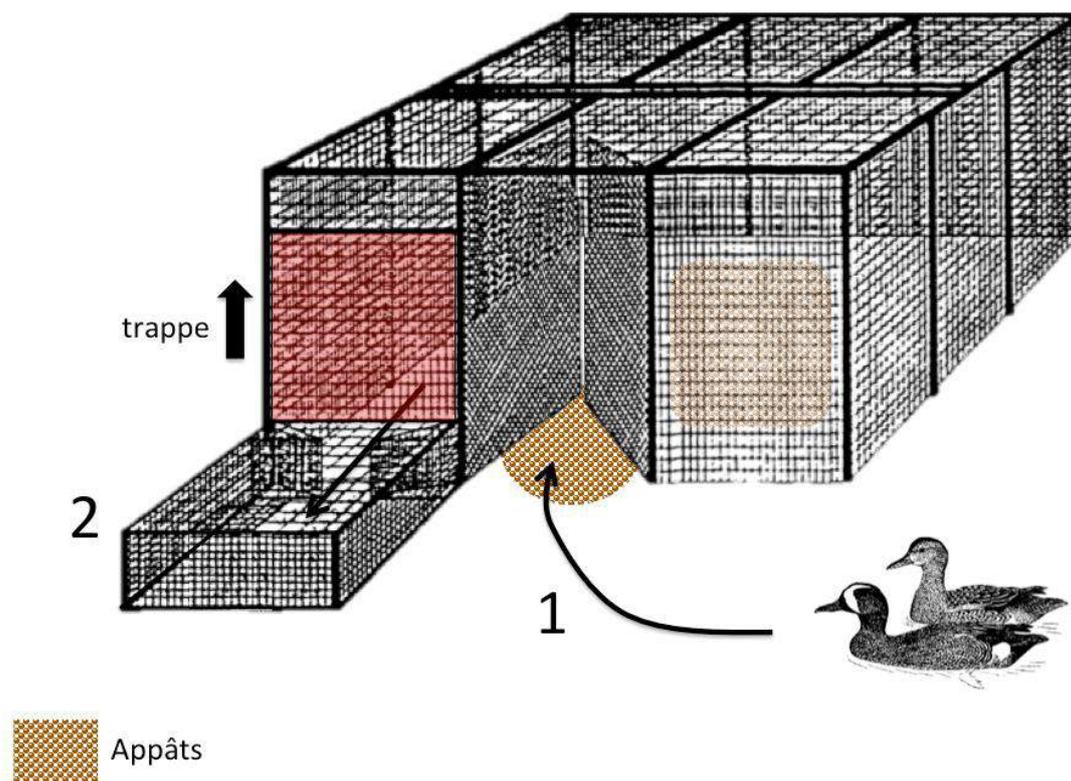
## B. Matériel et Méthodes

### 1. Sujets d'étude

Tous les individus inclus dans l'étude sont des canards de l'espèce Sarcelle à ailes bleues (*Anas discors*) prélevés sur la période s'étendant d'août 2007 à août 2017.

Les prélèvements ont été réalisés sur des Sarcelles à ailes bleues en août avant leur migration d'automne, sur différents sites des prairies canadiennes : trois sites en Alberta (*Frank Lake, Buffalo Lake, Brooks*) et deux au Saskatchewan (*Rice Lake, Last Mountain Lake*) (Annexe 2).

Les captures ont été réalisées en collaboration avec CWS et USFWS lors des programmes annuels de mise en place de bagues d'identification sur les oiseaux. Les oiseaux sont capturés à l'aide de pièges à appâts standard. Les pièges sont fabriqués selon le modèle proposé par Mauser et Mensik (Mauser and Mensik, 1992). Les pièges sont constitués de quatre panneaux latéraux, d'un toit et d'un plancher. L'entrée du piège, située au centre d'un des panneaux latéraux, est en entonnoir, ce qui empêche les oiseaux de sortir une fois entrés (Figure 2.1).



**Figure 2.1** Illustration du modèle-type des pièges à appâts standards utilisés pour la capture des canards barboteurs (basée sur les illustrations et description de Mauser and Mensik, 1992). 1- Les oiseaux sont attirés par les appâts dans le piège dans lequel ils rentrent par une entrée en entonnoir, qui prévient les sorties par la suite. 2- Chaque matin, les oiseaux sont transférés dans la boîte flottante après ouverture de la trappe, en rouge sur l'illustration.

Les pièges sont installés dans des étendues d'eau où la présence de Sarcelles à ailes bleues est notée, à une profondeur de 40 à 60 cm. Avant la mise en place des pièges, des appâts, constitués de riz ou de blé, sont disposés dans la zone choisie pour s'assurer que celle-ci soit activement utilisée par les canards.

Une fois en place, les pièges sont vidés chaque matin au moment des prélèvements. Les oiseaux sont transférés via une boîte flottante jusqu'au lieu de prélèvement sur la berge (Figure 2.2). Les sarcelles, non identifiées, le sont avec une bague de taille adaptée au gabarit de l'animal et sur laquelle est inscrit un numéro d'identification unique. Ce numéro sera ensuite entré dans une base de données gérée par le Bureau canadien de Baguage des Oiseaux (*Bird Banding Office, BBO*), dans le cadre du programme nord-américain de mise en place de bagues chez les oiseaux (« *the North American Bird Banding Program* »).



**Figure 2.2 Transfert des oiseaux du piège à appâts dans la boîte flottante (© A. Le Gac).**

## 2. Données à collecter

Afin de répondre aux objectifs de l'étude présentés dans la partie I.E, une liste de données a été établie. Cette liste est présentée dans le Tableau II.I ci-dessous.

**Tableau II.I Données à collecter pour chaque objectif de l'étude**

Objectifs	Données à collecter	
Objectifs 1, 2	<b>Données démographiques et géographiques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Localisation géographique de la capture</li> <li>- Date de la capture</li> <li>- Numéro de bague / identification de la sarcelle</li> <li>- Sexe</li> <li>- Âge (adulte ou juvénile)</li> </ul>
Objectifs 1, 2	<b>Données cliniques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Présence ou non de parasites sanguins</li> </ul>
Objectifs 1, 2	<b>Données étiologiques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Identification du ou des parasites sanguins détectés</li> </ul>
Objectif 2	<b>Données démographiques et géographiques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Densités de population de canards de surface, de Sarcelle à ailes bleues et pourcentage d'Anatidés</li> <li>- Densité de zones propices à la reproduction</li> </ul>
	<b>Données cliniques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Poids</li> <li>- Longueur de la tête et du bec</li> <li>- Rapport H/L</li> <li>- Niveau de CORTf</li> </ul>
	<b>Données climatiques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Températures : minimale, maximale, moyenne</li> <li>- Précipitations</li> <li>- Vitesse du vent</li> </ul>

### 3. Collecte des données

#### *a) Données collectées par échantillonnage et prélèvements lors des rassemblements pré-migratoires*

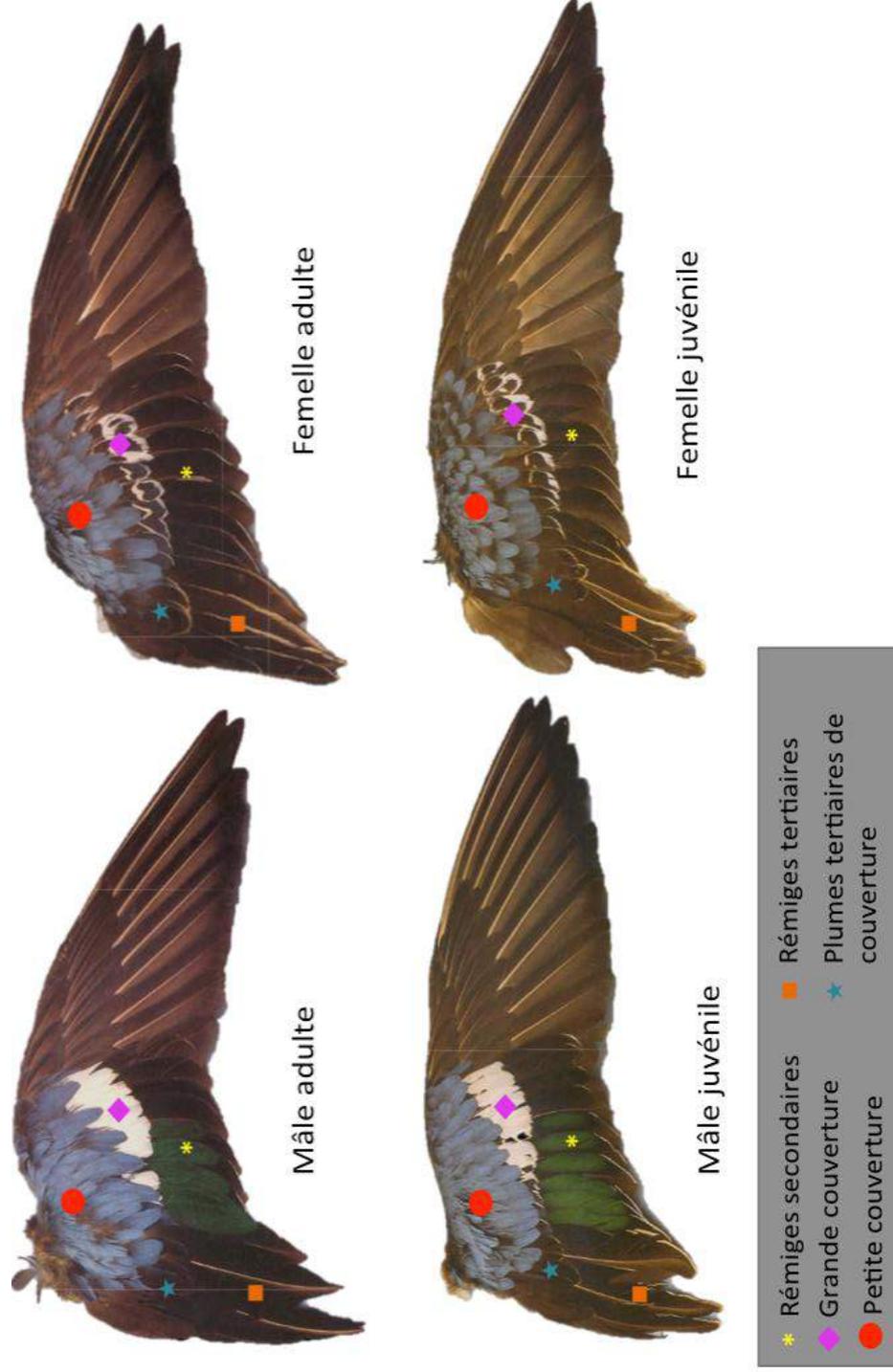
Les protocoles de capture et d'échantillonnage ont été construits en accord avec les directives du Conseil canadien de protection des animaux sur une utilisation éthique des animaux en recherche. Ces protocoles ont par ailleurs été approuvés par le Conseil d'Éthique sur la recherche animale de l'Université de la Saskatchewan (protocole 20070039), et conduits sous autorité fédérale (permis scientifique de capture et baguage des oiseaux migrateurs délivré par ECCC n° 1048R ; permis fédéral de baguage d'oiseaux délivré par le Ministère de l'Intérieur des États-Unis n°09072 et 23792 ; permis fédéral de USFWS n° MB779238-2).

Pour chaque sarcelle, la localisation géographique du lieu de prélèvement, la date, le numéro de bague, le sexe (mâle ou femelle), l'âge (juvénile ou adulte), le poids, et la longueur de la tête et du bec (de l'extrémité du bec à l'os occipital) sont enregistrés. Ces informations sont ensuite informatisées et stockées dans le logiciel « *Bandit* » (version 4.0) (*USGS Patuxent Wildlife Research Center Bird Banding Laboratory, 2018*) qui permet de rassembler l'ensemble des données collectées lors des programmes de baguage en Amérique du Nord, et de les transmettre au Laboratoire américain de Baguage d'Oiseaux (*Bird Banding Laboratory, BBL*) et au Bureau canadien de Baguage d'Oiseaux (*Bird Banding Office, BBO*).

Le sexe et l'âge de chaque individu sont déterminés à l'aide du plumage. Les critères de détermination utilisés sont rassemblés dans le Tableau II.II et sont illustrés par la Figure 2.3.

**Tableau II.II Critères de détermination de l'âge et du sexe reposant sur les plumes des ailes chez la Sarcelle à ailes bleues (*Anas discors*)** (basé sur les descriptions de Carney, 1992).

Plumes des ailes	Mâle		Femelle	
	Adulte	Juvenile	Juvenile	Adulte
Rémiges secondaires	Speculum vert iridescent sur la majorité des plumes		Vert terne et non iridescent sur toutes les plumes	
Plumes de la grande couverture	La majorité ou la totalité des plumes blanches		Tachetées (points noirs), le plus souvent sombres avec pas ou peu de blanc	
	Unies (parfois une ou deux taches à l'extrémité distale des plumes)	Tachetées (avec 2 ou plus de points noirs à l'extrémité distale des plumes)	Motif blanc variable	Motif blanc en forme de « V » inversé
Rémiges tertiaires	Vert sombre, avec parfois une bordure marron clair	Marron sombre, avec bordures marron clair, souvent d'aspect effiloché ou délavé	Bordures marron clair	
		Après la mue : similaire au mâle adulte	Après la mue : similaire à la femelle adulte	
Plumes tertiaires de couverture	Larges et arrondies, marron sombre avec des nuances de bleu	Étroites et extrémité pointue et des bordures marron clair	Larges et arrondies, marron sombre avec des bordures marron clair	
		Après la mue : similaire au mâle adulte	Après la mue : similaire à la femelle adulte	



**Figure 2.3** Illustration des différences au niveau des plumes d'ailes obtenues sur des cadavres de deux mâles, un juvénile et un adulte, et de deux femelles, une juvénile et une adulte, pour la détermination de l'âge et du sexe à partir du plumage chez la Sarcelle à ailes bleues (basée sur les descriptions et illustrations de Carney, 1992). Le patch bleu-ciel, visible sur les plumes de la petite couverture, est retrouvé chez tous les individus de l'espèce. Les individus mâles se distinguent des femelles par le speculum vert iridescent des rémiges secondaires et une grande couverture majoritairement blanche. Les femelles ont quant à elles des rémiges secondaires d'un vert très terne et des plumes de la grande couverture tachetées et sombres avec peu de blanc. Les juvéniles des deux sexes ont des rémiges tertiaires d'aspect délavé, des tertiaires de couverture étroites et effilées, et les motifs des plumes de la grande couverture différents de ceux des adultes.

La contention pour la réalisation des prélèvements est effectuée à l'aide d'une serviette dans laquelle la sarcelle est enveloppée.

Une prise de sang est réalisée par ponction de la veine jugulaire (Figure 2.4 (A)). Entre 2 et 2,5mL de sang sont collectés. Un sous-échantillon d'un volume de 0,25mL est déposé dans un tube à centrifuger contenant 1mL de solution saline tamponnée au phosphate (*Phosphate buffer saline* ou milieu PBS), et ensuite stocké à température ambiante. Deux frottis sanguins sont également immédiatement réalisés. Le reste du sang collecté est placé dans un tube sec, stocké à froid positif. À la fin de chaque journée, après mise à température pendant 15 à 20 minutes, les échantillons sanguins sont centrifugés pendant 10 minutes à 12300g et le sérum est séparé puis stocké à -20°C jusqu'au retour au laboratoire où il est stocké à -80°C pour une éventuelle analyse ultérieure dans le cadre d'une autre étude. Le culot est conservé et congelé à -20°C.

Des écouvillons oraux (pharyngé et choanal) et cloacaux sont également réalisés sur chaque individu (Figure 2.4 (B) et (C)) et placés dans un même tube contenant 1,5mL de milieu de transport pour virus. Ces écouvillons sont conservés à -20°C jusqu'au retour au laboratoire où ils sont stockés à -80°C, pour recherche ultérieure de virus influenza aviaire (par réaction de polymérisation en chaîne en temps réel ou RT-PCR) dans le cadre de l'étude menée en parallèle.

Pour chaque individu, la deuxième plume rectrice de la queue à la droite de l'oiseau est prélevée (Figure 2.4 (D)), ainsi qu'une vingtaine de plume de la calotte. Les plumes sont collectées en tirant fermement dessus (et non en coupant), et stockées dans une enveloppe en papier, identifiée du numéro de l'oiseau.

Un morceau de 1 à 2 mm de la plus longue griffe du pied droit est prélevé à l'aide d'un coupe-ongle humain et stocké dans la même enveloppe que les plumes.



**Figure 2.4** Prélèvements effectués chez une Sarcelle à ailes bleues capturée à *Last Mountain Lake*. (A) Prise de sang à la veine jugulaire. (B) Réalisation d'un écouvillon choanal et pharyngé. (C) Réalisation d'un écouvillon cloacal. (D) Prélèvement de la deuxième rectrice à droite. (© J. McLeod)

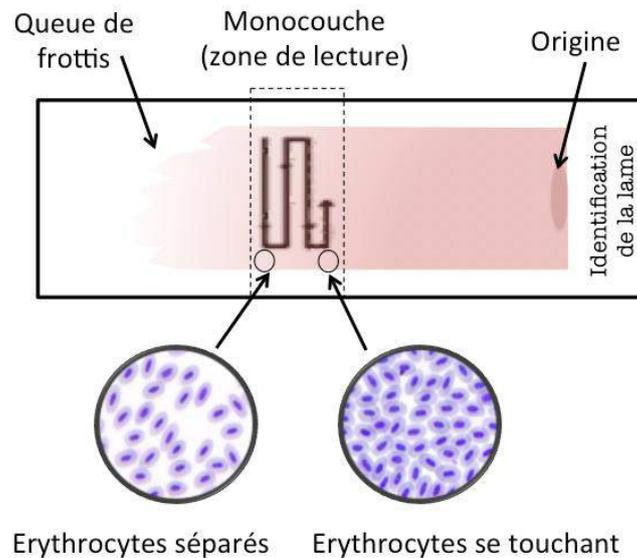
## b) Analyse des frottis sanguins

Les frottis sanguins, séchés à l'air libre, sont colorés avec une coloration de May-Grünwald Giemsa par le laboratoire du département de pathologie vétérinaire du « *Western College of Veterinary Medicine* ». Jusqu'à l'année 2013, les frottis étaient colorés dans le mois suivant leur réalisation. Pour les années 2014 à 2017, les frottis sanguins ont été colorés en octobre 2019.

Les lames colorées sont examinées au microscope au grossissement x100 pour évaluer les caractéristiques de coloration (coloration du fond de lame et coloration des cellules), la distribution des cellules sur la lame et leur intégrité, ainsi que rechercher la présence éventuelle de parasites des genres *Microfilaria* ou encore *Leucocytozoon*, parfois visibles à faible grossissement.

Afin de maximiser la luminosité du champ, le condensateur est levé au maximum et le diaphragme ouvert.

La numération leucocytaire est réalisée au grossissement x1000 sous huile à immersion, au niveau de la monocouche de la lame, qui correspond à la zone où les cellules forment une plage uniforme avec peu de superposition et peu de grands espaces vides entre les cellules. La position et le trajet réalisé lors de la numération sont représentés sur la Figure 2.5.

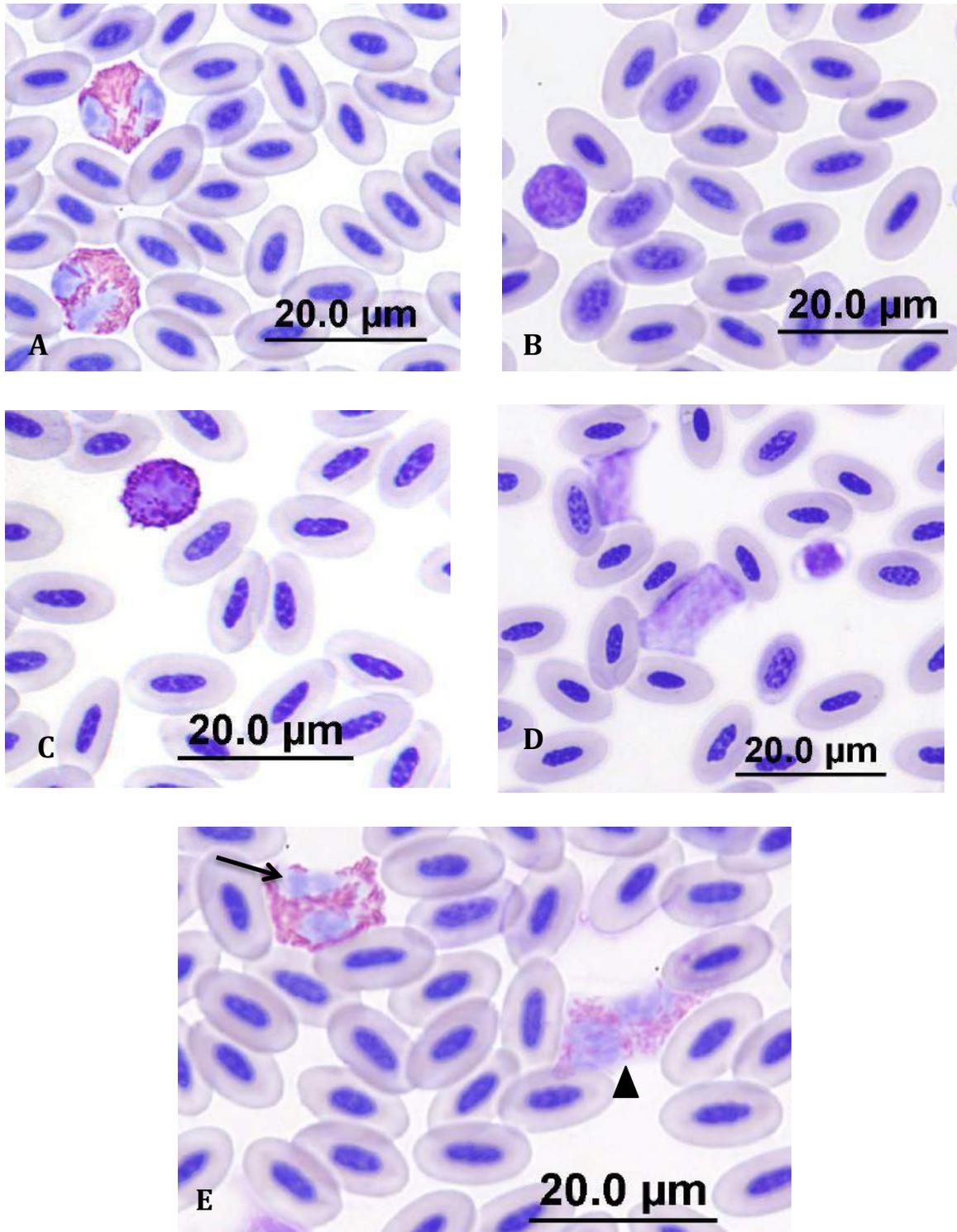


**Figure 2.5 Position et trajet réalisés lors de la lecture du frottis sanguin pour la numération leucocytaire.** La lecture est centrée sur la monocouche cellulaire, qui correspond à la zone où les cellules sont individualisées et uniformément réparties. Une lecture en créneau est réalisée pour la numération.

100 leucocytes sont comptés et classifiés selon la méthode décrite par Campbell et son équipe (Campbell, 2015). Les caractéristiques morphologiques des leucocytes de la Sarcelle à ailes bleues sont rassemblées dans le Tableau II.III et illustrées par la Figure 2.6. Si une cellule n'est pas intègre ou est non identifiable, elle n'est pas incluse dans le différentiel.

**Tableau II.III Morphologie des leucocytes de la Sarcelle à ailes bleues sur frottis sanguin coloré avec une coloration Wright Giemsa.**

Leucocytes	Forme	Cytoplasme	Noyau	Particularités
<b>Hétérophiles</b> (Figure 2.5 (A) et (E))	Grandes cellules (diamètre moyen : 8,8µm), généralement rondes	Incolore	Sombre, segmenté (souvent plus de 3 lobes)	Granulations éosinophiliques (orange sombre à rouge brique) fusiformes ou en forme de grain de riz
<b>Lymphocytes</b> (Figure 2.5 (B))	Taille variable	Souvent peu visible du fait d'un rapport nucléocytoplasmique élevé, basophile	Sombre, chromatine condensée, rond	Rapport nucléocytoplasmique élevé
<b>Basophiles</b> (Figure 2.5 (C))	Taille intermédiaire, cellules rondes	Incolore, souvent non visible car masqué par les granulations	Souvent non segmenté, masqué en grande partie par les granulations	Nombreuses granulations éosinophiliques,
<b>Monocytes</b> (Figure 2.5 (D))	Grandes cellules de forme irrégulière	Bleu-gris et d'apparence granuleuse	Rond ou bilobé, avec une chromatine en dentelle	Parfois présence de vacuoles
<b>Éosinophiles</b> (Figure 2.5 (E))	Grandes cellules rondes	Bleu pâle	Sombre, segmenté (bilobé le plus souvent)	Granulations éosinophiliques de forme arrondie et plus pâle et moins définies que celles des hétérophiles



**Figure 2.6** Leucocytes chez la Sarcelle à ailes bleues (*Anas discors*). Frottis sanguins colorés avec une coloration Wright Giemsa, observés au microscope au grossissement x1000. (A) Hétérophiles. (B) Lymphocyte. (C) Basophile. (D) Monocytes. (E) Hétérophile (flèche) et éosinophile (tête de flèche). (©A. Le Gac)

Le rapport hétérophiles sur lymphocytes (H/L) est calculé en divisant le nombre d'hétérophiles par le nombre de lymphocytes.

Après avoir réalisé la numération leucocytaire, la lame est scannée pour recherche de parasites sanguins. Une centaine de champs sont observés au grossissement x400 et au moins une centaine de champs au fort grossissement x1000. Ainsi le nombre approximatif d'érythrocytes examinés est de 50 000, selon la méthode décrite par Valkiūnas et son équipe, permettant d'obtenir de bons résultats pour détecter la prévalence des hémospories aviaires en comparaison avec les méthodes de réactions de polymérisation en chaîne ou PCR (Valkiūnas *et al.*, 2008). Ce nombre permet notamment de détecter la plupart des infections, même si cela ne garantit pas la détection de toutes les infections chroniques faibles. Ainsi, cette méthode d'évaluation des parasites sanguins sous-estimerait légèrement la prévalence d'infection par les hémoparasites chez les oiseaux naturellement infectés (Valkiūnas *et al.*, 2008).

Un oiseau est considéré infecté quand au moins un parasite sanguin est mis en évidence lors de l'examen des deux lames correspondantes. L'examen d'une lame, comprenant la numération leucocytaire et la recherche parasitaire, prend entre 20 et 30 minutes.

Les parasites recherchés dans l'étude sont les hémospories des genres *Haemoproteus*, *Plasmodium* et *Leucocytozoon*. La différenciation entre *Plasmodium* et *Haemoproteus* peut parfois être difficile. C'est le cas lorsque seuls des gaméocytes immatures n'occupant qu'une très faible proportion du cytoplasme sont mis en évidence, sans formes parasitaires intermédiaires intra-érythrocytaires ou sans éléments parasitaires dans des leucocytes ou thrombocytes pour *Plasmodium*, et sans gaméocyte englobant le noyau pour *Haemoproteus* (Campbell, 2015 ; *Friend and United States Geological Survey*, 1999). Lorsque la différence entre les deux genres d'hémospories est impossible, l'individu est considéré comme porteur d'un genre d'hémospories « inconnu », mais est déclaré infecté par au moins un des genres d'hémospories.

La présence d'autres hémoparasites comme *Microfilaria* et *Aegyptianella spp.* est également notée.

### ***c) Méthode d'extraction de la corticostérone dans les plumes (Protocole du laboratoire du Dr. SOOS mis à jour en octobre 2019)***

Tous les réactifs, les milieux tampons, ainsi que les standards et échantillons de corticostérone impliqués dans le processus d'extraction sont sortis le matin, afin qu'ils soient à température ambiante lors de leur utilisation l'après-midi du même jour. Cela semble en effet permettre une meilleure uniformité des résultats tout au long du processus, de l'extraction à la mesure de la corticostérone par méthode immunoenzymatique ELISA (*Enzyme-Linked ImmunoSorbent Assay*).

(1) Jour 1 :

Les solutions et réactifs utilisés sont préparés et dilués selon les indications du fabricant (*Cayman Chemical Company*, Ann Arbor, Michigan, États-Unis). Les détails des préparations et dilutions sont présentés en Annexe 3.

Pour chaque échantillon, la rectrice est pesée et mesurée pour obtenir respectivement la « masse totale » et la « longueur totale ». Le calamus est coupé juste au-dessus de l'ombilic supérieur (Figure 2.7) et retiré. La plume est de nouveau pesée et mesurée afin d'obtenir la « masse de l'échantillon » et la « longueur de l'échantillon ».



**Figure 2.7 Localisation de la coupe effectuée pour retirer le calamus.** Plume récoltée sur un individu de l'espèce Sarcelle à ailes bleues. (© A. Le Gac)

La plume est placée dans une fiole de verre de 20mL propre et sèche. À l'aide de ciseaux, la plume est coupée en petits morceaux inférieurs à 5mm<sup>2</sup> dans le flacon, dans lequel sont ensuite ajoutés 10mL de méthanol afin d'immerger les morceaux de plume.

Les contrôles internes sont ensuite préparés à partir de la même solution mère de corticostérone. Leur préparation est détaillée en Annexe 3. Le témoin global ainsi que les deux contrôles à 200pg/mL de corticostérone (*Cayman Chemical Company*, Ann Arbor, Michigan, Etats-Unis) sont placés sous hotte jusqu'à évaporation des liquides, ils ne subissent pas le processus d'extraction. Les autres contrôles ainsi que les échantillons à extraire sont placés dans un homogénéisateur à ultrasons à température ambiante pendant 30 minutes, puis sont incubés toute la nuit au bain-marie à agitation à 50°C et 100 tours par minute.

### (2) Jour 2 :

Les échantillons sont retirés du bain-marie pour être filtrés en utilisant du papier filtre Whatman. Pour cela, le tuyau de la pompe à vide est connecté à un ballon à vide dans lequel est placé un tube Falcon de 50mL. Un entonnoir Büchner avec papier filtre est assemblé en haut du dispositif à vide. Un tube à scintillation de dimension 25x150mm est identifié avec le nom de l'échantillon. Ce dernier servira à récupérer le filtrat pour future évaporation. La pompe à vide est mise en route à très faible pression. À l'aide d'une pipette, la totalité de l'échantillon à filtrer est transférée dans l'entonnoir contenant le filtre, qui permet de retenir une partie des morceaux de plume. En utilisant une nouvelle pipette, 5mL de méthanol sont ajoutés à l'ancien flacon qui contenait l'échantillon pour le rincer, et sont ensuite transférés dans le filtre. Le filtrat obtenu est transféré dans le nouveau tube identifié et ce tube est placé sous hotte.

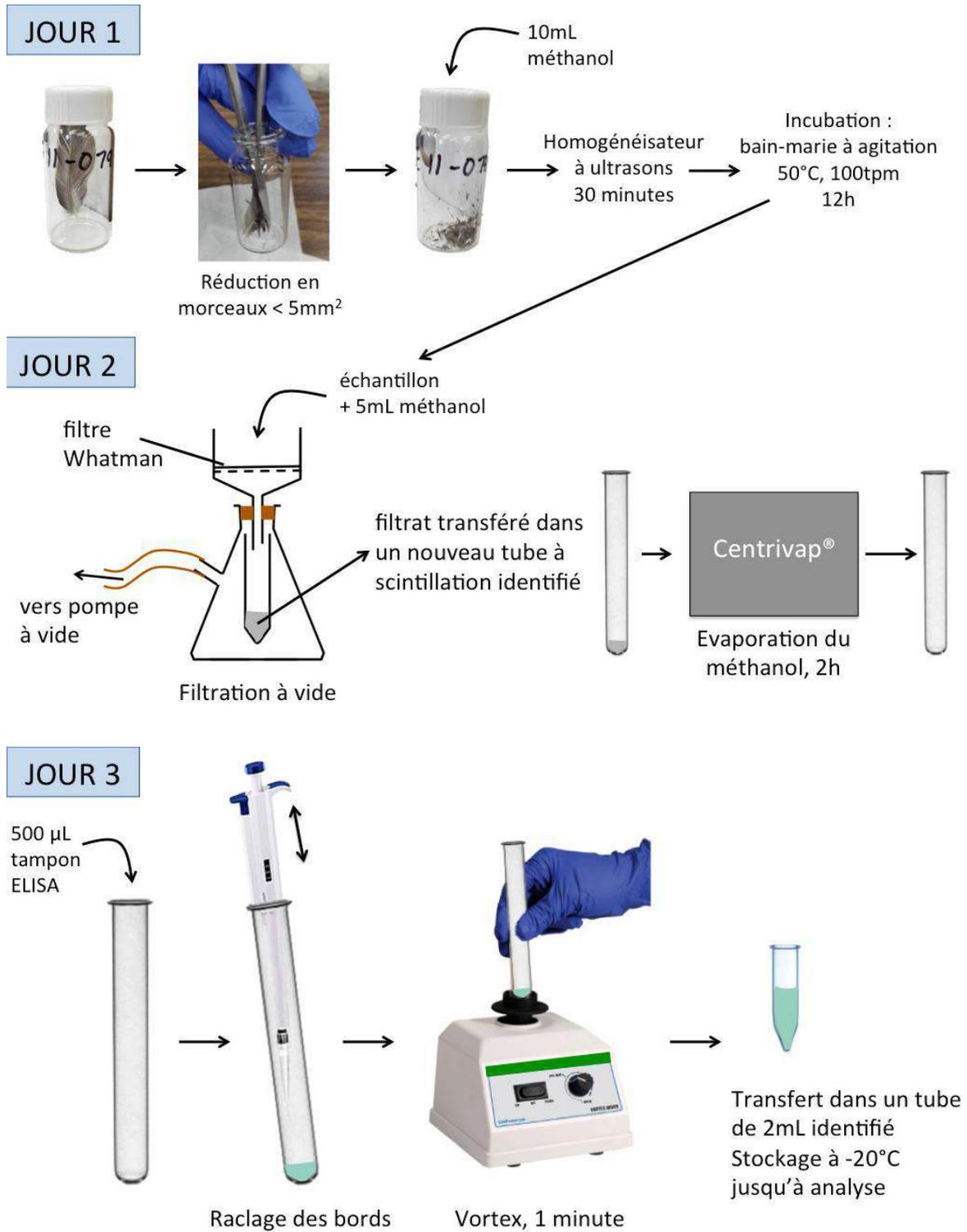
Pour s'assurer qu'il n'y ait pas de contamination croisée entre les échantillons, l'entonnoir est rincé avec 5mL de méthanol et un nouvel échantillon est filtré seulement lorsque tout le méthanol est évaporé et que l'entonnoir est sec, ce qui prend environ une minute.

Lorsque tous les échantillons du lot à extraire ont été filtrés, ceux-ci sont placés dans le CentriVap (*Labconco Corporation*, Kansas City, Montana, Etats-Unis), concentrateur de laboratoire, pour évaporation du méthanol. Le CentriVap peut contenir 9 échantillons à la fois et le processus d'évaporation prend environ 2 heures. Les échantillons doivent être complètement secs, car la moindre trace d'humidité pourrait interférer avec la mesure de la corticostérone par méthode ELISA.

### (3) Jour 3 :

Les échantillons sont reconstitués en ajoutant avec une pipette 500µL du milieu tampon du kit ELISA ultérieurement utilisé pour la mesure de la corticostérone (*Cayman Chemical Company*, Ann Arbor, Michigan, États-Unis) dans chaque tube sec. Les bords du tube sont raclés à l'aide de la même pipette afin de récupérer le maximum de matériel, puis le tube est passé au vortex pendant une minute et son contenu est transféré dans un nouveau tube de 2mL identifié. Le processus est répété en changeant de pipette entre chaque échantillon. Les échantillons sont stockés à -20°C jusqu'à leur analyse.

Le déroulement sur trois jours du processus d'extraction au méthanol pour un échantillon de plume donné est présenté dans la Figure 2.8.

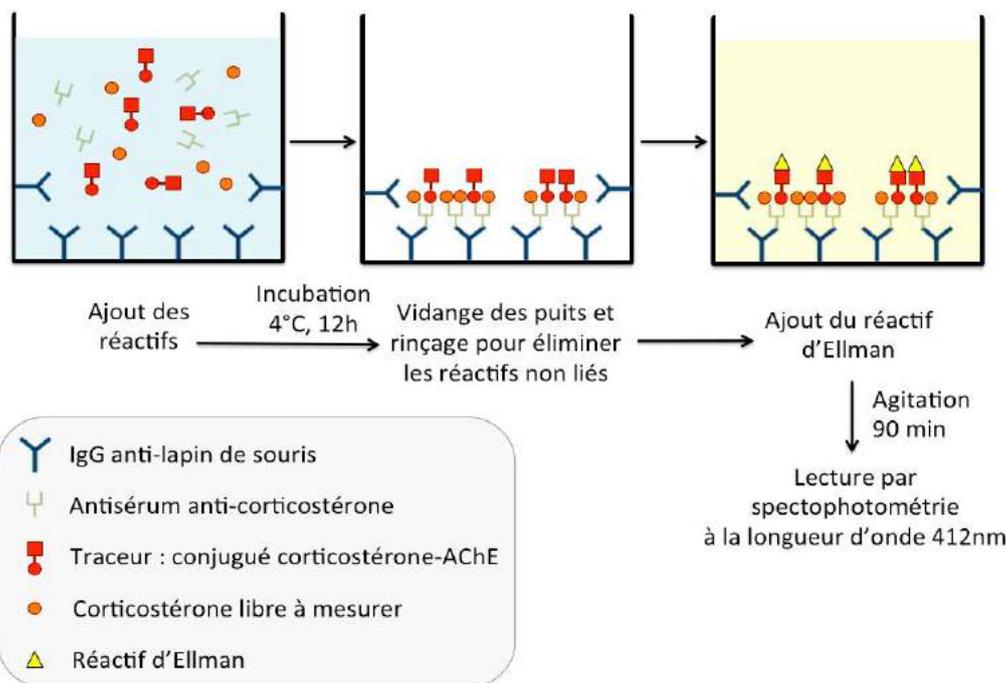


**Figure 2.8 Déroulement du processus d'extraction au méthanol de la corticostérone des plumes selon le protocole du laboratoire du Dr Soos.**

#### d) Méthode immuno-enzymatique ELISA pour mesurer la corticostérone dans les plumes

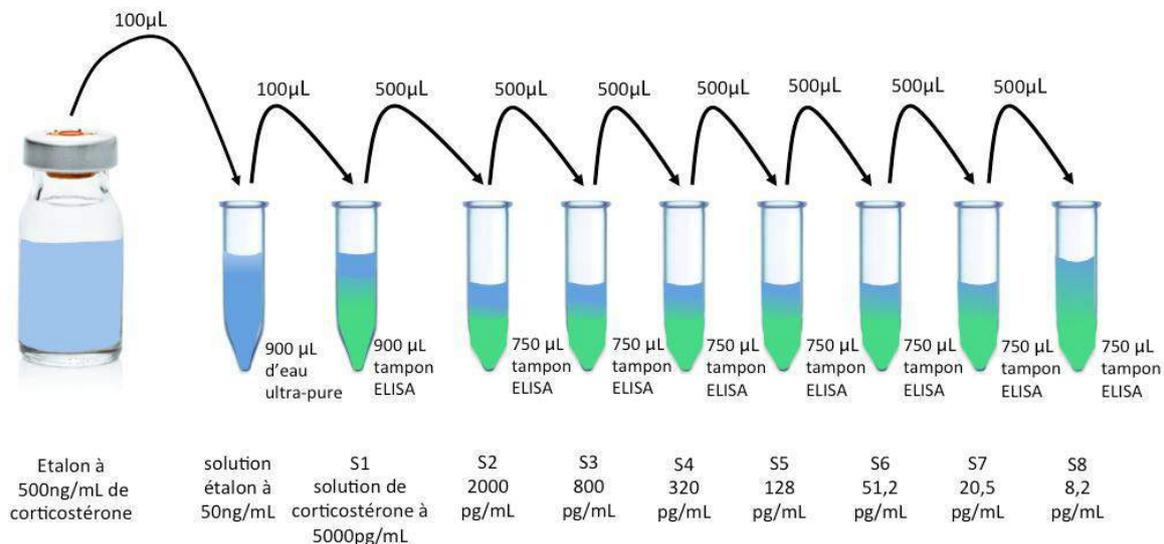
Le protocole de mise en place des plaques ELISA est extrait du livret fourni avec le kit Cayman utilisé (*Cayman Chemical Company*, Ann Arbor, Michigan, États-Unis). Ce kit permet la détection de concentration en corticostérone allant de 8,2 à 5000pg/mL, avec une sensibilité d'environ 30pg/mL, qui correspond à la plus petite concentration statistiquement distinguable d'un bruit de fond.

Le test pour mesurer la corticostérone est basé sur la compétition entre la corticostérone et un traceur, correspondant à un conjugué corticostérone-acétylcholinestérase (AChE), pour une quantité d'antisérum fixe. La concentration du traceur est maintenue constante alors que la quantité de corticostérone à mesurer varie. Ainsi, la quantité de traceur qui va pouvoir se lier à l'antisérum sera inversement proportionnelle à la quantité de corticostérone d'intérêt. La quantité de traceur liée est révélée par une réaction colorimétrique, dont l'intensité de couleur est déterminée par spectrophotométrie. L'intensité étant proportionnelle à la quantité de traceur fixée, cela permet de déduire la quantité de corticostérone de l'échantillon ou du contrôle (Figure 2.9).



**Figure 2.9 Principe de la technique ELISA utilisée dans cette étude** (basée sur les illustrations et description de *Cayman Chemical Company*, 2016). Des anticorps de souris IgG sont fixés au fond des puits de la plaque. L'antisérum spécifique de la corticostérone va se lier aux anticorps de souris. La corticostérone libre issue de l'échantillon et la corticostérone conjuguée à l'enzyme AchE sont en compétition pour se fixer aux sites antigéniques de l'antisérum. La plaque est vidée et rincée pour éliminer les réactifs non liés. Le réactif d'Ellman contenant le substrat de l'AchE est ajouté. La réaction enzymatique obtenue absorbe fortement à la longueur d'onde de 412nm. L'intensité de la couleur de la réaction, déterminée par spectrophotométrie, est proportionnelle à la quantité de traceur et donc inversement proportionnelle à la quantité de corticostérone à mesurer.

Les tubes étalons utilisés dans le protocole ELISA sont préparés, conformément à la Figure 2.10 ci-dessous, à partir de la solution étalon à 50ng/mL de corticostérone préalablement réalisée. Ces tubes étalons ne peuvent pas être conservés plus de 24 heures, et ne servent donc qu'à la réalisation d'une ou deux plaques ELISA.



**Figure 2.10 Préparation des tubes étalons de corticostérone utilisés dans le protocole ELISA** (basée sur les illustrations et description de *Cayman Chemical Company*, 2016). Des tubes de 2mL propres sont numérotés de S1 à S8. Dans le tube S1, 900µL de solution tampon ELISA sont ajoutés, alors que 750µL de cette même solution sont ajoutés dans les tubes S2 à S8. 100µL de la solution étalon de corticostérone à 50ng/mL sont transférés dans le tube S1 à l'aide d'une micropipette. La solution obtenue est homogénéisée en remplissant lentement et en vidant le contenu de l'embout plusieurs fois de suite. Les tubes suivants sont préparés selon le principe de dilution en série, en prélevant 500µL de la solution précédente et en la transférant dans le tube où est inscrit le numéro suivant et en homogénéisant bien à chaque fois.

Le complexe traceur corticostérone-AChE et l'anti-sérum sont reconstitués en ajoutant pour chaque 30mL du milieu tampon fourni. Ils peuvent être stockés à 4°C et conservés quatre semaines.

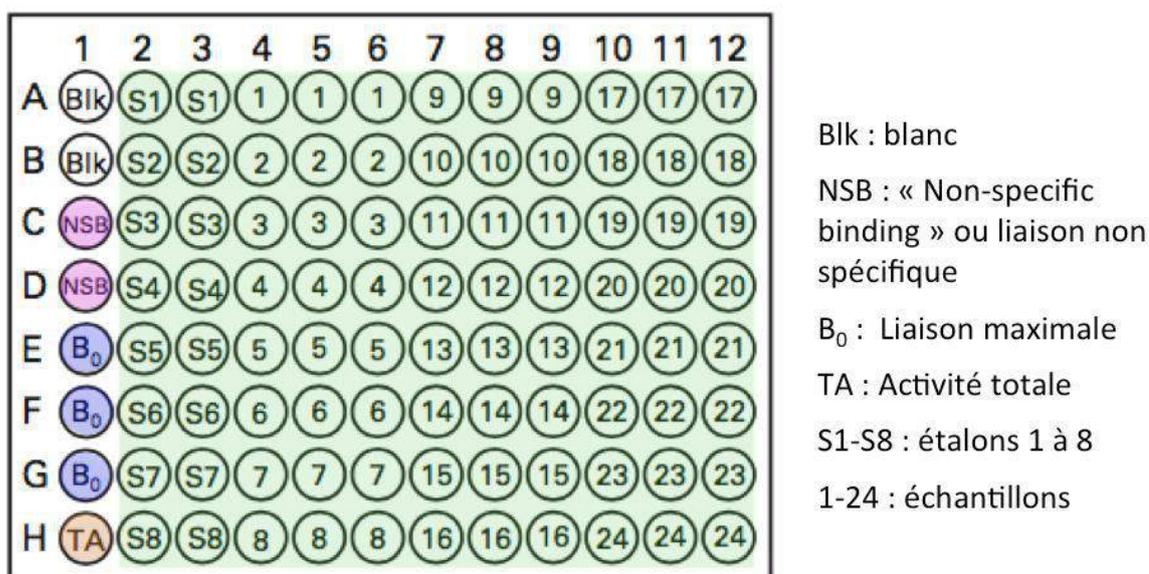
La plaque ELISA à 96 puits est mise en place en respectant la configuration illustrée par la Figure 2.11. L'emplacement de chaque échantillon est préalablement identifié sur un document dédié. Les embouts de pipettes sont changés entre chaque réactif, et avant le pipetage, les embouts sont équilibrés en remplissant lentement puis en vidant le contenu de l'embout plusieurs fois.

100µL et 50µL du milieu tampon ELISA sont respectivement ajoutés dans les puits notés « NSB » et « B<sub>0</sub> ».

50µL des tubes étalons numérotés sont ajoutés dans chacun des puits au numéro correspondant, en commençant par les puits S8 et en allant décroissant jusqu'aux puits S1. Le même embout de pipette est utilisé pendant tout le processus de mise en place des puits étalons, cet embout étant rééquilibré entre chaque numéro étalon.

Les puits correspondant aux échantillons sont remplis avec 50µL de l'échantillon correspondant. Il y a donc trois puits par échantillon.

50µL du traceur sont ensuite ajoutés à tous les puits sauf ceux intitulés « TA » et « Blk ». 50µL d'antisérum sont ajoutés dans tous les puits sauf ceux nommés « TA », « NSB » et « Blk ».



**Figure 2.11 Organisation de la plaque ELISA** (basée sur les illustrations et description de *Cayman Chemical Company*, 2016).

Le Tableau II.IV ci-dessous récapitule le contenu de chaque puits.

**Tableau II.IV Contenu des puits de la plaque ELISA** (basée sur les illustrations et description de *Cayman Chemical Company*, 2016).

Puits	Tampon ELISA	Étalon / Échantillon	Traceur	Anti-sérum
Blk	-	-	-	-
TA	-	-	5µL (le lendemain lors du développement)	-
NSB	100µL	-	50µL	-
B <sub>0</sub>	50µL	-	50µL	50µL
Étalon / Échantillon	-	50µL	50µL	50µL

La plaque est ensuite recouverte d'un film plastique et mise à l'incubation à 4°C pour la nuit.

Le lendemain, le réactif d'Ellman est préparé et utilisé le jour même, car ce réactif est très instable. 50mL d'eau ultra-pure sont ajoutés à une bouteille vide et propre. 2 à 3mL de cette eau sont prélevés à l'aide d'une pipette et ajoutés au flacon contenant le réactif d'Ellman fourni avec le kit ELISA et le contenu est mélangé jusqu'à complète dissolution. La solution obtenue est transférée dans la bouteille d'eau ultra-pure, qui est stockée à l'abri de la lumière.

Une solution de rinçage est préparée en ajoutant, à l'aide d'une seringue d'1mL, 0,5mL de Polysorbate 20 (solution visqueuse), ainsi que 2,5mL du milieu tampon de rinçage fourni à l'aide d'une pipette, à 1L d'eau ultra-pure.

Le film plastique couvrant la plaque est retiré. Les puits de la plaque sont vidés, puis rincés avec la solution de rinçage dans un laveur de microplaques. 200µL du réactif d'Ellman reconstitué sont ajoutés dans chacun des puits de la plaque. 5µL de traceur sont ajoutés dans le puits « TA ».

Un nouveau film plastique est ajouté pour couvrir la plaque et la plaque est placée dans un agitateur orbital pendant 90 minutes à l'abri de la lumière.

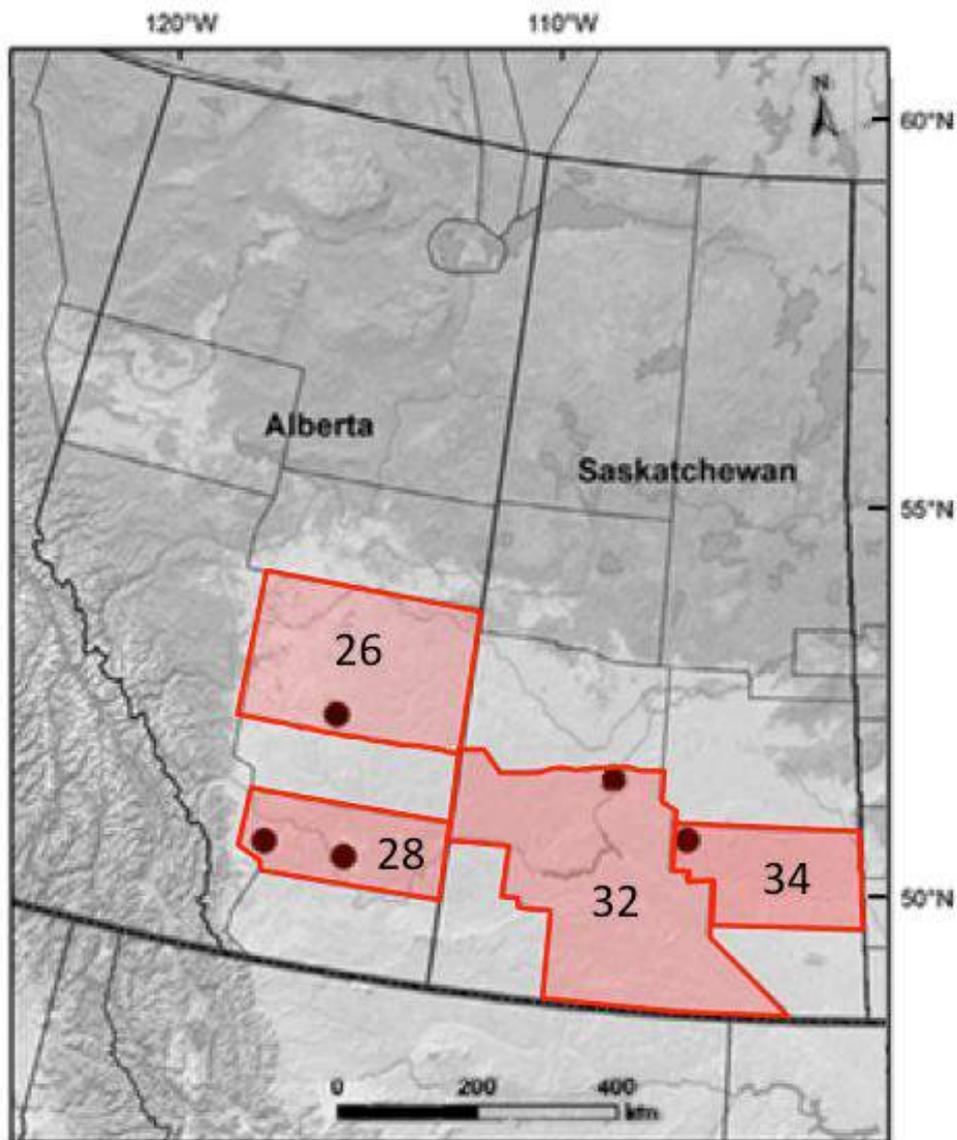
À la fin des 90 minutes, la plaque est transférée vers le lecteur de plaque, en prenant garde à maintenir la plaque à l'abri de la lumière. Le film plastique protégeant la plaque est délicatement retiré et la plaque est placée dans le lecteur. La plaque est lue à la longueur d'onde de 412nm, et un logiciel d'analyse OMEGA exporte directement les résultats, après calcul des différentes concentrations sous format tableur. La corticostérone étant déposée lors de la croissance des plumes selon un motif temps-dépendant (Bortolotti *et al.*, 2009), les valeurs de CORTf sont exprimées en fonction de la « longueur de l'échantillon » en pg/mm.

#### **e) Densité de population et des étendues d'eau**

Les données annuelles sur les densités de population de canards de surface et de Sarcelles à ailes bleues, ainsi que sur la densité d'étendues d'eau propice à la reproduction des canards de surface, sont issues du programme d'enquête et surveillance des populations et habitats des canards de surface (« *Waterfowl Breeding Population and Habitat Survey Traditional* »). Les données issues de cette enquête sont collectées chaque année au printemps dans les prairies du centre-nord des États-Unis et du centre du Canada, subdivisées en territoires déterminés selon les différences d'habitats et les frontières administratives. Les canards sont comptés par deux personnes depuis les airs à environ 50m du sol dans un avion qui effectue des transects de 400m de large et environ 29km de longueur. Les individus isolés ne sont pas pris en compte par les observateurs. Les étendues d'eau sont comptées seulement par l'observateur qui ne pilote pas l'avion. De plus, une équipe au sol effectue des relevés sur un échantillon des segments aériens étudiés, afin d'ajuster les dénombrements aériens d'un facteur de correction permettant de tenir compte des oiseaux qui ne seraient pas observés depuis les airs. Le nombre total d'oiseaux de chaque territoire est alors estimé

par le produit de la densité observée par l'équipe dans les airs, du facteur de correction de visibilité et de l'aire du territoire étudié (*Waterfowl Breeding Population and Habitat Survey - Traditional Survey, 2015*).

Les territoires d'intérêt pour l'étude sont les zones 26, 28, 32 et 34 (Figure 2.12).



**Figure 2.12 Territoires dont sont issus les données de densité de population et les densités en étendues d'eau peu profondes de l'étude** (basée sur les illustrations de Nallar *et al.*, 2016 et *Waterfowl Breeding Population and Habitat Survey - Traditional Survey, 2015*). Les territoires d'intérêt sont représentés en rouge et les sites de prélèvement correspondent aux points noirs.

Jusqu'à 2015, les données sont extraites depuis le site internet « *Migratory Bird Data Center* » tenu par USFWS avec leur aimable autorisation (*Waterfowl Breeding Population and Habitat Survey - Traditional Survey*, 2015). Après 2015, les données ont été généreusement fournies par Emily Silverman d'USFWS. Les données utilisées dans le cadre de l'étude sont la densité de canards de surface, la densité de Sarcelles à ailes bleues, le pourcentage de Sarcelles à ailes bleues, et la densité en étendues d'eau pour les territoires considérés.

Les relevés de l'enquête se font au printemps pour se calquer sur le Canard mallard (*Anas platyrhynchos*), qui est une espèce arrivant précocement sur les aires de reproduction constituées par les prairies canadiennes. Il pourrait y avoir une sous-estimation des densités de Sarcelles à ailes bleues, qui arrivent généralement un peu plus tardivement dans les prairies. Les densités de population relevées sont ainsi utilisées comme approximation des densités qui seraient observées en août lors du prélèvement, en présupposant une corrélation positive entre les densités de printemps et celles d'août. Cette hypothèse repose notamment sur la corrélation positive entre le nombre de zones humides et le nombre de canards au début de la saison de reproduction, comme présenté dans la partie I.D.1 (Johnson *et al.*, 2005), et sur l'observation d'un succès reproducteur généralement plus élevé les années où la population et les étendues d'eau peu profondes sont abondantes (Howerter *et al.*, 2014).

Pour s'affranchir de l'effet de l'abondance de zones humides sur la densité de Sarcelles à ailes bleues, les résidus de la régression linéaire de la densité de Sarcelles à ailes bleues en fonction de la densité en étendues d'eau peu profondes sont calculés et rassemblés dans une nouvelle variable « resBWTE\_Density ». En tant que mesure alternative de la densité de population de Sarcelles à ailes bleues non expliquée par l'abondance en zones humides, cette variable pourra par la suite être combinée à la densité en étendues d'eau peu profondes « Pond\_Density » et la variable « Province » dans des modèles.

#### **f) Données climatiques**

Les données climatiques sont issues des données récoltées par les stations météorologiques les plus proches des lieux de prélèvements et qui n'avaient pas plus de 3 jours de données manquantes sur le mois d'intérêt. Les stations retenues pour cette étude sont résumées dans le Tableau II.V ci-dessous et localisées sur la carte en Annexe 2 (*Environment and Climate Change Canada and Government of Canada*, 2019).

**Tableau II.V Stations météorologiques dont sont issues les données climatiques de l'étude.**

Nom de la station météorologique	Numéro d'identification Canadien / <i>international</i>	Latitude	Longitude	Altitude
<i>Brooks</i>	3030QLP / 71457	50.555500	-111.849000	747m
<i>Champion AGDM</i>	3031480 / 71217	50.281945	-113.350278	1006m
<i>Last Mountain CS</i>	4014156 / 71556	51.415200	-105.243100	495m
<i>Saskatoon RCS</i>	4057165 / 71496	52.173600	-106.718900	506m
<i>Stettler AGDM</i>	3016124 / 71289	52.346944	-112.595556	795m

Afin de pouvoir estimer le risque d'infection par les hémospories des Sarcelles à ailes bleues, différentes données climatiques ont été collectées.

Ce risque d'infection est en grande partie lié à l'activité des vecteurs ainsi qu'à leur distribution spatio-temporelle et leur abondance. Ainsi, le risque de transmission d'hémospories par les vecteurs arthropodes peut être en partie prédit en s'intéressant aux données climatiques influençant l'activité de vol, à savoir des températures journalières comprises entre 10 et 35°C et des vitesses de vent inférieures à 9km/h (Elbers *et al.*, 2015 ; Mullen, 2019).

L'abondance en vecteurs, qui conditionne également la transmission, est aussi influencée par les conditions météorologiques. Des températures élevées et des précipitations élevées au printemps constitueraient par exemple un scénario optimal pour une forte abondance de moustiques durant la saison de reproduction des sarcelles la même année (Forest-Bérard *et al.*, 2019).

Pour approcher l'abondance en population de vecteurs par année, différents paramètres climatiques peuvent donc être collectés ou calculés.

En tant que mesure de l'accumulation de chaleur, les degrés-jours permettent d'estimer la durée de développement biologique en fonction de la température. Leur valeur est donnée par la formule ci-dessous :

$$DJ = \begin{cases} 0^{\circ}\text{C} & \text{si } T_{\text{moy}} < T_{\text{base}} \\ T_{\text{moy}} - T_{\text{base}} & \text{si } T_{\text{moy}} \geq T_{\text{base}} \end{cases}$$

où  $T_{\text{moy}}$  correspond à la température moyenne du jour considéré ;  
et  $T_{\text{base}}$  correspond à la température en-dessous de laquelle le développement de l'espèce de vecteur est limité ou nul.

Le seuil de température à partir duquel le développement est possible est spécifique du vecteur considéré. Par exemple, ce seuil est estimé à 9°C pour le genre *Culex* (Wang *et al.*, 2011). Le nombre d'espèces d'arthropodes vecteurs pouvant transmettre des hémospories est important et les données concernant la valeur seuil de développement sont manquantes pour un grand nombre d'espèces. Dans notre étude, la température de base a été fixée à 5°C, température en-dessous de laquelle le développement serait limité ou nul pour la majorité des espèces de vecteur d'intérêt (Lysyk, 2010 ; Mullen, 2019 ; Wittmann and Baylis, 2000). En sommant les valeurs de degrés-jours obtenues, les variables de degré-jour cumulatif ont été obtenues (Forest-Bérard *et al.*, 2019). Ainsi, le degré-jour cumulatif du 1<sup>er</sup> janvier de l'année à la date de prélèvement « DJC1J », et du 1<sup>er</sup> mai (début de la saison des vecteurs) à la date du prélèvement « DJC1M » ont été calculés. Les niveaux de précipitation cumulés sont également calculés pour ces deux périodes.

Le rapport niveaux de précipitation cumulés sur degré-jour cumulatif est calculé en tant qu'index pour estimer la disponibilité en eau (Helbing *et al.*, 2015), à la fois pour les vecteurs mais aussi pour les sarcelles, en complément des densités en étendues d'eau peu profondes.

Les Sarcelles à ailes bleues arrivent assez tardivement sur les aires de reproduction, avec une arrivée s'étalant généralement à partir de mi-mai dans les prairies canadiennes (Rohwer *et al.*, 2002). Pour étudier l'impact de certains facteurs climatiques sur les Sarcelles à ailes bleues, les moyennes des températures journalières (minimales, maximales, moyennes), ainsi que les moyennes des précipitations totales journalières et la vitesse moyenne du vent par heure, ont été calculées du 17 mai au jour du prélèvement, ce qui correspond à la période estimée de présence des sarcelles sur les aires de reproduction. Ces paramètres permettent également d'estimer en partie l'activité de vol des vecteurs lors de cette période où les sarcelles sont présentes. Ces valeurs ont aussi été calculées pour les mois de juin et juillet.

La méthode de collecte et les données obtenues pour chaque individu de l'étude sont résumées sur la Figure 2.13.

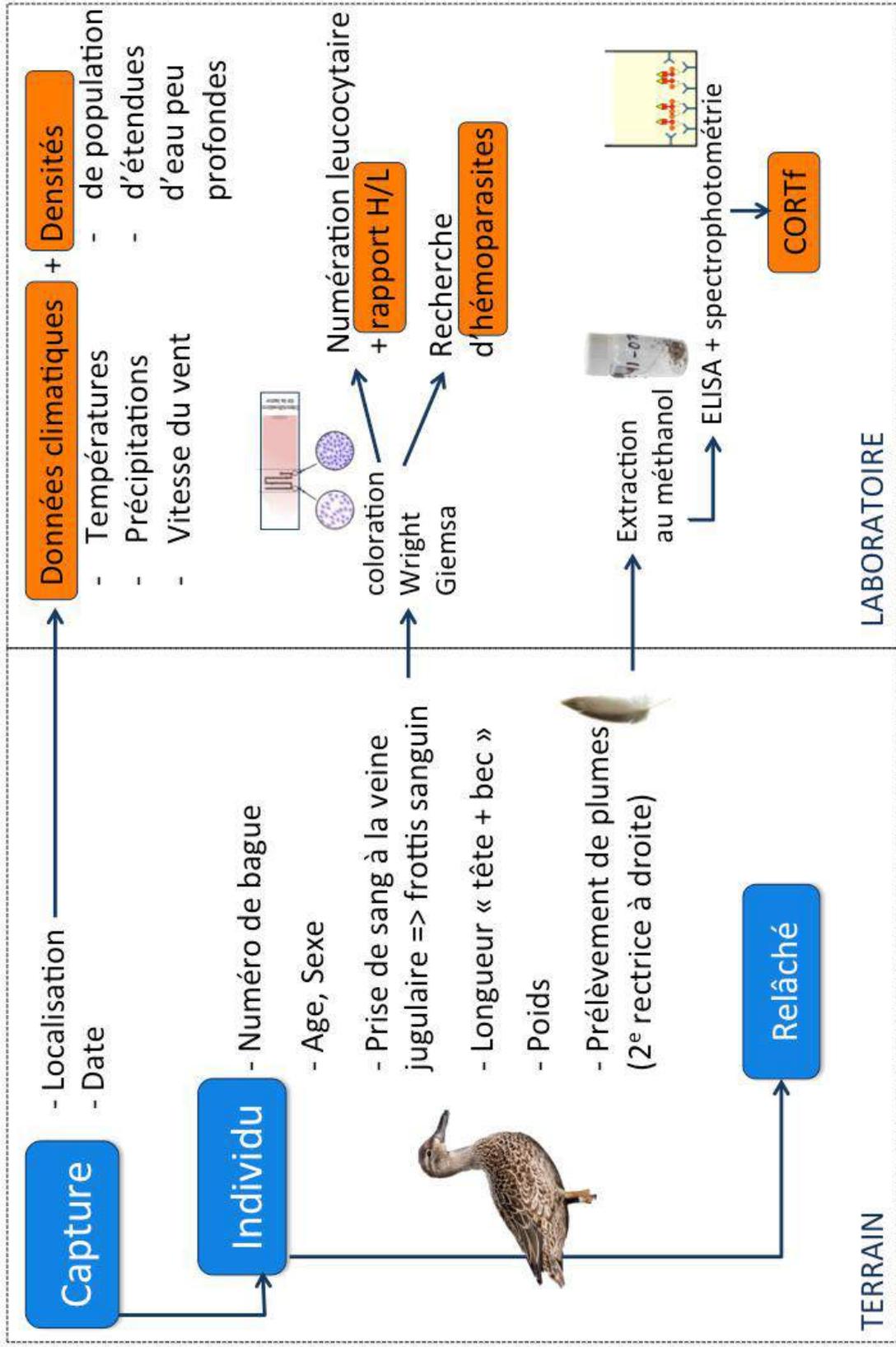


Figure 2.13 Méthode de collecte des données géographiques, démographiques, cliniques, étiologiques et climatiques pour chaque sarcelle d'intérêt pour l'étude.

#### 4. Analyse des données : outils statistiques

L'ensemble des données géographiques, démographiques, cliniques, étiologiques et climatiques sont rassemblées dans un tableau Excel ®, constituant la base de données initiale pour cette étude et l'étude similaire menée sur l'influence du virus de l'Influenza aviaire. Un échantillonnage stratifié, par année et par province, des sarcelles prélevées est réalisé, avec pour chaque année et province réalisation d'un échantillonnage aléatoire simple. Un total de 25 individus par année et par province est ainsi pré-sélectionné et leurs frottis sanguins sont envoyés au laboratoire pour coloration. Les 25 individus sont ensuite aléatoirement classés. Enfin, les frottis sanguins colorés sont examinés chez 15 individus de ce sous-échantillon par année et par province. Dans le cas d'un individu dont les deux frottis seraient illisibles, du fait d'une coloration de qualité insuffisante ou de l'absence de monocouche, les frottis sanguins de l'individu à la 16<sup>e</sup> position dans la liste des 25 individus sont examinés, et ainsi de suite.

Un deuxième fichier de données est créé contenant seulement l'échantillon de sarcelles pour lesquelles les frottis sanguins colorés ont été examinés pour recherche d'hémoparasites.

Un indice d'état corporel est calculé selon la méthode proposée par Peig et Green (Peig and Green, 2009), en se basant sur le poids en grammes des individus, et une mesure linéaire réalisée sur l'individu, à savoir la longueur « tête-bec » dans l'étude. Dans un premier temps, le nuage de points illustrant le poids en fonction de la longueur « tête-bec » est représenté pour exclure les points aberrants, très éloignés des autres points du nuage. Après transformation logarithmique des données de poids et de longueur, une régression par axe majeur standardisé (*standardised major axis, SMA*) est réalisée pour obtenir la pente de la régression «  $b_{SMA}$  » (Figure 2.14). Puis, pour chaque individu de l'étude, l'indice de condition corporelle (BCI) est calculé selon la formule suivante :

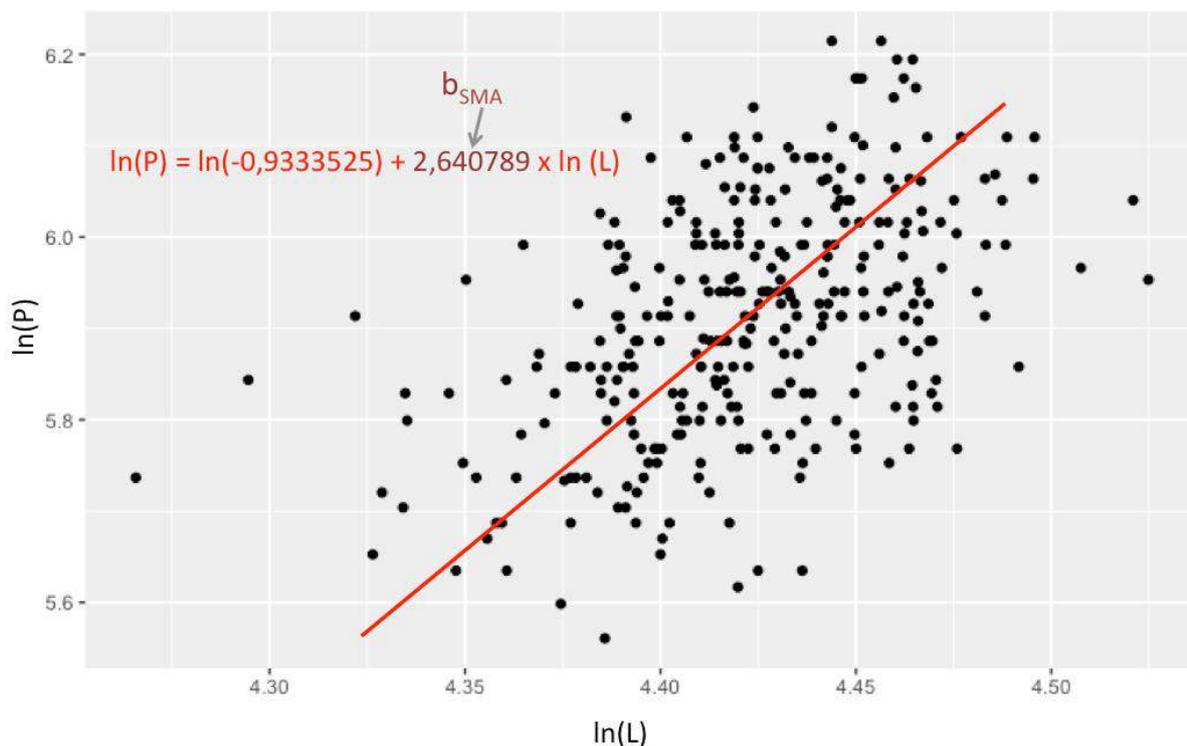
$$BCI_i = P_i \left( \frac{L_0}{L_i} \right)^{b_{SMA}}$$

où  $P_i$  et  $L_i$  correspondent au poids et à la longueur « tête-bec » de l'individu  $i$  ;

$L_0$  est la moyenne arithmétique de la longueur « tête-bec » de l'échantillon ;

$b_{SMA}$  est la pente de la régression SMA

Pour l'échantillon,  $L_0$  est de 83,36mm. L'indice de condition corporelle  $BCI_i$  représente donc la masse corporelle prédite pour la sarcelle  $i$  quand la longueur « tête-bec » est normalisée, c'est-à-dire lorsque  $L=L_0$ , permettant ainsi d'obtenir une estimation des réserves d'énergie corporelle accumulées et de l'état corporel des Sarcelles à ailes bleues de l'étude.



**Figure 2.14** Obtention du  $b_{SMA}$  d'après la méthode décrite par Peig and Green, 2009. Après exclusion des points aberrants et après transformation logarithmique des données, le nuage de points illustrant la corrélation entre le poids et la longueur « tête-bec » est représenté. La pente de la droite de régression par méthode SMA (*standardised major axis*) correspond à l'exposant «  $b_{SMA}$  » dans la formule permettant de calculer l'indice de condition corporelle.

Les variables d'intérêt pour l'étude sont mises en forme afin d'être rendues exploitables par le logiciel R.Studio ® (version 1.2.5033) (RStudio Team, 2020). Les variables d'intérêt sont listées dans le Tableau II.VI.

Les graphes de l'étude sont construits à l'aide du package R « ggplot2 » (Wickham, 2016).

**Tableau II.VI** Liste des variables à expliquer et explicatives utilisées dans les modèles examinant les facteurs de risque impliqués dans le portage des hémospories aviaires chez la Sarcelle à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2007 à 2017

Variable	Type	Définition	Description
Infection par <i>Plasmodium</i> (« PLASsm »)	Qualitative, variable à expliquer	Un résultat positif, basé sur la lecture du frottis sanguin coloré, suggère une infection.	Résultat binaire : 1 = positif, ou 0 = négatif
Infection par <i>Haemoproteus</i> (« HAEMsm »)	Qualitative, variable à expliquer	Un résultat positif, basé sur la lecture du frottis sanguin coloré, suggère une infection.	Résultat binaire : 1 = positif, ou 0 = négatif
Infection par <i>Leucocytozoon</i> (« LEUKsm »)	Qualitative, variable à expliquer	Un résultat positif, basé sur la lecture du frottis sanguin coloré, suggère une infection.	Résultat binaire : 1 = positif, ou 0 = négatif

Infection par au moins un genre d'hémosporidies (« Haematozoa »)	Qualitative, variable à expliquer	Un résultat positif, basé sur la lecture du frottis sanguin coloré, suggère une infection par <i>Plasmodium</i> , et/ou <i>Haemoproteus</i> et/ou <i>Leucocytozoon</i> .	Résultat binaire : 1 = positif, ou 0 = négatif
Diversité parasitaire (« ParDiv »)	Qualitative, variable explicative	Nombre de genres d'hémostoparasites rencontrés lors de la lecture du frottis sanguin coloré. Les genres rencontrés peuvent être un des genres d'hémosporidies, ou <i>Aegyptianella</i> , ou un genre de microfilaire.	Résultat ordonné : 0 = absence, 1 = un genre, 2 = deux genres
Parasitémie (« Parasitemia »)	Qualitative, variable explicative	Estimation semi-quantitative de la quantité de parasite, basé sur le nombre d'éléments parasitaires par champ au grossissement x400 lors de la lecture du frottis sanguin coloré (Campbell, 2015). Les éléments parasitaires rencontrés peuvent être un des genres d'hémosporidies, ou <i>Aegyptianella</i> , ou <i>Microfilaria</i> .	Résultat ordonné : 0 = absence, 1 = faible (moins d'1 parasite par champ), 2 = modérée (1 à 5 parasites par champ), 3 = élevée (plus de 5 parasites par champ)
Sexe (« Sex »)	Qualitative, variable explicative	Sexe de l'oiseau	Femelle (« F ») ou mâle (« M »)
Âge (« Age »)	Qualitative, variable explicative	Âge de l'oiseau lors de la capture	Juvenile (<1an, Hatch Year ou « HY ») ou adulte (>1 an, After Hatch Year ou « AHY »)
Longueur « tête-bec »	Continue, variable explicative	Longueur mesurée de l'os occipital à l'extrémité du bec avec un calibre à coulisse	Millimètres
Indice de condition corporelle (« BCIndex »)	Continue, variable explicative	Masse corporelle prédite à partir du poids et après normalisation de la longueur « tête-bec »	Grammes
Année (« Year »)	Qualitative, variable explicative	Année de prélèvement	2007 à 2017
Rapport H/L (« H.L »)	Continue, variable à expliquer et explicative	Valeur du rapport hétérophiles/lymphocytes, basé sur la lecture du frottis sanguin coloré	

Corticostérone dans les plumes (« CORTf »)	Continue, variable à explicative	Niveau de corticostérone mesuré dans la 2e rectrice à droite, suite à un processus d'extraction au méthanol et une mesure par une méthode ELISA associée à de la spectrophotométrie	
Densité de population (« Pop_Density »)	Continue, variable explicative	Nombre estimé de canards de surface par km <sup>2</sup> pour chaque stratum étudié pendant la saison de reproduction au printemps - Données issues de <i>Waterfowl Breeding Population and Habitat Survey</i>	Nombre total de canards de surface / km <sup>2</sup>
Densité de Sarcelles à ailes bleues (« BWTE_Density »)	Continue, variable explicative	Nombre estimé de canards de surface par km <sup>2</sup> pour chaque stratum étudié pendant la saison de reproduction au printemps - Données issues de <i>Waterfowl Breeding Population and Habitat Survey</i>	Nombre total de Sarcelles à ailes bleues / km <sup>2</sup>
Résidus de la densité de Sarcelles à ailes bleues (« resBWTE_Density »)	Continue, variable explicative	Résidus de la densité de Sarcelles à ailes bleues calculés à partir de sa régression linéaire sur les densités en étendues d'eau peu profondes	Nombre résiduel de Sarcelles à ailes / km <sup>2</sup>
Pourcentage de Sarcelles à ailes bleues (« Percent_BWTE »)	Continue, variable explicative	Pourcentage de Sarcelles à ailes bleues dans la population nicheuse de canards, calculé à partir des densités estimées pour chaque espèce de canards barboteurs - Données issues de <i>Waterfowl Breeding Population and Habitat Survey</i>	0-100%
Densité en étendues d'eau peu profondes (« Pond_Density »)	Continue, variable explicative	Nombre estimé de plans d'eau par km <sup>2</sup> de transects au sein de chaque stratum étudié pendant la saison de reproduction au printemps - Données issues de <i>Waterfowl Breeding Population and Habitat Survey</i>	Nombre d'étendues d'eau / km <sup>2</sup>
Moyenne des températures journalières (maximale, minimale, moyenne) : - en juin - en juillet - du 17 mai au jour de prélèvement	Continue, variable explicative	Données issues des données climatiques nationales archivées d'ECCC ( <i>National Climate Data and Information Archive</i> NCDIA) pour la station météorologique la plus proche de chaque lieu de prélèvement avec des données totalement ou quasiment complètes (moins de 3 données manquantes par mois)	degrés Celsius (°C)

Moyenne des précipitations totales journalières : - en juin - en juillet - du 17 mai au jour de prélèvement	Continue, variable explicative	Données issues de NCDIA	Millimètres d'eau
Degré jour cumulatif (DJC) - « DJC1J » : du 1 <sup>er</sup> janvier au jour de prélèvement - « DJC1M » : du 1 <sup>er</sup> mai au jour de prélèvement	Continue, variable explicative	Somme des degrés jours, qui correspondent à la différence entre la température moyenne journalière et la température de référence choisie, ici 5°C, en dessous de laquelle le développement d'une majorité des espèces de vecteurs est nul ou ralenti	degrés Celsius (°C)
Précipitations cumulées : - « TPC1J » : du 1 <sup>er</sup> janvier au jour de prélèvement - « TPC1M » : du 1 <sup>er</sup> mai au jour de prélèvement	Continue, variable explicative	Somme des précipitations observées à la station météorologique la plus proche de chaque lieu de prélèvement avec des données totalement ou quasiment complètes (moins de 3 données manquantes par mois) – données issues de NCDIA	Millimètres d'eau
Rapport précipitations cumulées sur degré-jour cumulatif : - «TPC1J/DJC1J» : du 1 <sup>er</sup> janvier au jour de prélèvement - «TPC1M/DJC1M» : du 1 <sup>er</sup> mai au jour de prélèvement	Continue, variable explicative	Rapport de la somme des précipitations sur la somme des degrés-jours – données calculées à partir de NCDIA	Millimètres d'eau / degrés Celsius (°C)
Vitesse moyenne du vent par heure : - en juin - en juillet - du 17 mai au jour de prélèvement	Continue, variable explicative	Vitesse moyenne des masses d'air observée par heure à 10 mètres au-dessus du sol – Données issues de NCDIA	Km/h

Comme décrit précédemment, la réponse des vecteurs aux conditions climatiques peut varier selon le genre voire l'espèce de vecteur (Helbing *et al.*, 2015 ; Lysyk, 2010). Par exemple, dans l'étude menée par Helbing et son équipe, *Culex pipiens* présentait une association positive avec les degrés-jours, alors que la relation était négative pour *Culex restuans* (Helbing *et al.*, 2015). Ainsi, les variables climatiques construites pour étudier un potentiel lien avec les populations de vecteurs (« DJC1J », « DJC1M », TPC1J », « TPC1M », « TPC1J /DJC1J », « TPC1M/DJC1M ») sont utilisées dans les modèles étudiant indépendamment les genres d'hémosporidies (*Haemoproteus* « HAEMsm », *Plasmodium* « PLASsm » ou *Leucocytozoon* « LEUKsm »), et non dans le modèle général (« Haematozoa »).

→ **Description du jeu de données et détermination des prévalences apparentes :**

À partir du deuxième fichier de données Excel ®, les caractéristiques démographiques et spatio-temporelles des Sarcelles à ailes bleues intégrées dans cette étude sont décrites.

Pour chaque hémosporidie, la prévalence apparente de portage est ensuite déterminée.

→ **Analyse des facteurs de risque potentiels impliqués dans le portage d'hémosporidies :**

Le fichier Excel ® est ensuite remodelé pour évaluer différents facteurs de risque impliqués dans le portage d'hémosporidies chez la Sarcelle à ailes bleues.

Ainsi, les individus ayant au moins une donnée manquante sont exclus de l'analyse statistique.

Pour obtenir des effectifs suffisants pour chaque modalité des variables d'intérêt, les individus prélevés à *Frank Lake*, ainsi que ceux prélevés en 2007 et 2011 sont également exclus. De même, la variable « Parasitemia », initialement subdivisée en 4 catégories, a été regroupée en 3 catégories dans une nouvelle variable « Parasitemia2 » : 0 = absence de parasites ; 1 = faible ; 2 = moyenne ou élevée.

Afin d'étudier les facteurs de risque potentiels dans l'infection par les hémosporidies, les variables à expliquer retenues sont les variables qualitatives binaires « HAEMsm », « PLASsm », « LEUKsm » et « Haematozoa », correspondant respectivement au portage d'*Haemoproteus*, de *Plasmodium*, de *Leucocytozoon*, et au portage d'au moins un des trois genres précédents (0 : absence de portage et 1 : portage).

La variable « CORTf », correspondant à la concentration en corticostérone de la deuxième rectrice, ainsi que « H.L » correspondant au rapport H/L, ont subi une transformation logarithmique afin de vérifier les hypothèses de linéarité, normalité et égale variance des résidus.

Les sites de prélèvement pouvaient différer selon l'année, car le choix de ces sites était lié à la présence d'un nombre suffisant de Sarcelles à ailes bleues lors des

rassemblements pré-migratoires. Cette présence pouvait être inconstante à certains sites en fonction de l'année. Ainsi, dans une première approche des données de portage d'hémosporidies, des modèles linéaires généralisés mixtes (package R « lme4 », Bates *et al.*, 2015) incluant la variable aléatoire correspondant au lieu de prélèvement (« Location ») ont été comparés avec des modèles de régression logistique intégrant les mêmes variables à effet fixe, mais excluant la variable à effet aléatoire. Les tests de rapport de vraisemblance (« *likelihood ratio test* », LRT) étaient fortement en faveur du non-apport aux modèles de l'inclusion de la variable « Location » comme effet aléatoire ( $p$ -values > 0,99). Dans la suite de l'analyse, des modèles de régression logistique ont donc été construits. La variable « Location » a été intégrée aux modèles comme variable à effet fixe, permettant d'évaluer l'impact du site de prélèvement sur la prévalence.

Le lien entre les variables à expliquer et les autres variables potentiellement facteurs déterminants, et présentées dans le Tableau 2.6, est étudié grâce à la construction des modèles de régression logistique multivariés. Ces modèles sont construits selon le schéma décrit ci-dessous.

Les modèles sont comparés sur la base de leur AICc (*corrected Akaike Information Criterion* ou Critère d'Information d'Akaike corrigé pour les échantillons de petite taille). Dans un premier temps, seuls des modèles simples n'incluant qu'une seule variable explicative sont construits. Les variables permettant d'améliorer le « modèle nul », avec donc un AICc diminué, sont retenues pour le modèle multivarié.

Afin de n'associer au sein d'un modèle que des variables faiblement redondantes, une analyse en composantes principales focalisées est mise en œuvre, permettant de traduire les interdépendances entre les variables pré-sélectionnées à l'étape précédente. Les variables fortement corrélées entre elles ne sont pas combinées au sein d'un même modèle.

Dans un troisième temps, les variables ainsi sélectionnées sont combinées en des modèles plus complexes, et ces modèles sont classés selon leur AICc. Si une variable explicative ajoutée à un modèle n'améliore pas ce dernier, c'est-à-dire si le delta AICc est inférieur à 1, elle n'est pas intégrée au modèle.

Le modèle avec le AICc le plus bas est considéré comme le modèle le mieux adapté au jeu de données.

Le modèle final est ensuite interprété à partir des *Odds ratio* (OR) et intervalles de confiance pour déterminer l'implication des facteurs de risque retenus. Chaque modalité est examinée et considérée comme facteur de risque lorsque l'intervalle de confiance ne contient pas la valeur 1, ou que la *p-value* est inférieure à 0,05.

→ **Analyse des facteurs de stress potentiels :**

Les valeurs de corticostérone dans les plumes et celles du rapport H/L ont été comparées entre les femelles et les mâles, les juvéniles et les adultes, et entre les individus porteurs d'hémosporidies et les non-porteurs, à l'aide d'un test de Student. Une *p-value* inférieure à 0,05 est considérée comme significative. Les résultats des tests de Student sont représentés par des diagrammes en boîte.

En procédant selon le même schéma décrit pour analyser les facteurs de risque impliqués dans le portage d'hémosporidies, des modèles de régression linéaire sont construits et comparés sur la base de leur AICc. Le modèle avec le plus faible AICc est retenu comme modèle final et est interprété à partir des OR et intervalles de confiance.

## C. Résultats

### 1. Description de l'échantillon

Les frottis sanguins colorés de 351 individus, choisis aléatoirement parmi les Sarcelles à ailes bleues capturées sur la période s'étendant de 2007 à 2017, ont été examinés pour rechercher la présence de parasites sanguins. La distribution de ces oiseaux, par lieu de capture, par sexe et par âge est décrite dans le Tableau II.VII ci-dessous.

**Tableau II.VII Répartition des effectifs des Sarcelles à ailes bleues intégrées à l'étude, selon le lieu de capture, le sexe et l'âge ; et proportions correspondantes dans l'échantillon final (n = 351)**

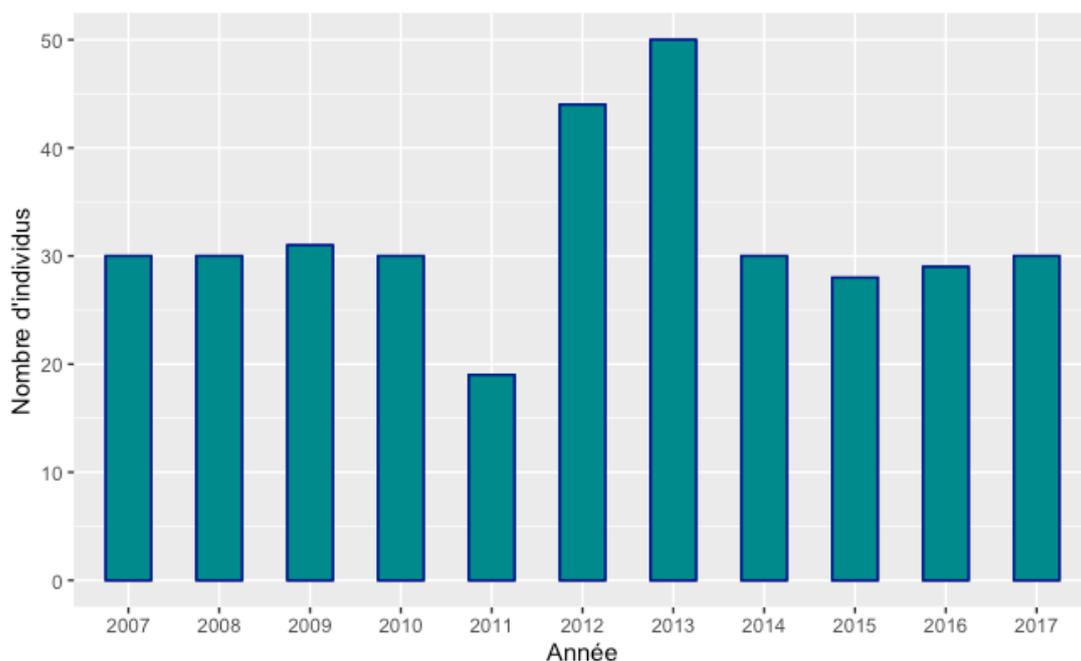
Province	Lieu de capture	Mâles (« M »)			Femelles (« F »)			Total
		HY	AHY	Total « M »	HY	AHY	Total « F »	
Saskatchewan (« SK »)	<i>Last Mountain Lake (LML)</i>	26	50	76	30	14	44	120 34,2%
	<i>Rice Lake</i>	12	25	37	12	11	23	60 17,1%
	Total « SK »	38	75	113	42	25	67	180 51,3%
Alberta (« AB »)	<i>Frank Lake</i>	3	9	12	1	2	3	15 4,3%
	<i>Brooks</i>	32	44	76	26	24	50	126 35,9%
	<i>Buffalo Lake</i>	0	24	24	0	6	6	30 8,5%
	Total « AB »	35	77	112	27	32	59	171 48,7%
Total		73	152	225	69	57	126	351
		20,8%	43,3%	64,1%	19,7%	16,2%	35,9%	

Les mâles sont représentés à 64,1%, contre 35,9% pour les femelles. Ces ordres de grandeur se retrouvent lorsqu'on considère toutes les Sarcelles à ailes bleues de la base de données initiale et qui ont été capturées sur la période 2007 à 2017 en Alberta et en Saskatchewan (n=4233), avec des proportions de mâles et de femelle respectives de 63% et 37%.

Les individus de l'étude sont majoritairement des adultes (« AHY », 59,5%), ce qui concorde sensiblement avec la proportion d'adultes capturés et recensés dans la base de données initiale (52%).

Les sarcelles incluses dans l'étude proviennent à 48,7% d'Alberta et à 51,3% de Saskatchewan. Les deux lieux de prélèvements les plus représentés sont « *Last Mountain Lake* » et « *Brooks* », qui correspondent à deux lieux de concentration pré-migratoire de Sarcelles à ailes bleues. 70,1% des oiseaux de l'étude sont issus de ces deux localisations. La distribution géographique des effectifs est illustrée sur la carte en Annexe 2.

Le nombre d'individus intégrés par année dans l'étude est compris entre 19 pour l'année 2011, et 50 en 2013 (Figure 2.15). La qualité insuffisante d'une partie des frottis sanguins colorés pour les années 2011, 2015 et 2016, n'a permis d'obtenir qu'un effectif de 19, 28 et 29 individus respectivement pour ces années. Pour les années 2009, 2012 et 2013, l'effectif annuel est supérieur à 30 individus, car une partie des frottis sanguins des 25 individus présélectionnés par année et province avaient été examinés dans le cadre d'un travail préalable de comparaison de sensibilité diagnostique entre la recherche d'hémosporidies par lecture de frottis sanguin et par PCR.



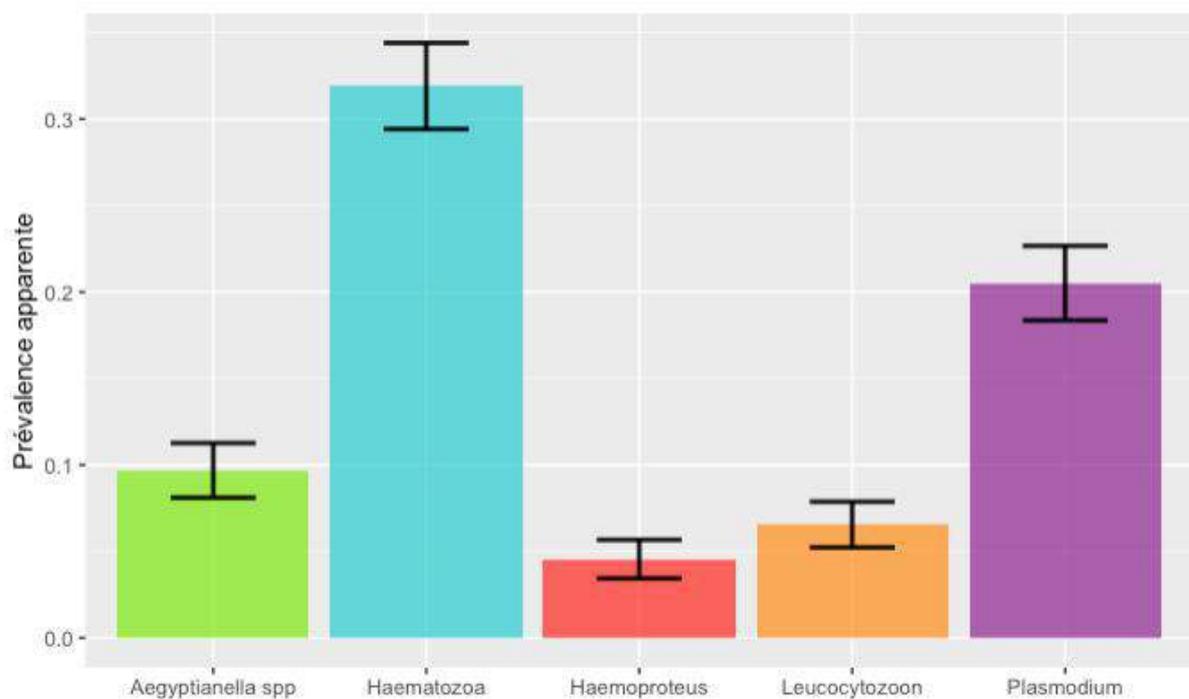
**Figure 2.15 Répartition annuelle des Sarcelles à ailes bleues incluses dans l'étude**

## 2. Détermination des prévalences apparentes de portage d'hémosporidies chez la Sarcelle à ailes bleues dans les prairies canadiennes de 2007 à 2017 (Objectif 1)

Les prévalences apparentes de portage pour les différents parasites sanguins rencontrés chez les sarcelles de l'étude sont présentées dans le Tableau II.VIII et sur la Figure 2.16. Les prévalences sont estimées à partir de la lecture des frottis sanguins des 351 individus de l'étude.

**Tableau II.VIII Prévalences apparentes de portage des parasites sanguins mis en évidence par lecture des frottis sanguins colorés des Sarcelles à ailes bleues de l'étude (n=351), dans les prairies canadiennes de 2007 à 2017**

<i>Aegyptianella</i> spp.	Au moins un genre d'hémosporidies	<i>Haemoproteus</i>	<i>Leucocytozoon</i>	<i>Plasmodium</i>	Inconnu
34/351 (9,7%)	112/351 (31,9%)	16/351 (4,6%)	23/351 (6,5%)	72/351 (20,5%)	8/351 (2,3%)



**Figure 2.16 Prévalence apparente des hémoparasites dans les prairies canadiennes, de 2007 à 2017, chez la Sarcelle à ailes bleues (n=351).** La prévalence observée est basée sur la lecture de frottis sanguins colorés à la coloration Wright Giemsa.

La prévalence apparente de portage d'hémosporidies dans l'échantillon de 351 Sarcelles à ailes bleues dans les prairies canadiennes est de 31,9% sur la période 2007-2017. Les parasites du genre *Haemoproteus*, *Leucocytozoon* et *Plasmodium* ont été détectés respectivement chez 16 (4,6%), 23 (6,5%) et 72 (20,5%) des 351 individus intégrés dans l'étude.

Des parasites du genre *Aegyptianella* ont été mis en évidence chez 34 (9,7%) sarcelles.

Des co-infections sont relevées chez 10 (2,8%) oiseaux, dont 4 avec une association *Leucocytozoon* et *Plasmodium*, 2 avec *Plasmodium* et *Haemoproteus*, 1 individu avec *Haemoproteus* et *Leucocytozoon*, et 3 avec une co-infection *Leucocytozoon* et *Aegyptianella*.

**Tableau II.IX Prévalences apparentes d'hémosporidies chez la Sarcelle à ailes bleues (*Anas discors*) dans les prairies canadiennes, de 2007 à 2017**

	n	% individus positifs à <i>Leucocytozoon</i> (95%IC)	% individus positifs à <i>Haemoproteus</i> (95%IC)	% individus positifs à <i>Plasmodium</i> (95%IC)	% individus positifs à au moins un des genres d'hémosporidies (95%IC)
<b>Global</b>	351	6,5 (4,19;9,68)	4,6 (2,62;7,30)	20,5 (16,41;25,13)	31,9 (27,06;37,07)
<b>Par Âge</b>					
HY	142	3,5 (1,15;8,03)	2,8 (0,77;7,06)	14,1 (8,82;20,92)	20,4 (14,12;28,00)
AHY	209	8,6 (5,18;13,27)	5,7 (3,00;9,82)	24,9 (19,17;31,32)	39,7 (33,02;46,70)
<b>Par Sexe</b>					
Femelle	126	3,2 (0,87;8,00)	3,2 (0,87;8,00)	15,9 (9,97;23,45)	19,8 (13,27;27,89)
Mâle	225	8,4 (5,16;12,88)	5,3 (2,78;9,14)	23,1 (17,76;29,18)	38,7 (32,26;45,37)
<b>Par année</b>					
2007	30	6,7 (0,81;22,08)	13,3 (3,75;30,73)	20,0 (7,71;38,57)	40,0 (22,65;59,40)
2008	30	16,7 (5,64 ;34,73)	0 (0;11,58)	33,3 (17,28;52,82)	50,0 (31,29;68,71)
2009	31	3,2 (0,08;16,71)	16,2 (5,45;33,73)	22,6 (9,59;41,10)	41,9 (24,54;60,93)
2010	30	6,7 (0,81;22,08)	10,0 (2,11;26,53)	30,0 (14,73;49,40)	46,7 (28,34;65,68)
2011	19	0 (0;17,65)	0 (0;17,65)	15,8 (3,38;39,58)	21,1 (6,05;45,57)
2012	44	13,6 (5,17;27,36)	0 (0;8,05)	25,0 (13,19;40,34)	31,8 (18,60;47,58)

2013	50	4,0 (0,48;13,72)	0 (0;7,12)	10,0 (3,32;21,82)	14,0 (5,81;26,74)
2014	30	0 (0;11,58)	6,7 (0,81;22,08)	23,3 (9,93;42,29)	33,3 (17,28;52,82)
2015	28	0 (0;12,35)	3,6 (0,09;18,35)	21,4 (8,29;40,96)	25,0 (10,69;44,88)
2016	29	6,9 (0,84;22,77)	3,4 (0,08;17,77)	13,8 (3,88;31,67)	27,6 (12,73;47,24)
2017	30	10 (2,11;26,53)	0 (0;11,58)	13,3 (3,75;30,73)	26,6 (12,27;45,89)
<b>Par Province</b>					
SK	180	6,7 (3,49;11,36)	3,9 (1,57;7,85)	18,3 (12,96;24,78)	28,3 (21,88;35,52)
AB	171	6,4 (3,25;11,22)	5,3 (2,43;9,76)	22,8 (16,74;29,84)	35,7 (28,50;43,35)
<b>Par lieu de capture</b>					
LML	120	5,8 (2,37;11,65)	5,8 (2,37;11,65)	19,2 (12,55;27,36)	31,7 (23,47;40,79)
Rice Lake	60	8,3 (2,76;18,39)	0 (0; 5,97)	16,7 (8,29;28,53)	21,7 (12,07;34,20)
Brooks	126	4,8 (1,76 ;10,08)	3,2 (0,87 ;7,93)	20,6 (13,94 ;28,76)	30,2 (22,30;38,98)
Frank Lake	15	6,7 (0,16;31,95)	13,3 (1,65;40,5)	26,7 (7,78;55,2)	53,3 (26,58;78,74)
Buffalo Lake	30	13,3 (3,75;30,73)	10,0 (2,11;26,53)	30 (14,73;49,40)	50,0 (31,29;68,71)

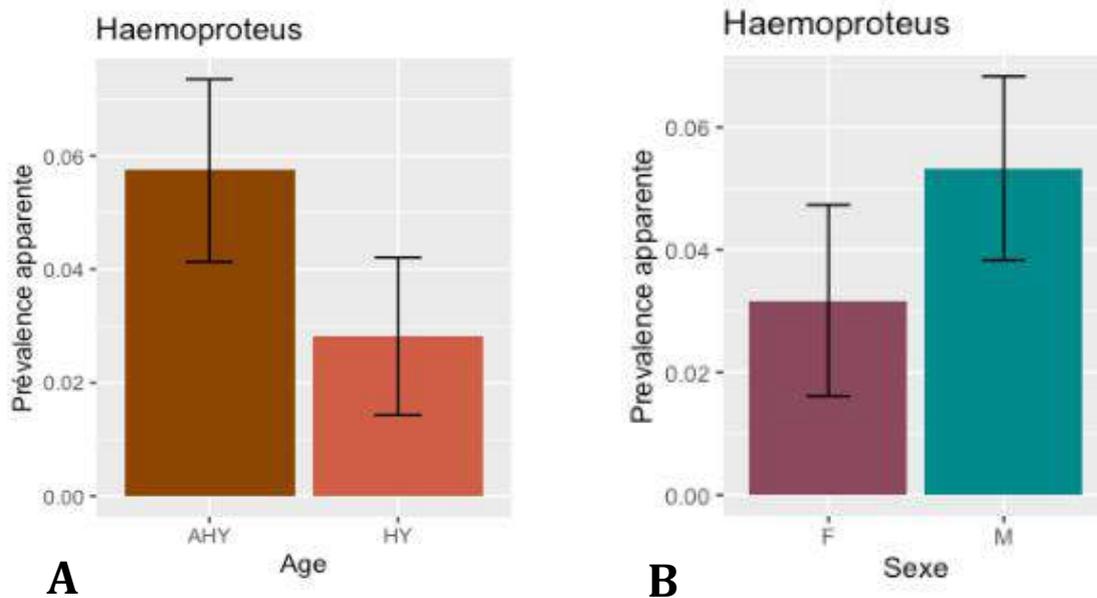
Abréviations : 95%IC = intervalle de confiance à 95%, HY = « hatch year » ou juvéniles, AHY = « after hatch year » ou adultes, SK = Saskatchewan, AB = Alberta, LML = « Last Mountain Lake »

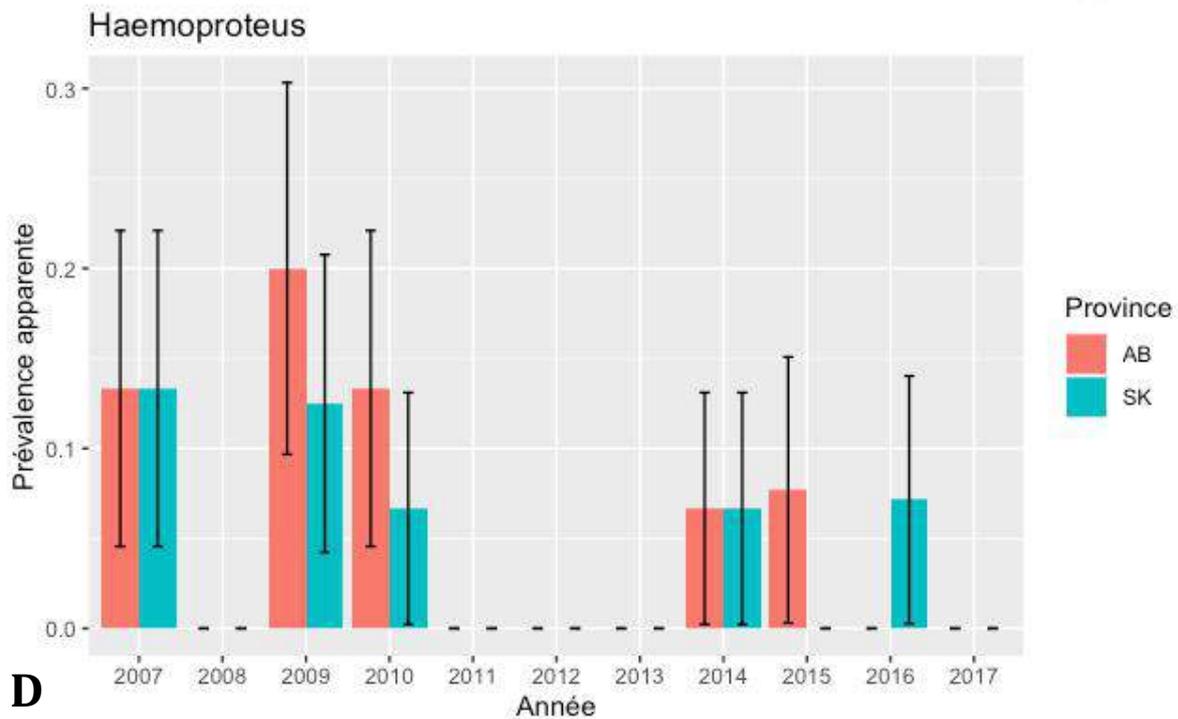
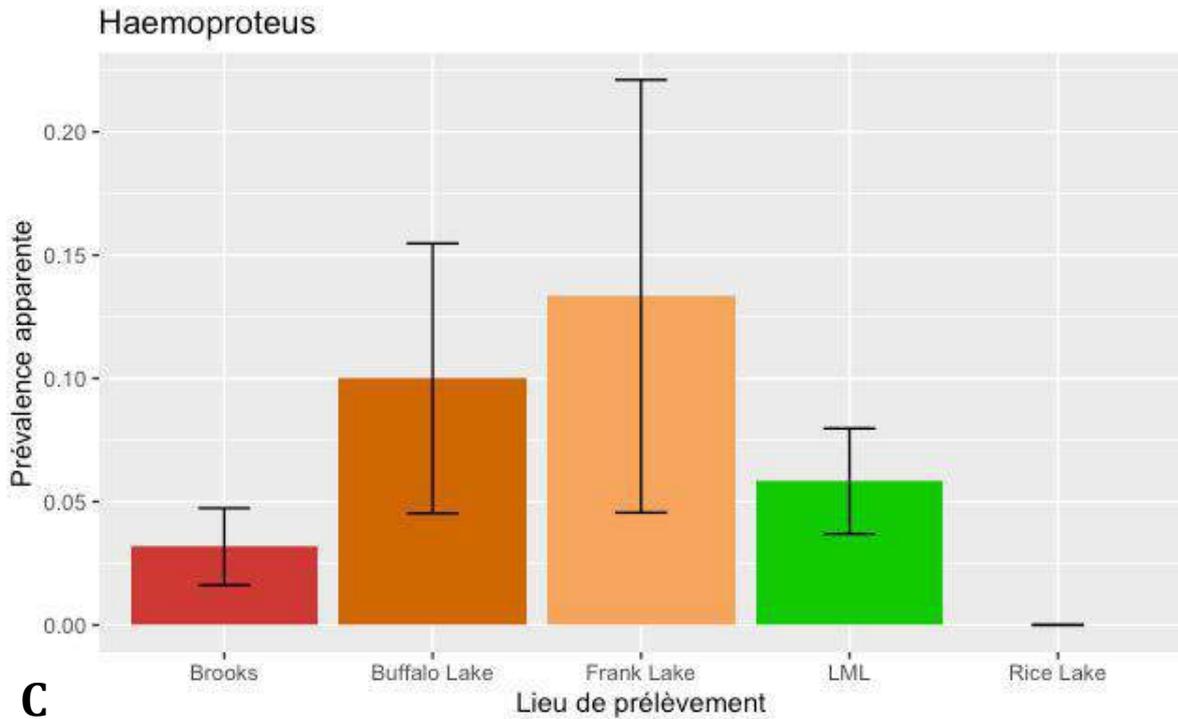
### a) Prévalence apparente de portage d'*Haemoproteus*

Parmi les 351 individus chez qui les frottis sanguins colorés ont été examinés, 16 étaient porteurs du genre *Haemoproteus*, soit une prévalence globale de portage observée de 4,6% (intervalle de confiance à 95%, 95%IC = [2,62 ; 7,30]), avec une prévalence de 3,9% (95%IC = [1,57 ; 7,85]) en Saskatchewan (n=180) et de 5,3% (95%IC = [2,43 ; 9,76]) en Alberta (n=171).

Des variations sont observées selon l'âge, le sexe, le lieu de prélèvement, l'année de prélèvement et la province, et sont présentées dans le Tableau II.IX et la Figure 2.17. Aucune différence significative de prévalence selon le sexe, selon l'âge ou encore selon la province n'est notée (test exact de Fisher :  $p\text{-value} > 0,05$ ).

Pour les années 2008, 2011, 2012, 2013 et 2017, ainsi que pour 2015 en Saskatchewan et 2016 en Alberta, aucun gamétocyte d'*Haemoproteus* n'a été mis en évidence lors de la lecture des frottis sanguins colorés. De même, aucun gamétocyte n'a été détecté après lecture des frottis des sarcelles prélevées à *Rice Lake*.





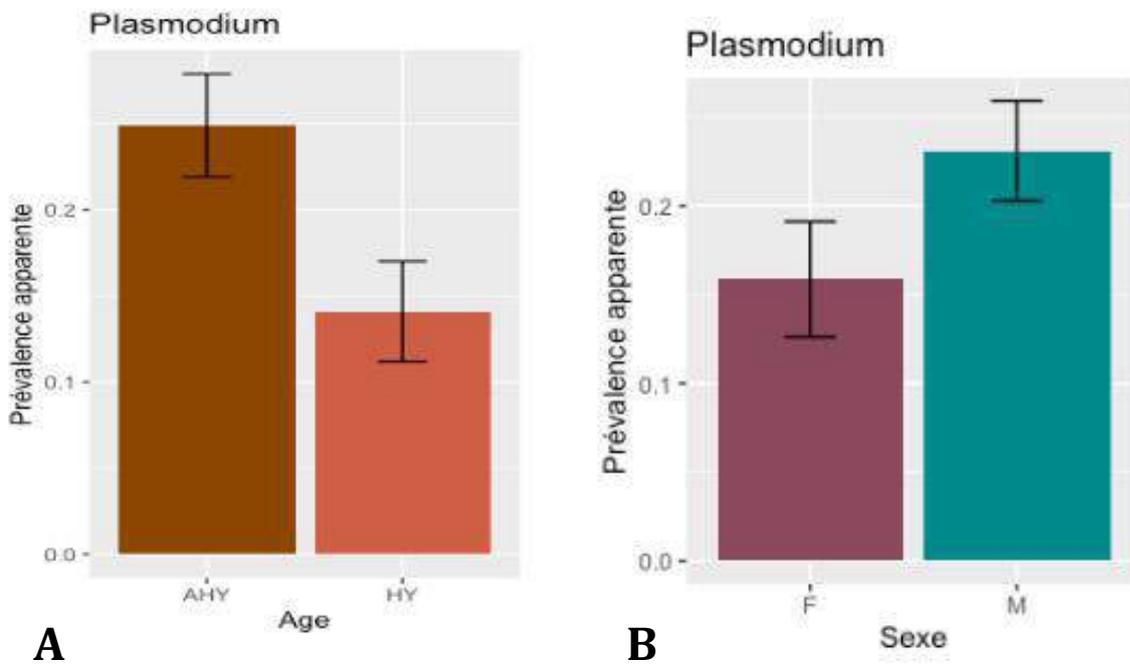
**Figure 2.17** Prévalences apparentes de portage d'*Haemoproteus* chez la Sarcelle à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2007 à 2017 (n=351). Les prévalences apparentes sont obtenues à partir de la lecture de frottis sanguins colorés à la coloration Wright Giemsa. (A) Prévalences apparentes en fonction de l'âge, adulte (AHY) ou juvénile (HY). (B) Prévalences apparentes en fonction du sexe, femelle (F) ou mâle (M). (C) Prévalences apparentes selon le lieu de prélèvement. (D) Prévalences apparentes en fonction de l'année de prélèvement et de la province.

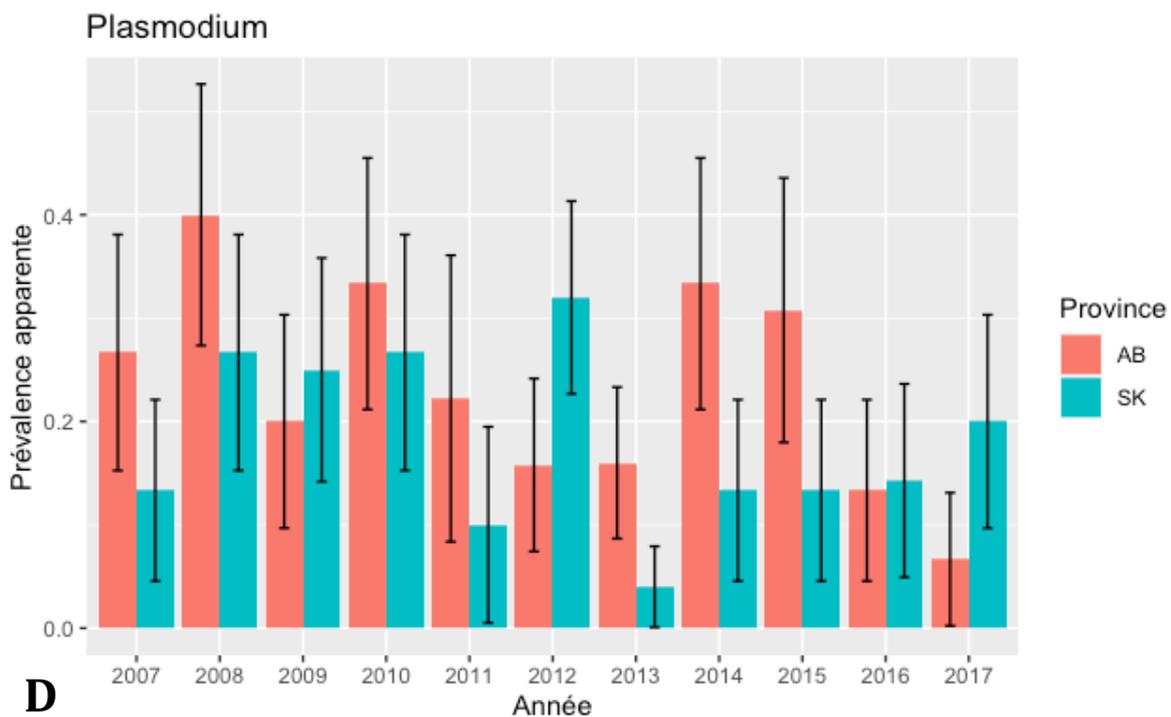
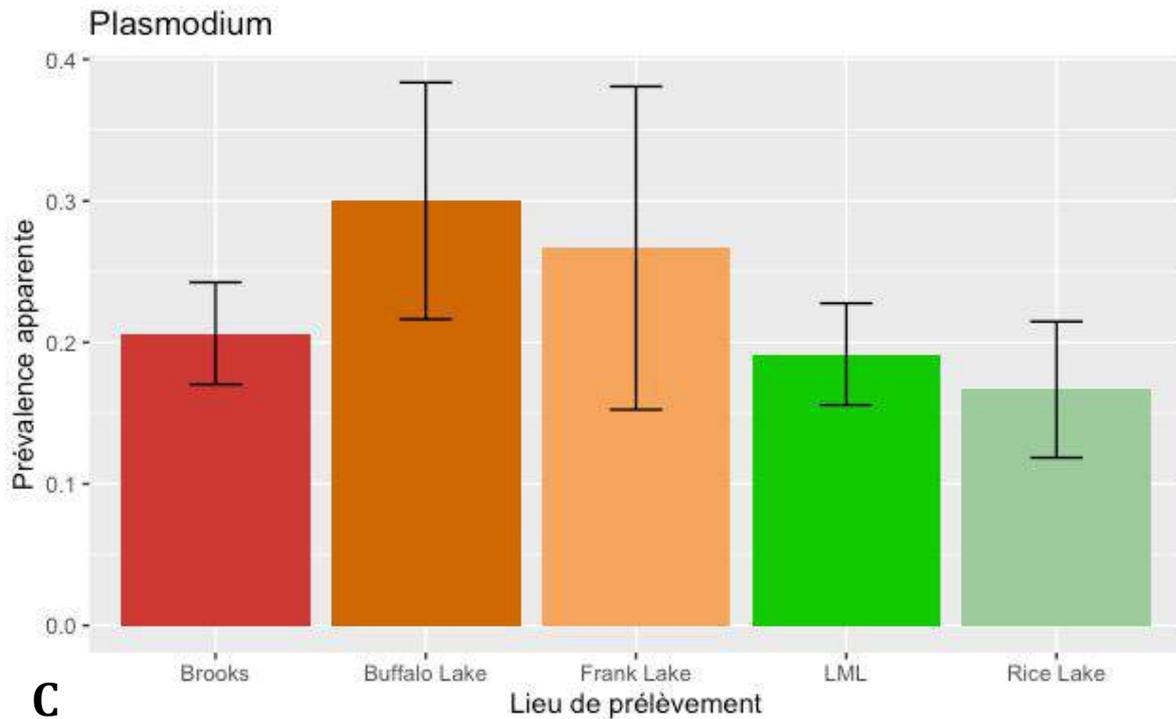
### b) Prévalence apparente de portage de *Plasmodium*

72 individus sur les 351 de l'étude étaient porteurs de *Plasmodium*, ce qui correspond à une prévalence globale apparente de 20,5% (95%IC = [16,41 ; 25,13]). Le genre *Plasmodium* est le genre d'hémosporidies le plus fréquemment observé chez les Sarcelles à ailes bleues dans l'étude.

Les variations observées selon l'âge, le sexe, l'année, la province et le lieu de prélèvement, sont présentées dans le Tableau II.IX et la Figure 2.18. Aucune différence significative selon le sexe, l'âge ou selon la province de prélèvement concernant le portage de *Plasmodium* (test du Khi-2 :  $p$ -value > 0,05) n'est notée.

Contrairement au genre *Haemoproteus*, des gamétocytes du genre *Plasmodium* sont rencontrés pour chaque année de prélèvement en Alberta et en Saskatchewan.





**Figure 2.18** Prévalences apparentes de portage de *Plasmodium* chez la Sarcelle à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2007 à 2017 (n=351). Les prévalences apparentes sont obtenues à partir de la lecture de frottis sanguins colorés à la coloration Wright Giemsa. (A) Prévalences apparentes en fonction de l'âge, adulte (AHY) ou juvénile (HY). (B) Prévalences apparentes en fonction du sexe, femelle (F) ou mâle (M). (C) Prévalences apparentes selon le lieu de prélèvement. (D) Prévalences apparentes en fonction de l'année de prélèvement et de la province.

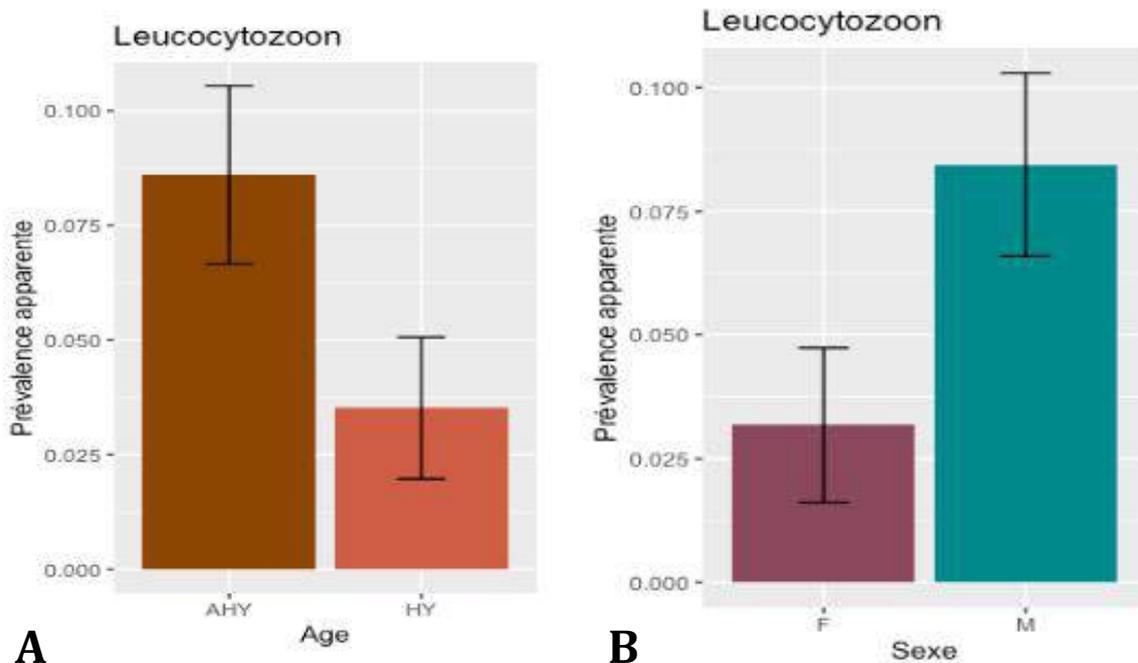
### c) Prévalence apparente de portage de *Leucocytozoon*

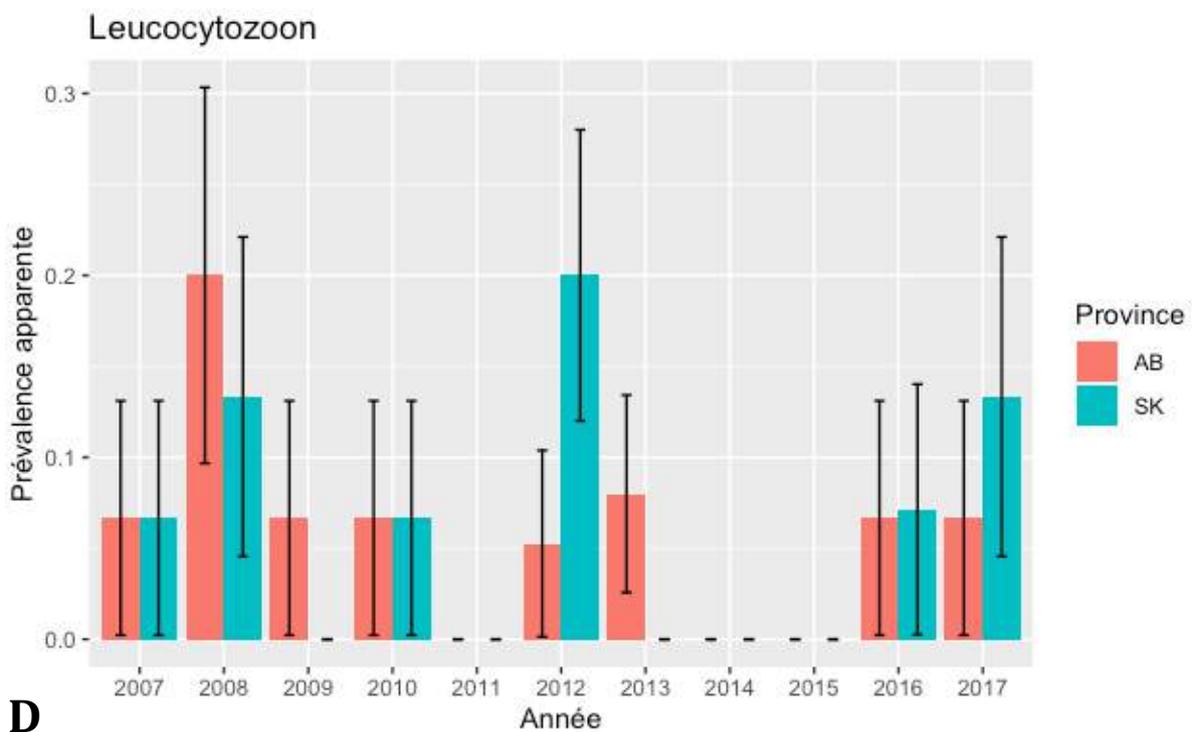
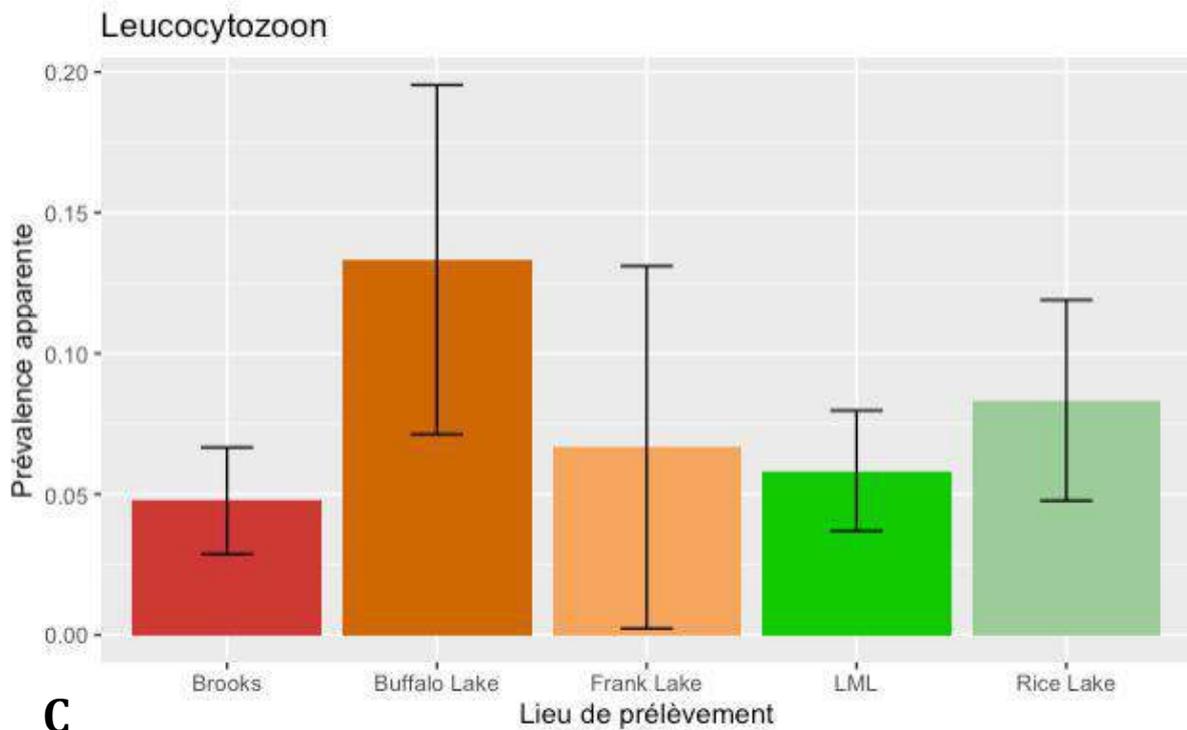
La prévalence apparente de portage pour *Leucocytozoon* est de 6,5% (95%IC = [4,19 ; 9,68]), avec un total de 23 individus porteurs sur les 351 inclus dans l'étude. Les prévalences observées sont rassemblées dans le Tableau II.IX, et illustrées par les graphiques de la Figure 2.19.

Il n'y a pas de différence significative de prévalence observée de portage selon la province et selon le sexe (test du Khi-2 :  $p$ -value > 0,05).

En revanche, le portage observé de *Leucocytozoon* est significativement différent selon l'âge (test du Khi-2 :  $p$ -value = 0,01). Chez les adultes, la prévalence observée est de 8,6% (95%IC = [5,18 ; 13,27]), contre 3,5% chez les juvéniles (95% IC = [1,15 ; 8,03]).

Aucun gamétoocyte du genre *Leucocytozoon* n'a été mis en évidence lors de la lecture des frottis sanguins pour les années 2011, 2014 et 2015, ainsi que chez les individus prélevés en Saskatchewan en 2009 et 2013.



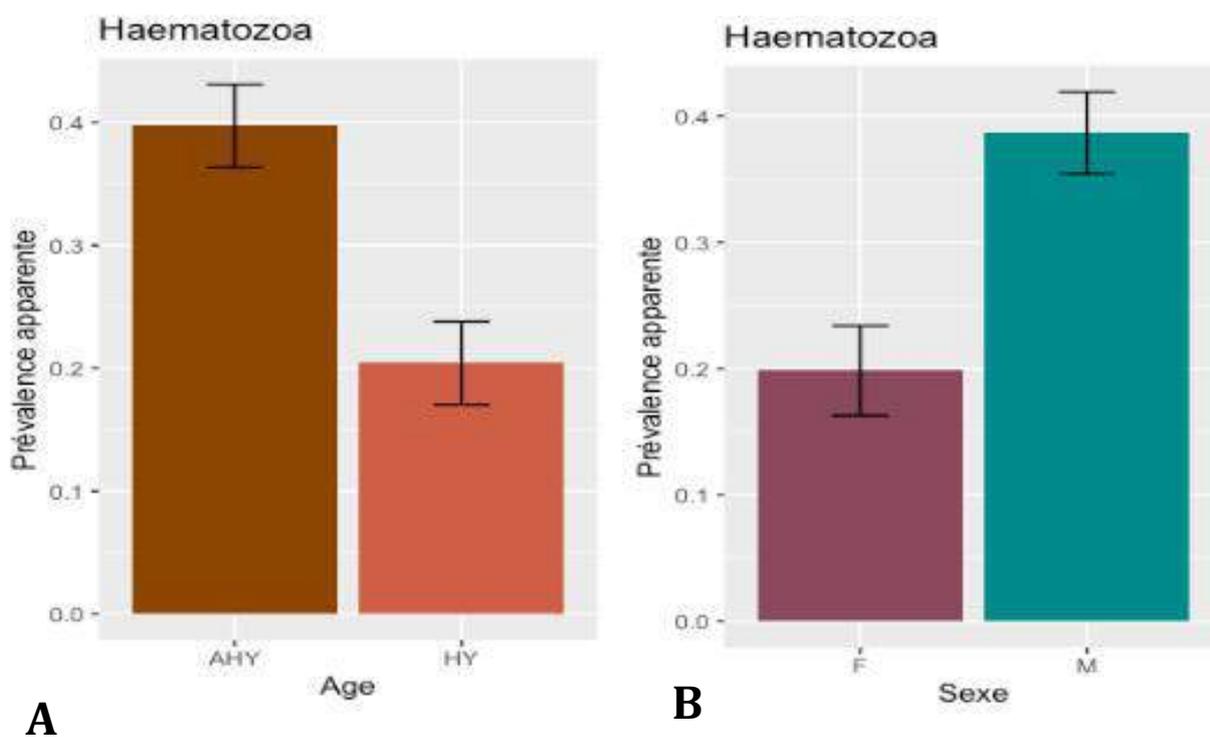


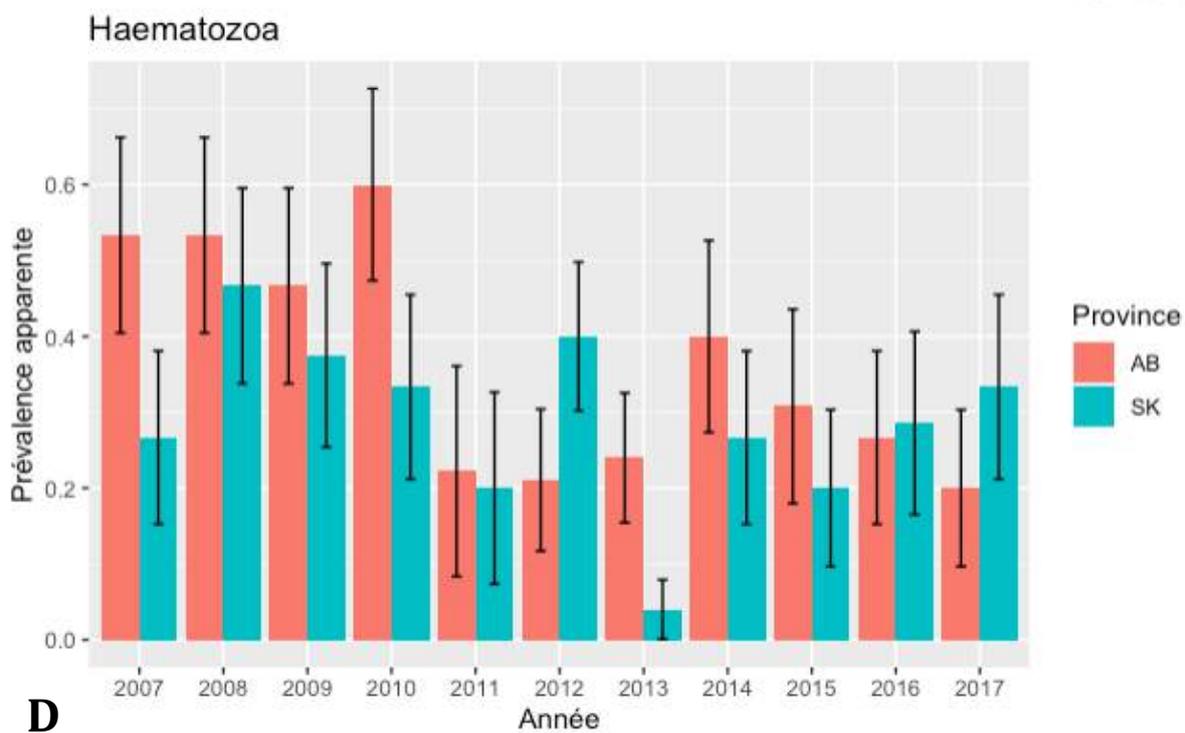
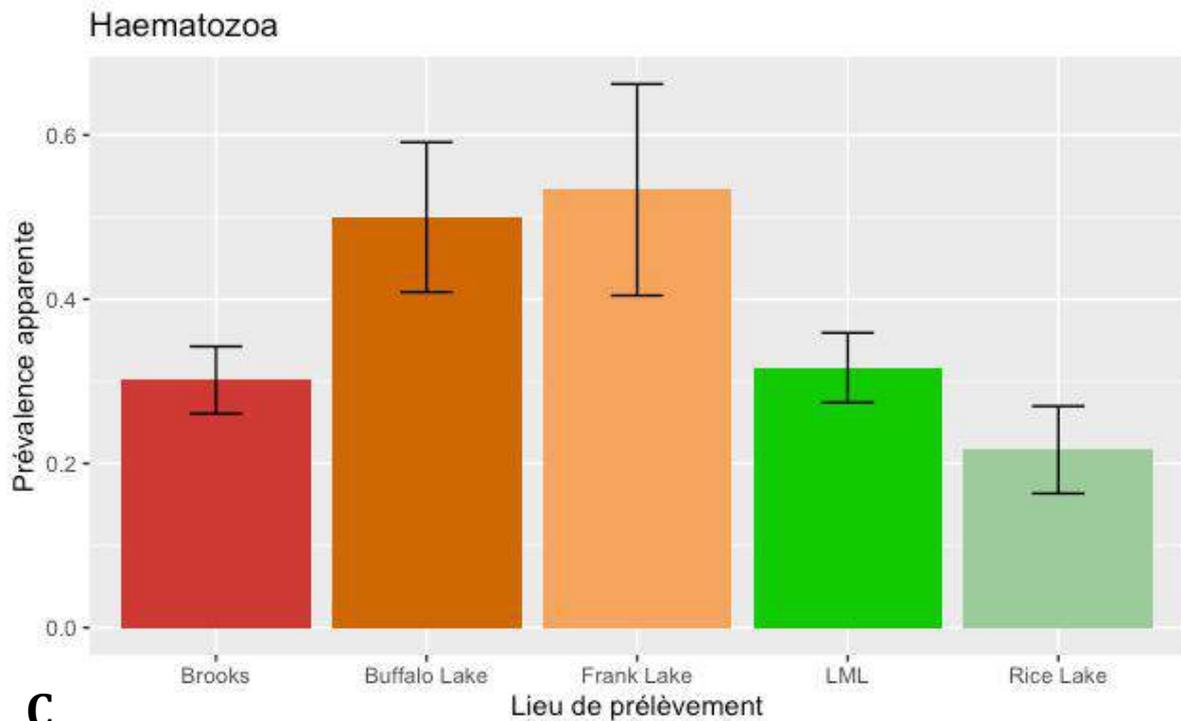
**Figure 2.19** Prévalences apparentes de portage de *Leucocytozoon* chez la Sarcelle à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2007 à 2017 (n=351). Les prévalences apparentes sont obtenues à partir de la lecture de frottis sanguins colorés à la coloration Wright Giemsa. (A) Prévalences apparentes en fonction de l'âge, adulte (AHY) ou juvénile (HY). (B) Prévalences apparentes en fonction du sexe, femelle (F) ou mâle (M). (C) Prévalences apparentes selon le lieu de prélèvement. (D) Prévalences apparentes en fonction de l'année de prélèvement et de la province.

#### d) Prévalence apparente de portage d'hémosporidies aviaires

Le portage observé d'au moins un des genres d'hémosporidies chez la Sarcelle à ailes bleues est de 31,9% (95%IC = [27,06 ; 37,07]). Les prévalences observées selon le sexe, l'âge, la province, l'année et le lieu de prélèvement sont présentées dans le Tableau II.IX et la Figure 2.20. La différence de prévalence observée selon la province de prélèvement n'est pas significative (test du Khi-2 :  $p$ -value > 0,05).

Les différences de portage apparent selon l'âge d'une part (Figure 2.20 (A)), et selon le sexe d'autre part (Figure 2.20 (B)) sont significatives (test du Khi-2 :  $p$ -value < 0,05). Chez les mâles, ce portage est de 38,7% (95%IC = [32,26 ; 45,37]), alors qu'il est de 19,8% (95%IC = [13,27 ; 27,89]) chez les femelles. Les juvéniles seraient également moins touchés que les adultes, au risque d'erreur 5%, avec des prévalences respectives de 20,4% (95%IC = [14,12 ; 28,00]) et de 39,7% (95%IC = [33,02 ; 46,70]).





**Figure 2.20** Prévalences apparentes de portage d'au moins un genre d'hémosporidies chez la Sarcelle à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2007 à 2017 (n=351). Les prévalences apparentes sont obtenues à partir de la lecture de frottis sanguins colorés à la coloration Wright Giemsa. (A) Prévalences apparentes en fonction de l'âge, adulte (AHY) ou juvénile (HY). (B) Prévalences apparentes en fonction du sexe, femelle (F) ou mâle (M). (C) Prévalences apparentes selon le lieu de prélèvement. (D) Prévalences apparentes en fonction de l'année de prélèvement et de la province.

**Bilan des prévalences apparentes de portage d'hémosporidies chez la Sarcelle à ailes bleues dans les prairies canadiennes de 2007 à 2017, lors des rassemblements pré-migratoires (Objectif 1).**

- La gamme de prévalence apparente des trois genres les plus communs d'hémosporidies est très étendue, avec des variations spatio-temporelles marquées. Les prévalences les plus élevées sont associées au genre *Plasmodium*.
- Des différences intrinsèques de prévalence liées à l'âge et au sexe sont notées et sont significatives pour les individus porteurs d'hémosporidies lorsqu'il n'y a pas de discrimination de genre parasitaire. L'âge est également significativement associé à la probabilité de portage de *Leucocytozoon*.
- Certaines années, aucun gamétoocyte n'a été détecté pour *Haemoproteus* et/ou pour *Leucocytozoon*. Ces prévalences observées nulles peuvent être le reflet de prévalences vraies effectivement très basses, ou être dues à une non-détection des individus parasités. Ce dernier point est abordé dans la discussion, partie 2.D.

### 3. Analyse des facteurs de risque potentiels associés au portage d'hémosporidies aviaires (Objectif 2a)

Suite au remodelage du fichier de données et à la sélection des individus pour la modélisation statistique, l'effectif total de Sarcelles à ailes bleues considéré pour l'analyse de facteurs de risque s'élève à 288 individus.

Les résultats de tous les modèles examinés sont présentés en Annexe 4. Pour chaque genre d'hémosporidies, le modèle retenu comme étant le mieux ajusté est présenté dans chacune des parties correspondantes. Ces modèles visent à évaluer différents facteurs de risque impliqués dans le portage d'hémosporidies aviaires.

Les prévalences apparentes de portage sont nulles pour les années 2008, 2012, 2013, 2017 pour *Haemoproteus*, ainsi qu'en 2014, 2015 pour *Leucocytozoon*. Ces prévalences peuvent correspondre à des prévalences réelles nulles ou faibles, ou être liées à des non-détections. Afin de tenir compte de cette incertitude, les modèles étudiant le portage d'*Haemoproteus* ou de *Leucocytozoon* et comportant la variable explicative « Année » ont été ajustés à l'aide d'une approche bayésienne (Heisey *et al.*, 2014 ; Lachish and Murray, 2018 ; Starkweather, 2011).

#### a) Facteurs de risque impliqués dans le portage d'au moins un des genres d'hémosporidies

Le modèle final retenu suite à l'analyse statistique des facteurs de risque potentiels de présence ou d'absence d'au moins un des genres d'hémosporidies aviaires (variable à expliquer : « Haematozoa », résultat binaire avec 0 : absence de portage et 1 : portage) chez les sarcelles échantillonnées, inclut les variables explicatives suivantes :

- Âge (« Age » - HY ou *Hatch Year* correspondant aux individus juvéniles nés l'année de la capture ; AHY ou *After Hatch Year* correspondant aux sarcelles adultes de plus d'un an) ;
- Sexe (« Sex » - F correspondant aux femelles, M correspondant aux mâles) ;
- Résidus de la densité de Sarcelles à ailes bleues (« resBWTE\_Density », variable continue, correspondant à une mesure alternative de la densité de population de Sarcelles à ailes bleues non expliquée par l'abondance en zones humides, et dont la construction a été présentée dans la partie Matériel et Méthodes II. B. 3. e.)
- Rapport hétérophiles sur lymphocytes après transformation logarithmique (« log(H/L) », variable continue)

**Tableau II.X Caractéristiques du modèle de régression logistique multiple final retenu, avec les variables susceptibles d'expliquer les variations de probabilité de portage d'au moins un des genres d'hémosporidies chez les Sarcelles à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2008 à 2017, en excluant 2011 (n=288).**

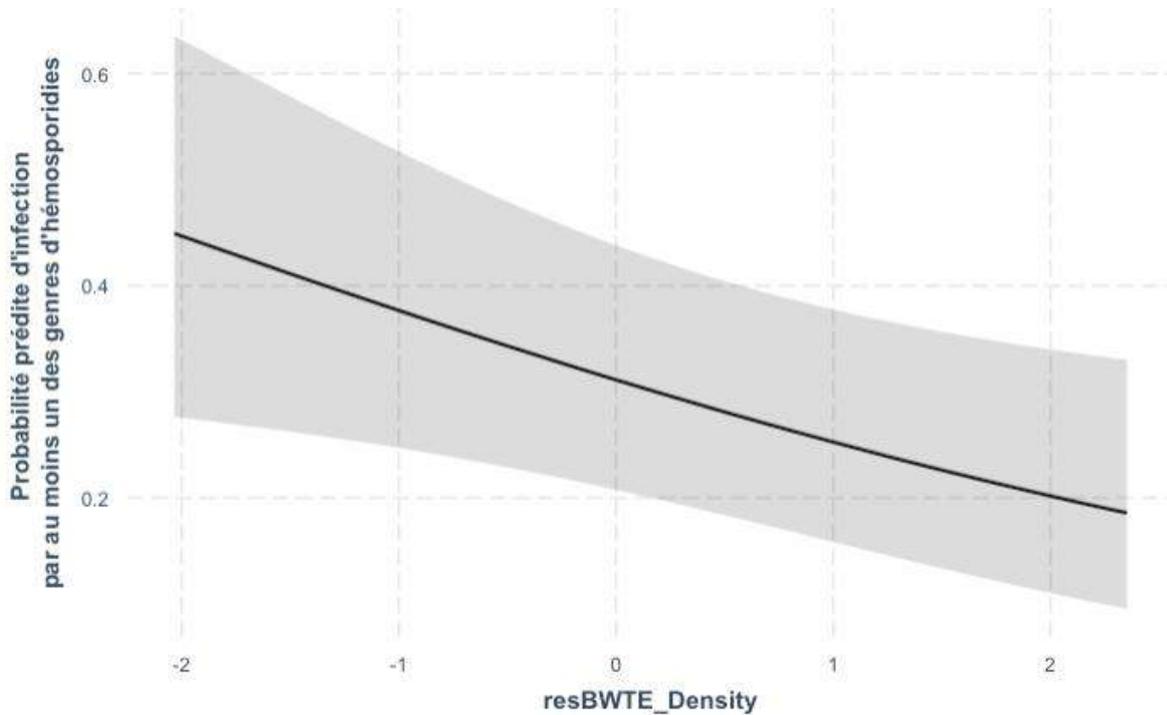
Variable		N	Odds ratio	p
<b>Age</b>	AHY	179	Reference	
	HY	109	0.44 (0.24, 0.81)	0.009
<b>Sex</b>	F	105	Reference	
	M	183	1.91 (1.07, 3.46)	0.030
<b>resBWTE_Density</b>		288	0.75 (0.58, 0.95)	0.019
<b>log(H/L)</b>		288	1.38 (1.03, 1.89)	0.036
<b>(Intercept)</b>			0.36 (0.20, 0.63)	<0.001

Abréviations : N = nombre d'individus ; OR = *Odds ratio* ; 95%IC = intervalle de confiance à 95% ; AHY = « *After Hatch Year* » ou adultes ; HY = « *Hatch Year* » ou juvéniles ; Sex = Sexe avec F = femelles et M = mâles ; resBWTE\_Density = Résidus de la densité de Sarcelles à ailes bleues ; log(H/L) = Rapport hétérophiles sur lymphocytes après transformation logarithmique.

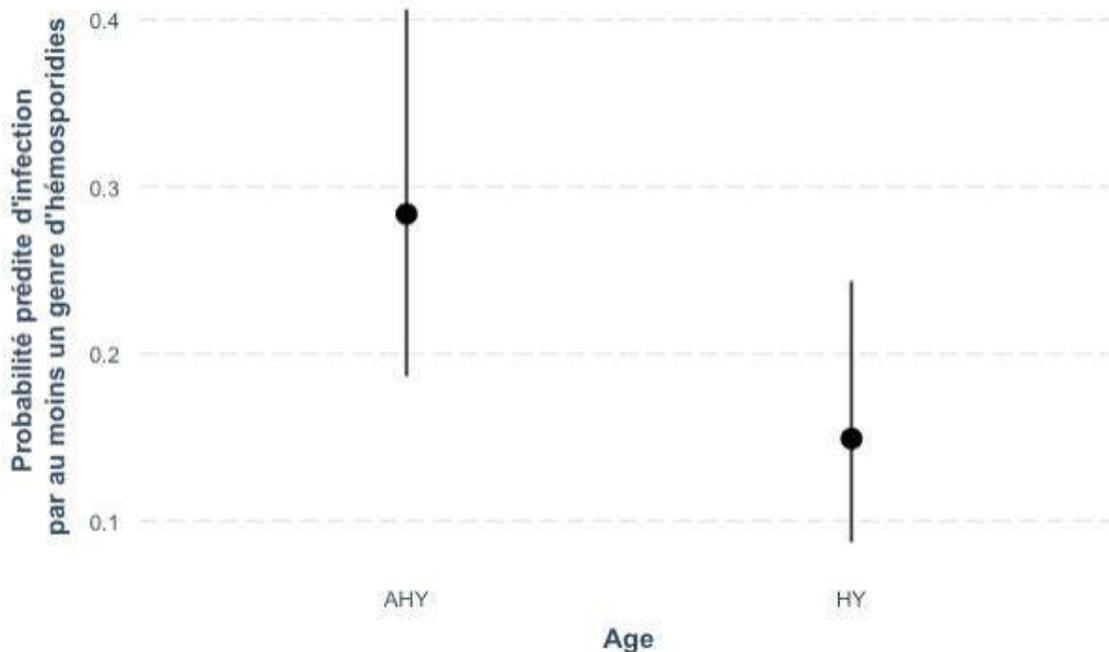
Le modèle statistique final est illustré par le Tableau II.X. D'après ce modèle, le portage apparent d'au moins un des genres d'hémosporidies aviaires est négativement associé aux résidus de la régression linéaire de la densité de Sarcelles à ailes bleues en fonction de la densité en étendues d'eau peu profondes (OR = 0,75 ; 95% IC = [0,58 ; 0,95]), avec ajustement sur les autres variables du modèle (Figure 2.21).

Le risque pour une sarcelle d'être infectée par au moins un genre d'hémosporidies est plus faible chez un juvénile que chez un adulte (OR = 0,44 ; 95%IC = [0,24 ; 0,81]) (Figure 2.22), et plus élevé chez un individu mâle par rapport à un individu femelle (OR = 1,91 ; 95%IC = [1,07 ; 3,46]) (Figure 2.23).

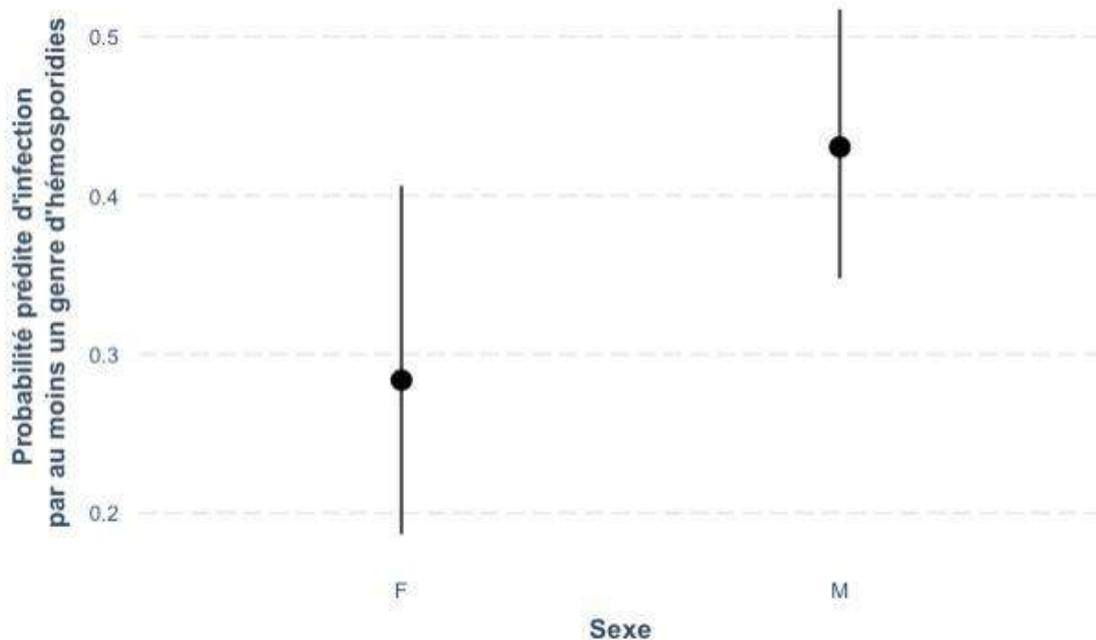
Les individus avec un rapport H/L élevé sont plus à risque d'être porteurs d'au moins un des genres d'hémosporidies (OR = 1,38 ; 95% IC = [1,03 ; 1,89]), pour les autres variables du modèle constantes (Figure 2.24).



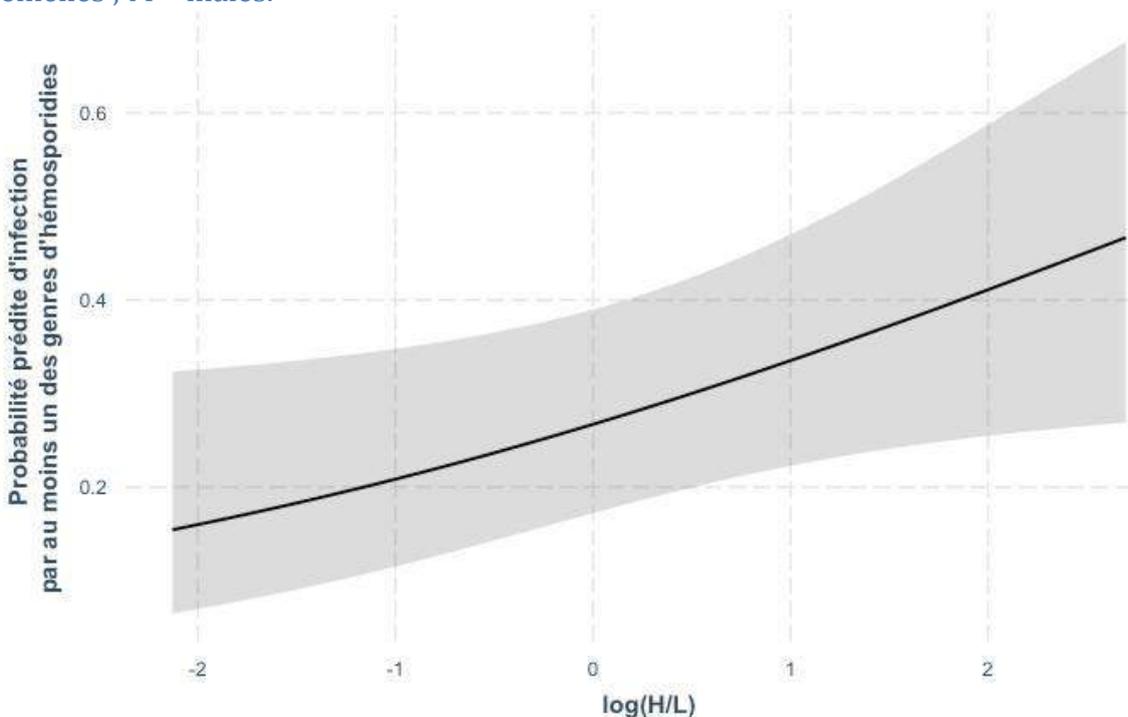
**Figure 2.21 Probabilité d'infection par au moins un genre d'hemosporidies chez les Sarcelles à ailes bleues en fonction des résidus de la densité de Sarcelles à ailes bleues.** La probabilité prédite a été calculée à partir du modèle final avec l'âge et le sexe fixés à adulte et femelle respectivement, et  $\log(H/L)$  fixé à sa moyenne. La zone grisée correspond à l'intervalle de confiance à 95%.



**Figure 2.22 Probabilité d'infection par au moins un genre d'hemosporidies chez les Sarcelles à ailes bleues en fonction de l'âge.** La probabilité prédite a été calculée à partir du modèle final avec le sexe fixé à femelle, et «  $\log(H/L)$  » et «  $\text{resBWTE\_Density}$  » fixé à leur moyenne. La zone grisée correspond à l'intervalle de confiance à 95%. AHY = « *After Hatch-Year* » ou adultes ; HY = « *Hatch-Year* » ou juvéniles.



**Figure 2.23 Probabilité d'infection par au moins un genre d'hémosporidies chez les Sarcelles à ailes bleues en fonction du sexe.** La probabilité prédite a été calculée à partir du modèle final avec l'âge fixé à adulte, et « log(H/L) » et « resBWTE\_Density » fixé à leur moyenne. La zone grisée correspond à l'intervalle de confiance à 95%. F = femelles ; M = mâles.



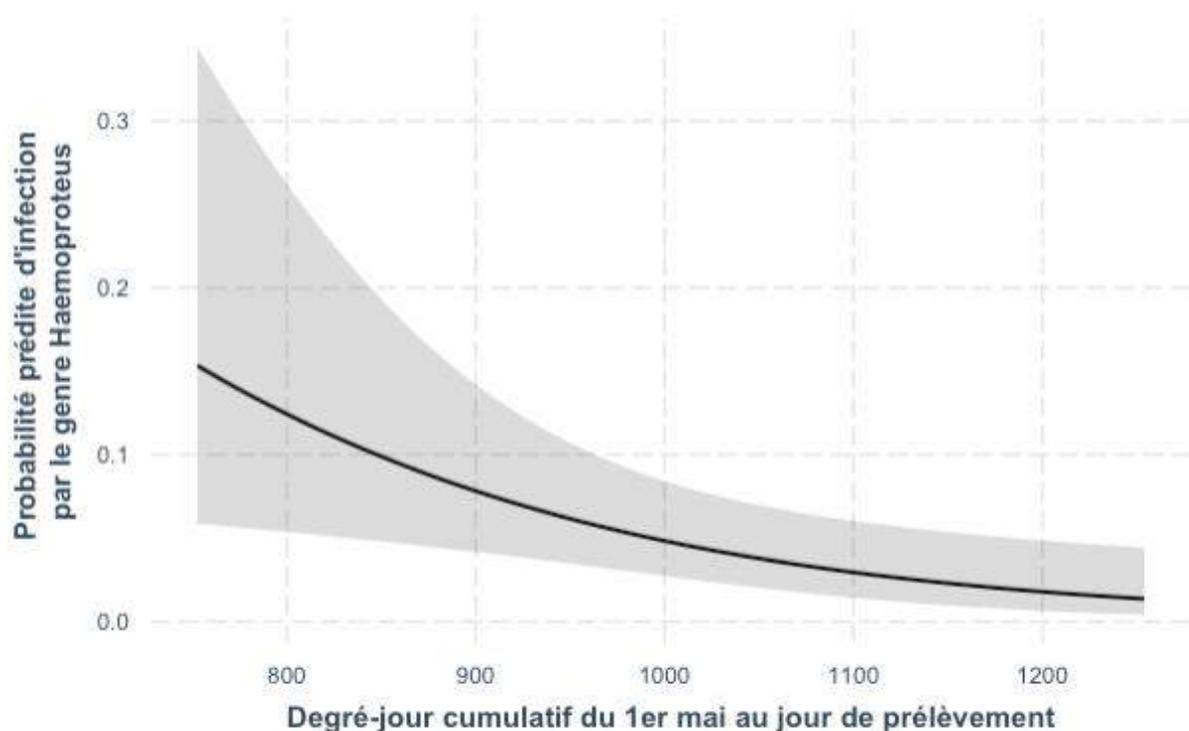
**Figure 2.24 Probabilité d'infection par au moins un genre d'hémosporidies chez les Sarcelles à ailes bleues en fonction du rapport H/L après transformation logarithmique.** La probabilité prédite a été calculée à partir du modèle final avec l'âge et le sexe fixés à adulte et femelle respectivement, et « resBWTE\_Density » fixé à sa moyenne. La zone grisée correspond à l'intervalle de confiance à 95%.

### b) Facteurs de risque impliqués dans le portage d'*Haemoproteus*

Le modèle final retenu comme le plus adapté pour expliquer la variabilité observée de portage de parasites du genre *Haemoproteus* (variable à expliquer : « HAEMsm », résultat binaire avec 0 : absence de portage et 1 : portage) chez les sarcelles échantillonnées est un modèle simple à une variable :

- Variable explicative « DJC1M » correspondant au degré-jour cumulatif du 1<sup>er</sup> mai au jour de prélèvement.

Une association négative entre le portage d'*Haemoproteus* et « DJC1M » est notée (OR = 0,9952 ; 95% IC = [0,9909 ; 0,9987] ; *p-value* = 0,009) (Figure 2.25).



**Figure 2.25** Probabilité d'infection par le genre *Haemoproteus* chez les Sarcelles à ailes bleues en fonction du degré-jour cumulatif du 1<sup>er</sup> mai au jour de prélèvement. La probabilité prédite a été calculée à partir du modèle final. La zone grisée correspond à l'intervalle de confiance à 95%.

### c) Facteurs de risque impliqués dans le portage de *Plasmodium*

Le modèle final obtenu suite à l'analyse statistique pour expliquer le portage observé d'hémoparasites du genre *Plasmodium* (variable à expliquer : « PLASsm », résultat binaire 0 : absence de portage, 1 : portage) est un modèle simple avec une seule variable explicative :

- Rapport hétérophiles sur lymphocytes après transformation logarithmique (« log(H/L) », variable continue)

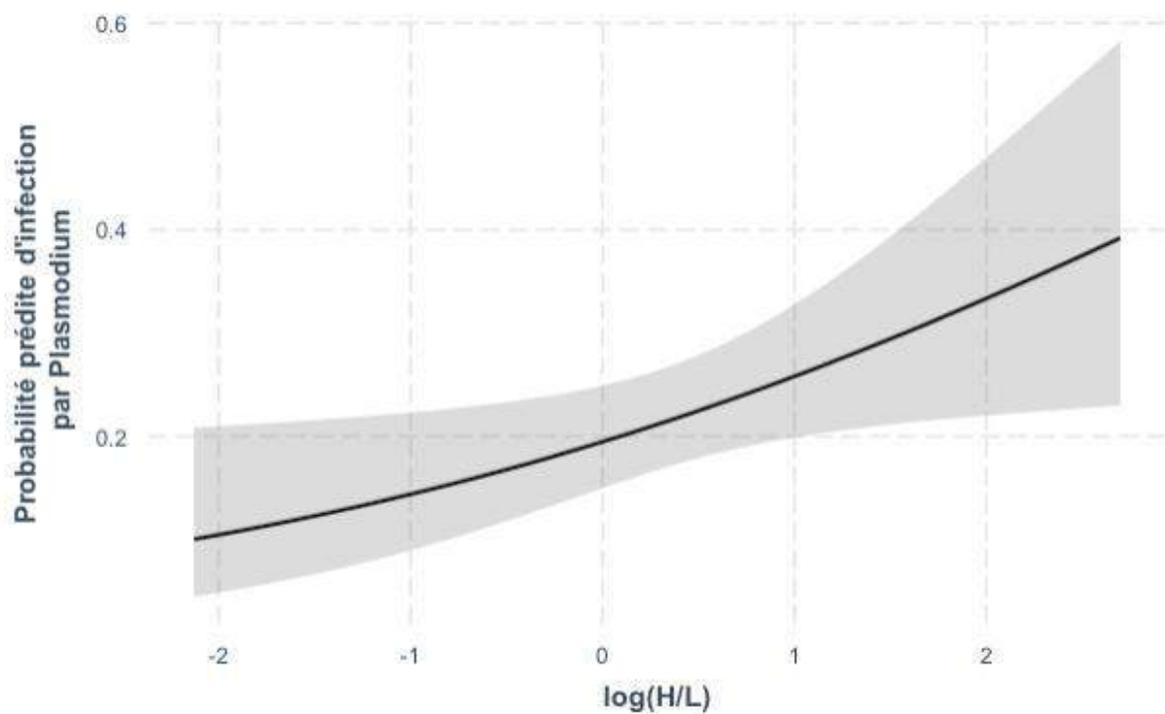
Les sarcelles présentant un rapport hétérophiles sur lymphocytes élevé après transformation logarithmique sont plus à risque d'être porteuses de *Plasmodium* (OR = 1,44 ; 95%IC = [1,06 ; 1,98] ; *p*-value = 0,02) (Tableau II.XI et Figure 2.26).

**Tableau II.XI Caractéristiques du modèle de régression logistique multiple final retenu, avec les variables susceptibles d'expliquer les variations de probabilité de portage de *Plasmodium* chez les Sarcelles à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2008 à 2017, en excluant 2011 (n=288).**

Variable	N	Odds ratio	OR (95% IC)	P-value
log(H/L)	288		1.44 (1.06, 1.98)	0.02
(Intercept)			0.24 (0.17, 0.33)	<0.001

0.2    0.5    1

Abréviations : N = nombre d'individus ; OR = *Odds ratio* ; 95%IC = intervalle de confiance à 95% ; log(H/L) = Rapport hétérophiles sur lymphocytes après transformation logarithmique.



**Figure 2.26** Probabilité d'infection par le genre *Plasmodium* chez les Sarcelles à ailes bleues en fonction du rapport H/L après transformation logarithmique. La probabilité prédite a été calculée à partir du modèle final. La zone grisée correspond à l'intervalle de confiance à 95%.

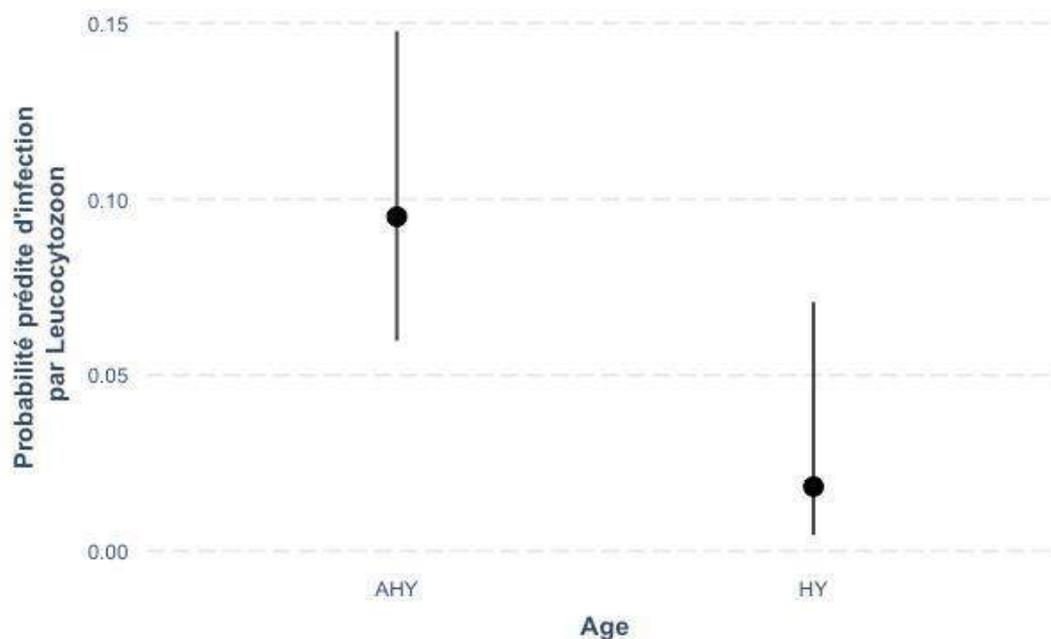
*d) Facteurs impliqués dans le portage de Leucocytozoon*

Le portage observé de *Leucocytozoon* est expliqué au mieux par la variable « Age », avec 0,18 (95% IC = 0,03 ; 0,64) fois moins de risque d'être infecté pour les individus juvéniles par rapport aux adultes (Tableau II.XII et Figure 2.27).

**Tableau II.XII Caractéristiques du modèle de régression logistique multiple final retenu, avec les variables susceptibles d'expliquer les variations de probabilité de portage de *Leucocytozoon* chez les Sarcelles à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2008 à 2017, en excluant 2011 (n=288).**

Variable	N	Odds ratio	p
Age	AHY 179	Reference	
	HY 109	0.18 (0.03, 0.64)	0.02
(Intercept)		0.10 (0.06, 0.17)	<0.001

Abréviations : N = nombre d'individus ; OR = Odds ratio ; 95%IC = intervalle de confiance à 95% ; AHY = « After Hatch Year » ou adultes ; HY = « Hatch Year » ou juvéniles.



**Figure 2.27 Probabilité d'infection par le genre *Leucocytozoon* chez les Sarcelles à ailes bleues en fonction de l'âge.** La probabilité prédite a été calculée à partir du modèle final.

**Bilan des facteurs de risque potentiels associés au portage d'hémosporidies aviaires chez la Sarcelle à ailes bleues dans les prairies canadiennes de 2007 à 2017, lors des rassemblements pré-migratoires (Objectif 2a).**

- Une partie des facteurs analysés n'a montré aucune association significative avec le risque de portage d'hémosporidies pour aucun des trois genres communs étudiés : la province et le lieu de prélèvement, le pourcentage de Sarcelles à ailes bleues, la densité en étendues d'eau peu profondes, les facteurs de précipitations, la vitesse moyenne du vent par heure en juillet, l'indice de condition corporelle.
- D'autres facteurs avaient une influence sur le risque de portage, mais n'amélioraient pas le modèle final (cf. Annexe 4).
- L'importance des facteurs intrinsèques (âge, sexe, rapport H/L) dans le risque de portage d'hémosporidies aviaires est majeure, à l'exception du genre *Haemoproteus* pour qui les facteurs environnementaux ont plus d'influence sur le portage.
- La variable de densité « resBWTE\_Density » était significativement associée au portage d'au moins un des genres d'hémosporidies, mais pas la variable densité en Sarcelles à ailes bleues.

#### 4. Détermination de facteurs de stress responsables chez la Sarcelle à ailes bleues d'élévation des niveaux de CORTf et du rapport H/L (Objectif 2b)

##### a) Facteurs de variation du niveau de corticostérone (CORTf) dans les plumes chez les Sarcelles à ailes bleues

La gamme de valeurs de CORTf dans l'échantillon de Sarcelles à ailes bleues (n=288) varie de 0,2568 à 13,9398 pg/mm de plume. Aucune différence significative n'est notée entre mâles et femelles (n = 288 ; t = 0,79 ; p-value = 0,43) (Figure 2.28). En revanche, une différence significative est notée entre les individus juvéniles « HY » et adultes « AHY » (n=288 ; t= 3,80 ; p-value < 0,01), avec les niveaux de CORTf les plus élevés présentés par les individus adultes (Figure 2.29).

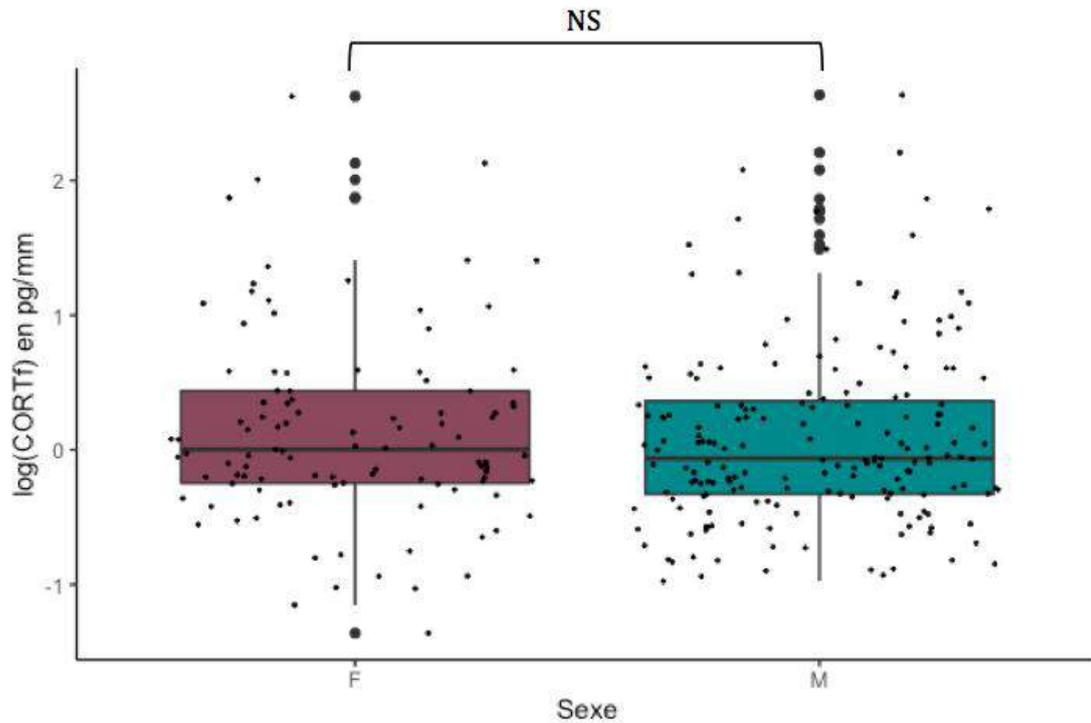
Les individus porteurs d'au moins un des genres d'hémosporidies ont des niveaux de corticostérone dans les plumes plus élevés, même si la différence est non significative (n=288 ; t= -1,79 ; p-value = 0,07) (Figure 2.30). Ni l'infection par *Haemoproteus* (n=288 ; t = -1,45 ; p-value = 0,15), ni celles par *Plasmodium* (n = 288 ; t = -0,40 ; p-value = 0,69) ou par *Leucocytozoon* (n=288 ; t = -1,03 ; p-value = 0,30) ne sont significativement associées aux niveaux de CORTf.

La parasitémie (« Parasitemia2 », résultat ordonné, 0 : absence de portage, 1 : parasitémie faible avec moins d'un parasite par champ, 2 : parasitémie modérée à élevée avec au moins un parasite par champ) est associée avec les niveaux de CORTf, tel que les sarcelles ayant une parasitémie modérée ou élevée sont plus à risque d'avoir des niveaux de CORTf élevés (OR = 1,54 ; 95% IC = [1,03 ; 2,29], p-value = 0,035) (Figure 2.31).

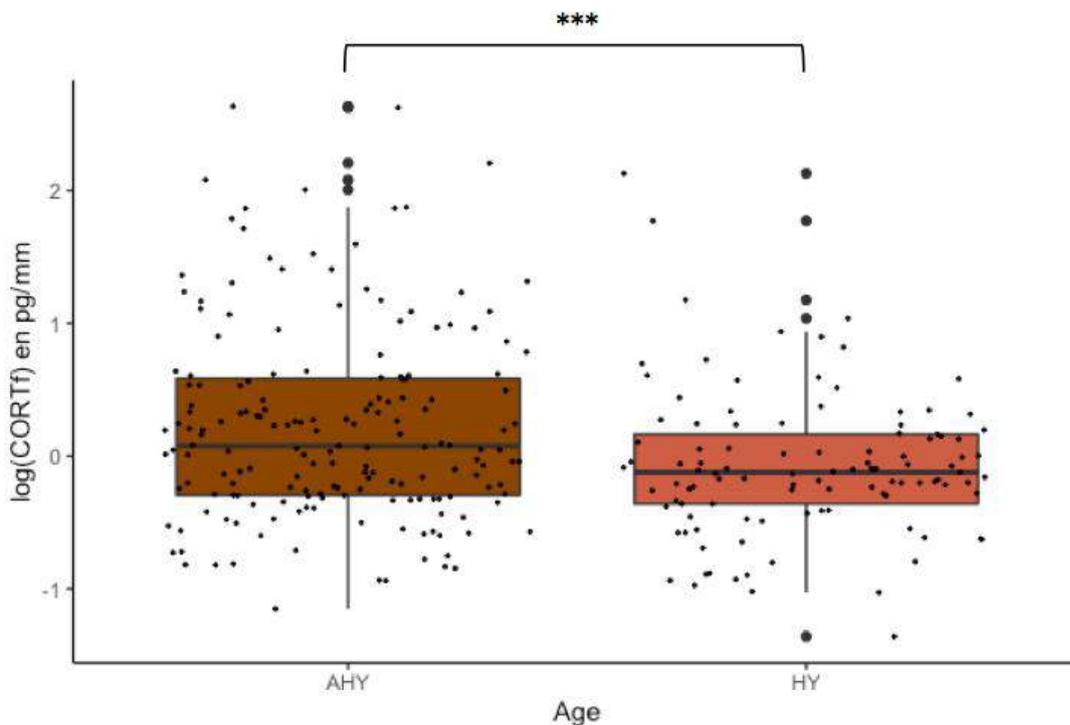
La diversité parasitaire, avec la présence de deux genres d'hémoparasites lors de la lecture du frottis sanguin coloré, n'est pas associée significativement aux niveaux de CORTf.

Les niveaux de CORTf sont positivement et significativement corrélés à la vitesse moyenne du vent du 17 mai au jour de prélèvement (Figure 2.32) (OR = 1,16 ; 95%IC = [1,10 ; 1,22] ; p-value < 0,001). Les niveaux de CORTf sont négativement associés à la moyenne des températures journalières moyennes du 17 mai au jour de prélèvement (OR = 0,87 ; 95% IC = [0,81 ; 0,93], p-value < 0,001) (Figure 2.33). Aucune association significative n'est notée avec les niveaux de précipitations sur cette période.

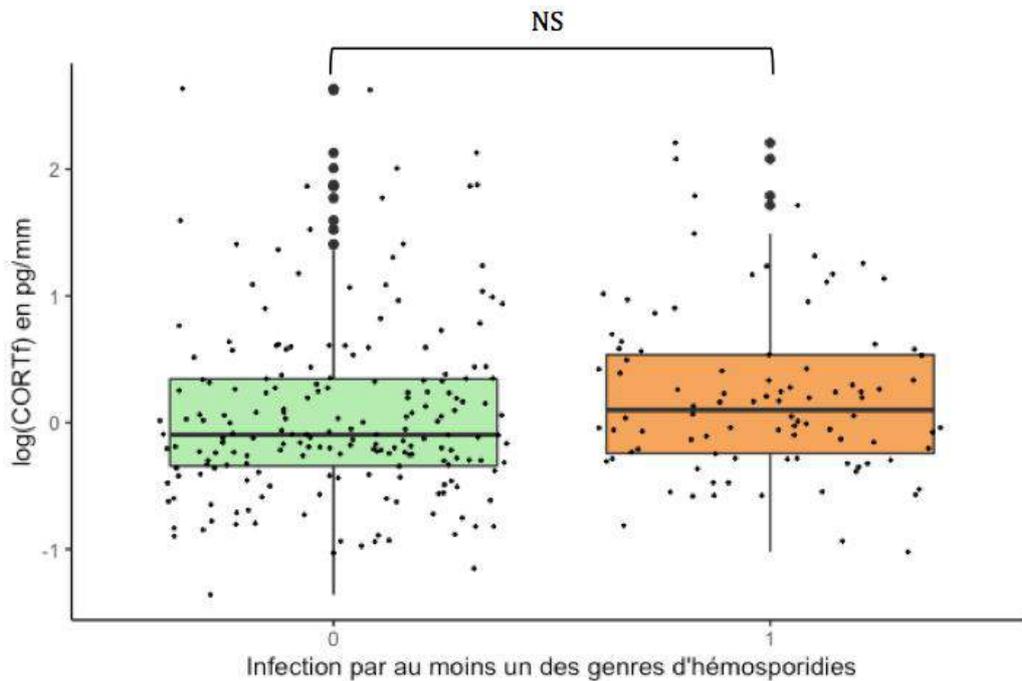
Les niveaux de CORTf ne sont pas associés avec les variables de densité (« Pop\_Density », « BWTE\_Density », « resBWTE\_Density », « Pond\_Density »).



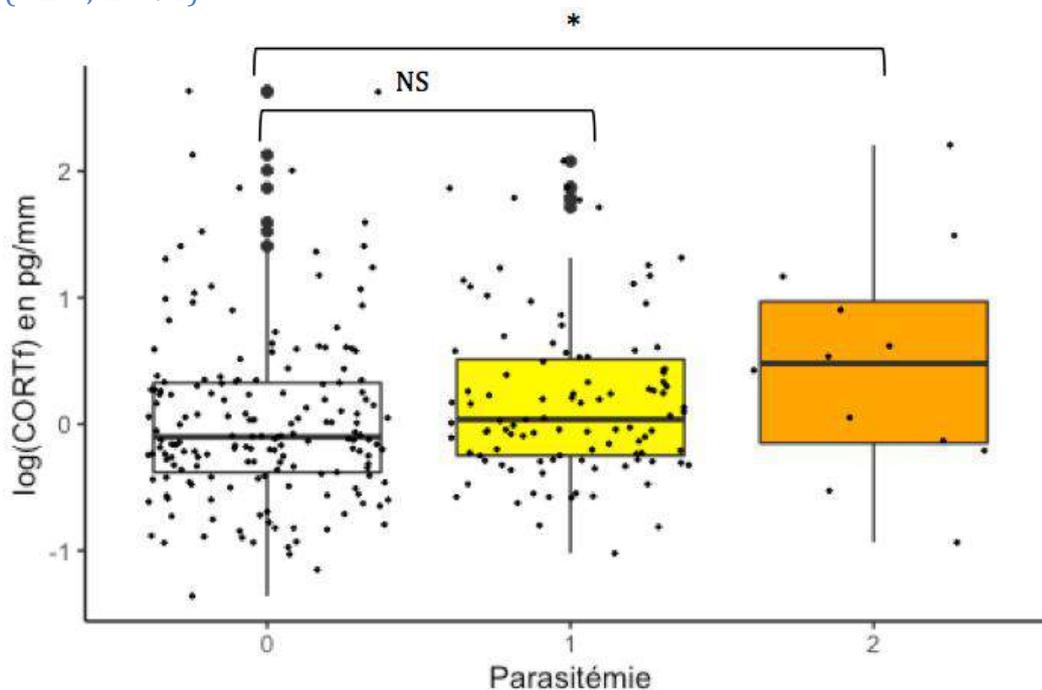
**Figure 2.28 Niveaux de corticostérone dans les plumes (CORTf) selon le sexe chez les Sarcelles à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2008 à 2017 en excluant 2011.** Les niveaux de CORTf ont subi une transformation logarithmique et sont comparés entre mâles (« M » ; n = 183) et femelles (« F » ; n = 105).



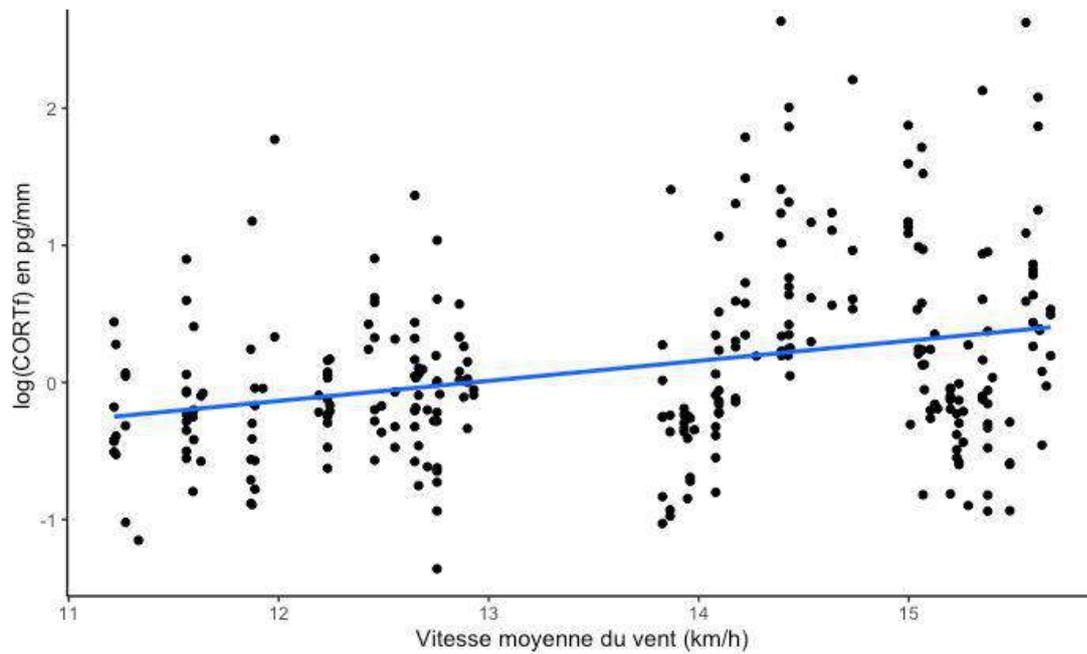
**Figure 2.29 Niveaux de corticostérone dans les plumes (CORTf) selon l'âge chez les Sarcelles à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2008 à 2017 en excluant 2011.** Les niveaux de CORTf ont subi une transformation logarithmique et sont comparés entre adultes (« AHY » ; n = 179) et juvéniles (« HY » ; n = 109).



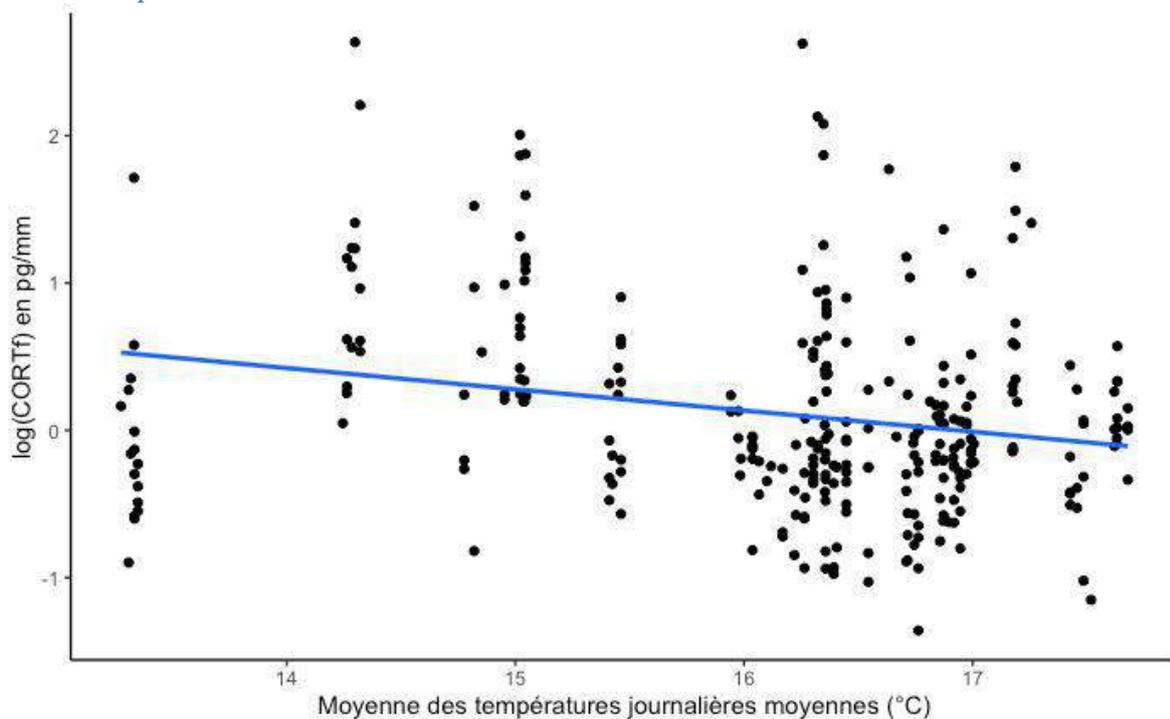
**Figure 2.30 Niveaux de corticostérone dans les plumes (CORTf) en fonction du portage d'au moins un genre d'hémosporidies chez les Sarcelles à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2008 à 2017 en excluant 2011.** Les niveaux de CORTf ont subi une transformation logarithmique et sont comparés entre les individus non porteurs (« 0 » ; n = 194) et ceux porteurs d'au moins un genre d'hémosporidies (« 1 » ; n = 94).



**Figure 2.31 Niveaux de corticostérone dans les plumes (CORTf) en fonction de la parasitémie chez les Sarcelles à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2008 à 2017 en excluant 2011.** Les niveaux de CORTf ont subi une transformation logarithmique et sont comparés entre les individus non porteurs d'hémosporidies (« 0 » ; n = 173), les individus présentant une parasitémie faible (« 1 » ; n = 103) et ceux présentant une parasitémie moyenne ou élevée (« 2 » ; n = 12).



**Figure 2.32 Niveaux de corticostérone dans les plumes (CORTf) en fonction de la vitesse moyenne du vent du 17 mai au jour de prélèvement chez les Sarcelles à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2008 à 2017 en excluant 2011. La vitesse moyenne du vent est calculée à partir des vitesses par heure, et est exprimée en kilomètre par heure.**



**Figure 2.33 Niveaux de corticostérone dans les plumes (CORTf) en fonction de la moyenne des températures journalières moyennes du 17 mai au jour de prélèvement chez les Sarcelles à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2008 à 2017 en excluant 2011**

Les modèles comparés dans l'analyse des facteurs de variation des niveaux de corticostérone dans les plumes sont présentés en Annexe 5.

Le modèle final permettant d'expliquer au mieux les variations de niveaux de corticostérone dans les plumes (variable continue « log(CORTf) » correspondant au niveau de corticostérone mesuré dans la 2<sup>e</sup> rectrice à droite après transformation logarithmique) contient les variables explicatives suivantes :

- Âge (« Age » - HY ou *Hatch Year* correspondant aux individus juvéniles nés l'année de la capture ; AHY ou *After Hatch Year* correspondant aux sarcelles adultes de plus d'un an) ;
- Sexe (« Sex » - F correspondant aux femelles, M correspondant aux mâles) ;
- Année de prélèvement (« Year » - de 2008 à 2017, en excluant 2011)
- Province (« Prov » - SK ou Saskatchewan ; AB ou Alberta)
- Densité de population (« Pop\_Density »)

Le modèle statistique retenu est illustré par le Tableau II.XIII. D'après le modèle, le risque d'avoir des niveaux de CORTf élevés est diminué chez les juvéniles d'une part (OR = 0,85 ; 95% IC = [0,72 ; 0,99] ; *p-value* = 0,04) (Figure 2.34), et chez les mâles d'autre part (OR = 0,83 ; 95% IC = [0,72 ; 0,97] ; *p-value* = 0,022) (Figure 2.35), après ajustement sur les autres variables du modèle.

L'année de prélèvement est également informative, avec des niveaux plus élevés de CORTf associé aux années 2008 (OR = 1,79 ; 95%IC = [1,31 ; 2,45], *p-value* < 0,001) et 2009 (OR = 1,60 ; 95%IC = [1,16 ; 2,21], *p-value* = 0,005), et des niveaux plus faibles associés à 2013 (OR = 0,64 ; 95%IC = [0,48 ; 0,86], *p-value* = 0,004) et 2015 (OR = 0,60 ; 95%IC = [0,43 ; 0,85], *p-value* = 0,004), avec 2017 comme année de référence et les autres variables fixées (Figure 2.36).

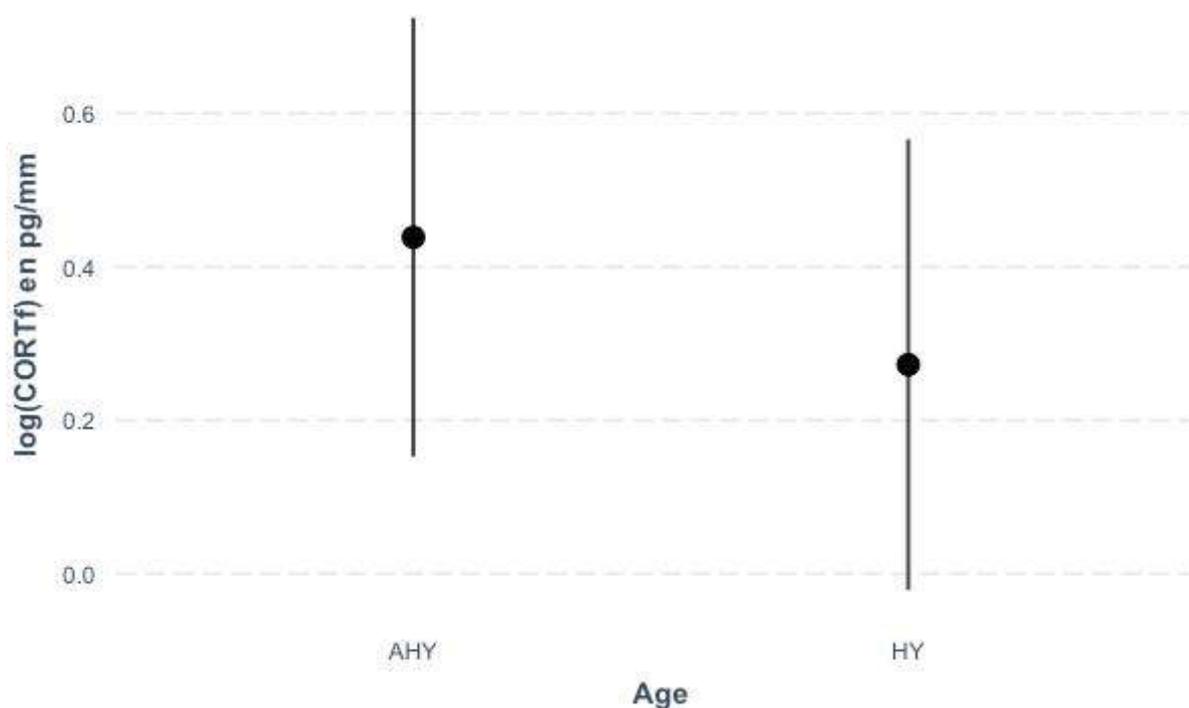
Après ajustement sur les autres variables du modèle, une différence significative est notée entre la Saskatchewan et l'Alberta, tel que les sarcelles prélevées en Saskatchewan présentent des niveaux de CORTf moins élevés (OR = 0,73 ; 95%IC = [0,56 ; 0,95], *p-value* = 0,021) (Figure 2.37).

La densité de population de canards de surface est positivement associée aux niveaux de CORTf (OR = 1,06 ; 95%IC = [1,02 ; 1,19], *p-value* = 0,003), tel que des densités plus importantes sont associées à des niveaux de CORTf majorés (Figure 2.38).

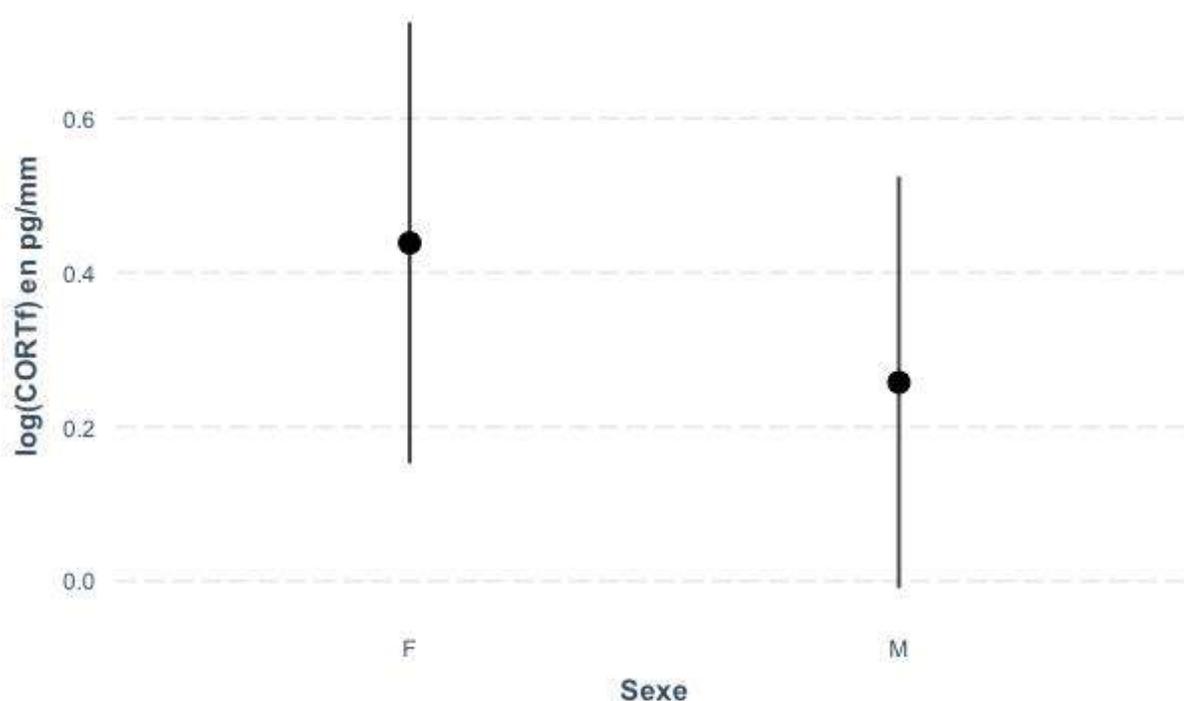
**Tableau II.XIII Caractéristiques du modèle de régression logistique multiple final retenu, avec les variables susceptibles d'expliquer les variations des niveaux de corticostérone dans les plumes chez les Sarcelles à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2008 à 2017, en excluant 2011 (n=288)**

Variable		N	Estimate	p
Age	AHY	179	Reference	
	HY	109	-0.17 (-0.32, -0.01)	0.040
Sex	F	105	Reference	
	M	183	-0.18 (-0.33, -0.03)	0.022
Year	2017	29	Reference	
	2008	30	0.58 (0.27, 0.90)	<0.001
	2009	31	0.47 (0.14, 0.79)	0.005
	2010	30	0.14 (-0.21, 0.49)	0.433
	2012	43	0.05 (-0.25, 0.34)	0.758
	2013	40	-0.44 (-0.74, -0.15)	0.004
	2014	30	-0.31 (-0.64, 0.01)	0.057
	2015	26	-0.50 (-0.84, -0.17)	0.004
Prov	AB	141	Reference	
	SK	147	-0.31 (-0.57, -0.05)	0.021
Pop_Density		288	0.06 (0.02, 0.09)	0.003
(Intercept)			-0.20 (-0.61, 0.21)	0.339

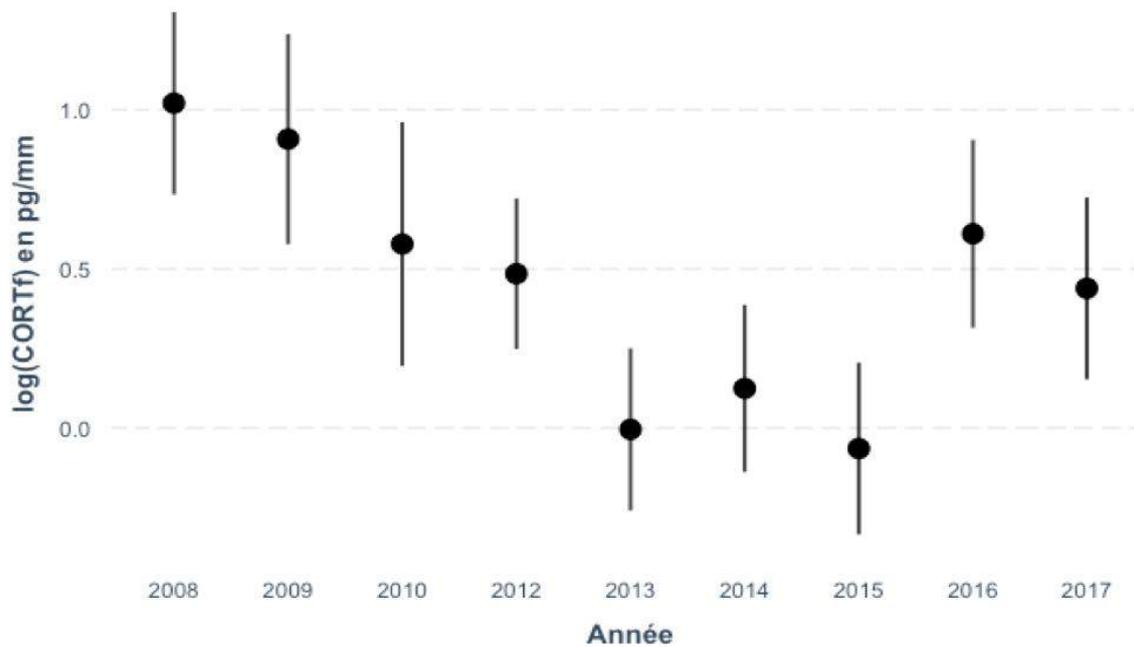
Abréviations : N = nombre d'individus ; OR = Odds ratio ; 95%IC = intervalle de confiance à 95% ; AHY = « After Hatch Year » ou adultes ; HY = « Hatch Year » ou juvéniles ; Sex = Sexe avec F = femelles et M = mâles ; Year = Année de prélèvement, avec 2017 comme année de référence ; Prov = Province avec AB = Alberta et SK = Saskatchewan ; Pop\_Density = Densité de population de canards de surface.



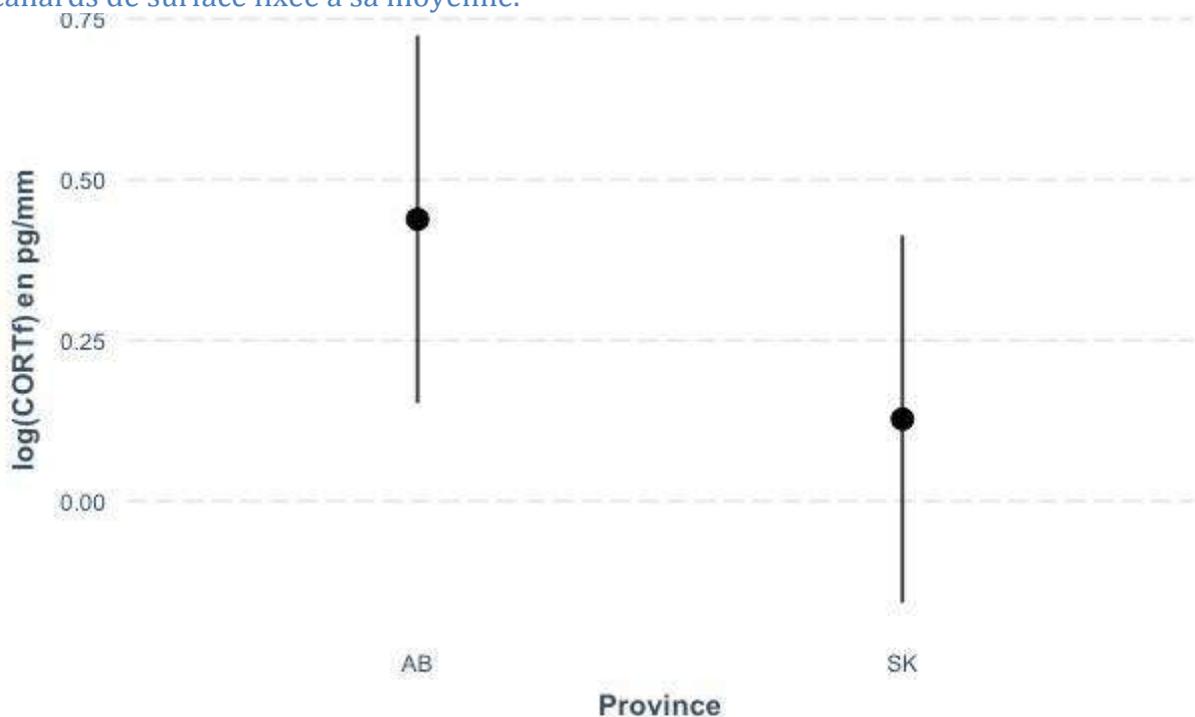
**Figure 2.34 Effet de l'âge sur les niveaux de corticostérone dans les plumes (CORTf) après transformation logarithmique, chez les Sarcelles à ailes bleues.** Les valeurs prédites ont été calculées à partir du modèle final avec le sexe, l'année et la province fixés à femelle, 2017 et Alberta respectivement, et la densité de population de canards de surface fixée à sa moyenne. « AHY » = adultes ; « HY » = juvéniles.



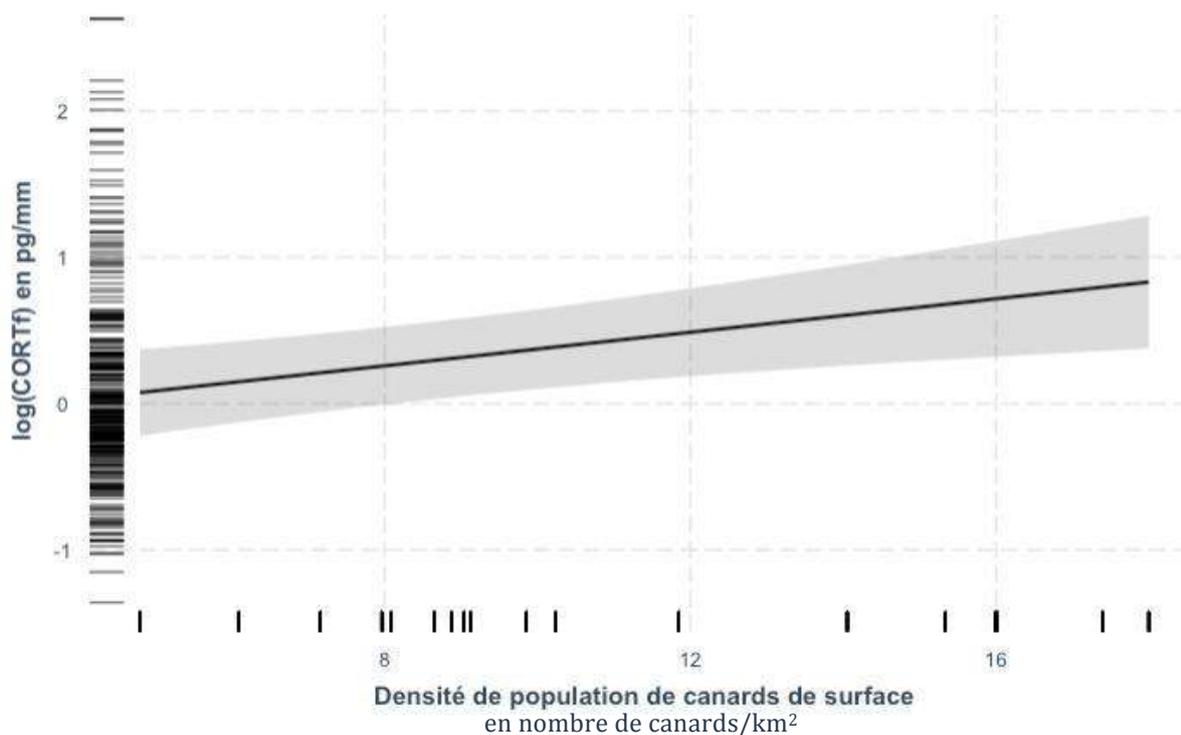
**Figure 2.35 Effet du sexe sur les niveaux de corticostérone dans les plumes (CORTf) après transformation logarithmique, chez les Sarcelles à ailes bleues.** Les valeurs prédites ont été calculées à partir du modèle final avec l'âge, l'année et la province fixés à adulte, 2017 et Alberta respectivement, et la densité de population de canards de surface fixée à sa moyenne. « F » = femelles ; « M » = mâles.



**Figure 2.36** Effet de l'année sur les niveaux de corticostérone dans les plumes (CORTf) après transformation logarithmique, chez les Sarcelles à ailes bleues. Les valeurs prédites ont été calculées à partir du modèle final avec l'âge, le sexe et la province fixés à adulte, femelle et Alberta respectivement, et la densité de population de canards de surface fixée à sa moyenne.



**Figure 2.37** Effet de la province sur les niveaux de corticostérone dans les plumes (CORTf) après transformation logarithmique, chez les Sarcelles à ailes bleues. Les valeurs prédites ont été calculées à partir du modèle final avec l'âge, le sexe et l'année fixés à adulte, femelle et 2017 respectivement, et la densité de population de canards de surface fixée à sa moyenne. « AB » = Alberta ; « SK » = Saskatchewan.



**Figure 2.38 Effet de la densité de population de canards de surface sur les niveaux de corticostérone dans les plumes (CORTf) après transformation logarithmique, chez les Sarcelles à ailes bleues.** Les valeurs prédites ont été calculées à partir du modèle final avec l'âge, le sexe, l'année et la province fixés à adulte, femelle, 2017 et Alberta respectivement. La distribution des données est présentée par des « rug plots » le long des axes.

**Bilan des facteurs de variation des niveaux de corticostérone dans les plumes (CORTf) chez la Sarcelle à ailes bleues dans les prairies canadiennes de 2007 à 2017, lors des rassemblements pré-migratoires.**

- Les facteurs spatio-temporels « Lieu de prélèvement » et « Année », ainsi que les variables climatiques de températures et vitesse du vent du 17 mai au jour du prélèvement, présentent une association avec les variations des niveaux de CORTf.
- Le portage d'hémosporidies aviaires n'est pas significativement associé aux niveaux de CORTf. Cependant, les individus avec une parasitémie moyenne ou élevée présentent, avec un risque majoré, des niveaux de CORTf plus élevés.
- Les individus adultes sont plus à risque de présenter des niveaux de CORTf élevés.
- Le modèle final retenu pour expliquer les variations des niveaux de CORTf inclut les variables « Année », « Province », « Age », « Sexe » et « Densité de population de canards de surface ». Ces deux dernières variables ne sont significativement associées aux niveaux de CORTf qu'après ajustement pour les autres variables, au sein du modèle final.

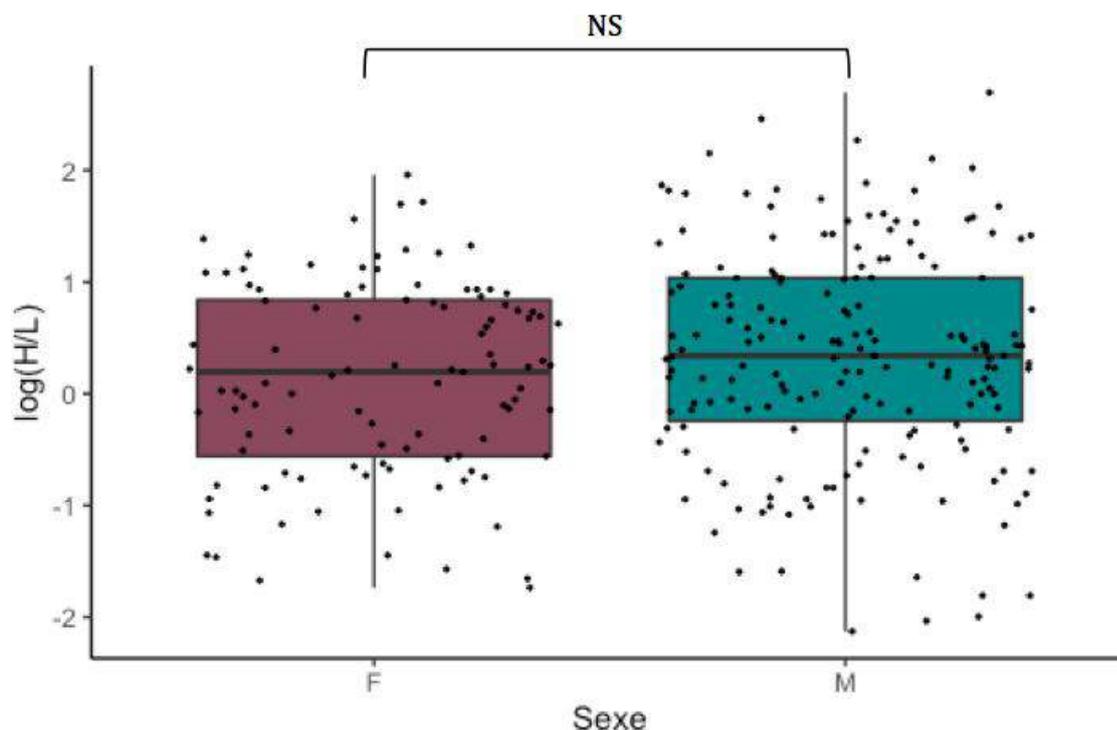
## b) Facteurs de variation du rapport H/L chez les Sarcelles à ailes bleues

Les valeurs du rapport H/L sont comprises entre 0,119 et 14,833, dans l'échantillon de Sarcelles à ailes bleues (n=288), sans différence significative entre mâles et femelles (n=288 ;  $t = -1,8546$  ;  $p\text{-value} = 0,06$ ) (Figure 2.39). Une différence significative est notée entre les individus juvéniles et adultes avec, à l'instar des niveaux de CORTf, des valeurs de rapport H/L plus élevées chez les adultes (n = 288 ;  $t = 5,9367$  ;  $p\text{-value} < 0,001$ ) (Figure 2.40).

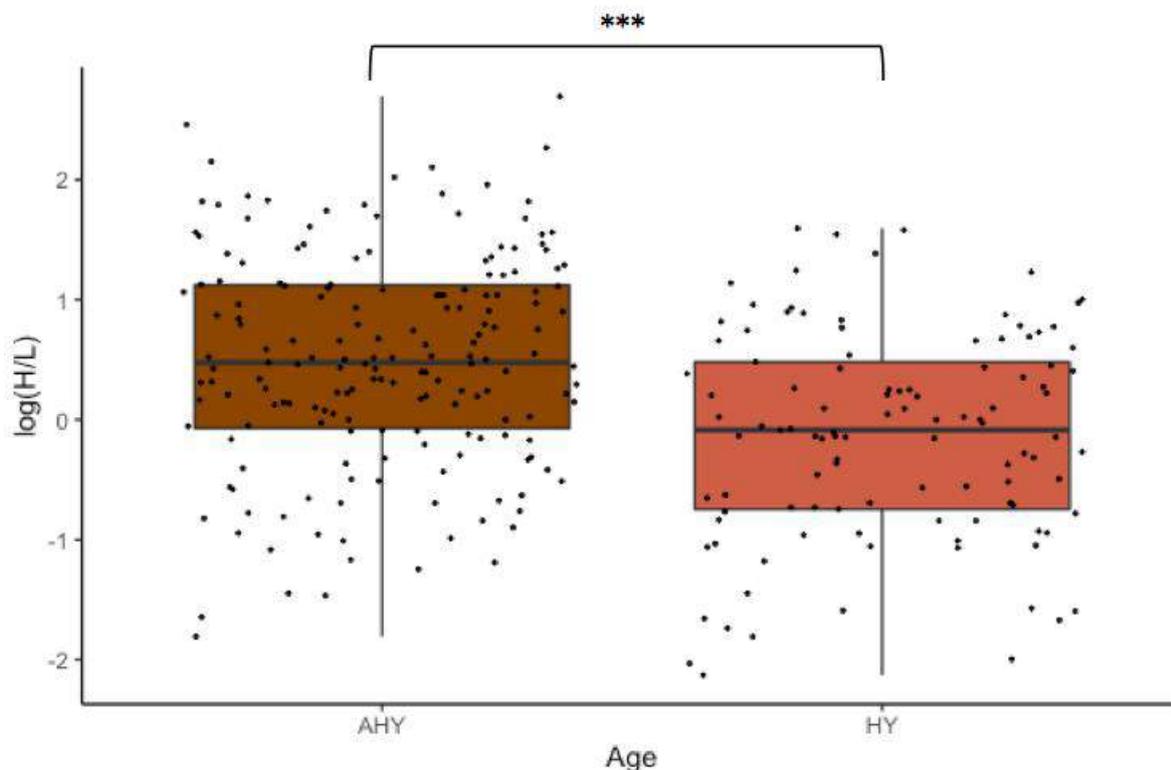
Le portage d'au moins un des genres d'hémosporidies est significativement associé avec des rapports H/L plus élevés (n = 288 ;  $t = -3,0693$  ;  $p\text{-value} = 0,002$ ) (Figure 2.41). De même, le portage de parasites du genre *Plasmodium* est associé à des rapports H/L majorés (n = 288 ;  $t = -2,2982$  ;  $p\text{-value} = 0,022$ ) (Figure 2.42). Aucune association significative n'est notée pour les genres *Haemoproteus* (n = 288 ;  $t = -1,6229$  ;  $p\text{-value} = 0,106$ ) et *Leucocytozoon* (n = 288 ;  $t = -0,9653$  ;  $p\text{-value} = 0,335$ ).

La parasitémie est associée avec les rapports H/L, tel que les sarcelles ayant une parasitémie faible sont plus à risque d'avoir des rapports élevés par rapport à ceux n'ayant pas d'hémosporidies mises en évidence (OR = 1,35 ; 95% IC = [1,08 ; 1,69],  $p\text{-value} = 0,01$ ). De même, les individus ayant une parasitémie moyenne ou élevée sont plus à risque d'avoir des rapport H/L élevés mais la différence est non significative (OR = 1,70 ; 95% IC = [0,99 ; 2,92],  $p\text{-value} = 0,054$ ) (Figure 2.43).

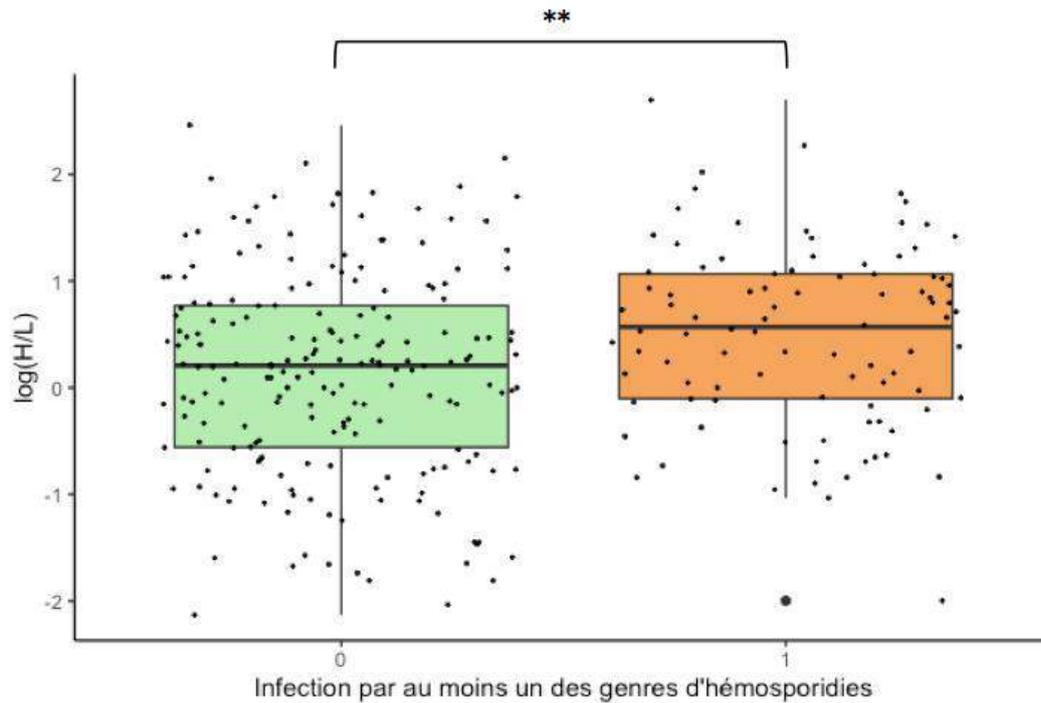
Le fait d'avoir deux genres d'hémoparasites entraînerait des rapports H/L plus élevés, mais la différence est non significative (OR = 1,48 ; 95%IC = [0,74 ; 2,98] ;  $p\text{-value} = 0,3$ ), avec un effectif faible d'individus présentant deux genres (n = 7) (Figure 2.44).



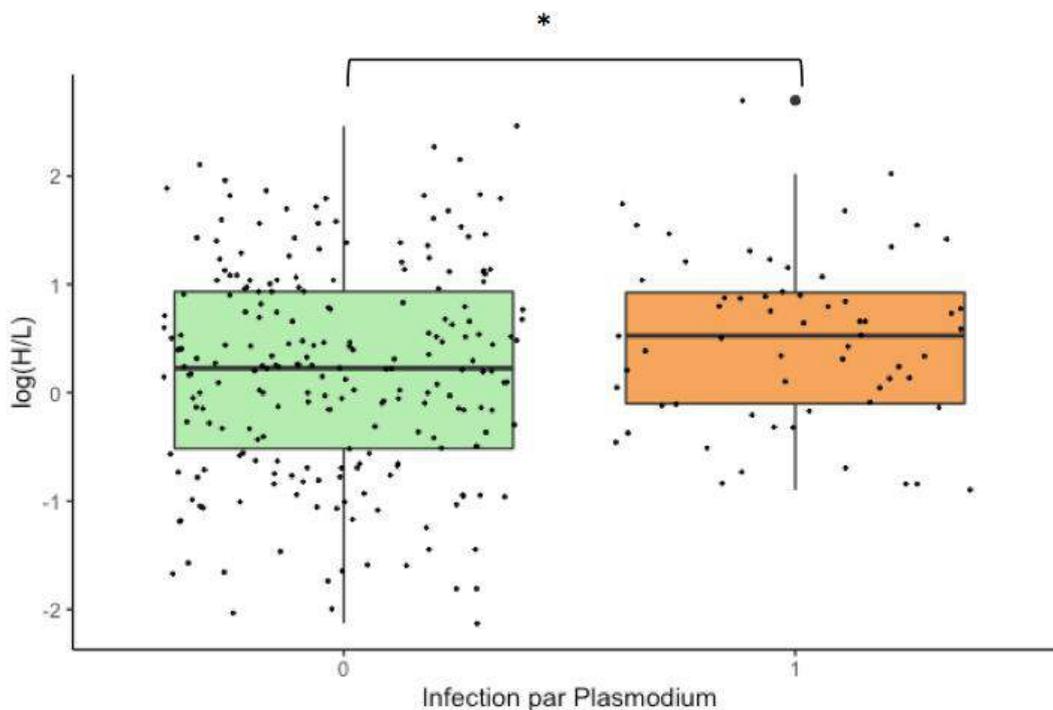
**Figure 2.39 Rapport hétérophiles sur lymphocytes (H/L) selon le sexe chez les Sarcelles à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2008 à 2017 en excluant 2011.** Les rapports H/L ont subi une transformation logarithmique et sont comparés entre mâles (« M » ; n = 183) et femelles (« F » ; n = 105).



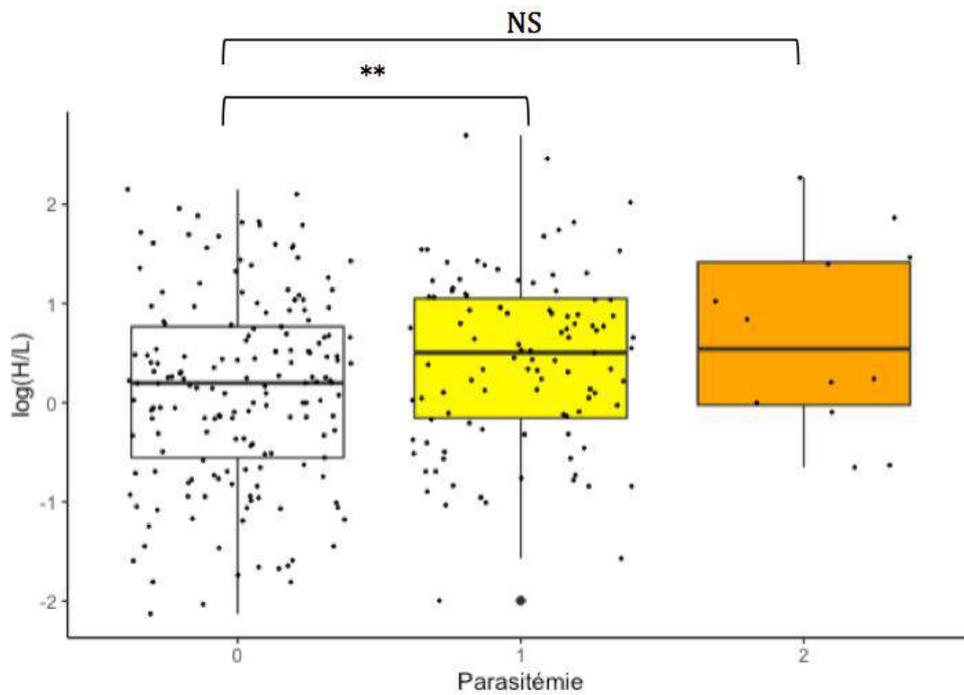
**Figure 2.40 Rapport hétérophiles sur lymphocytes (H/L) selon l'âge chez les Sarcelles à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2008 à 2017 en excluant 2011.** Les rapports H/L ont subi une transformation logarithmique et sont comparés entre adultes (« AHY » ; n = 179) et juvéniles (« HY » ; n = 109).



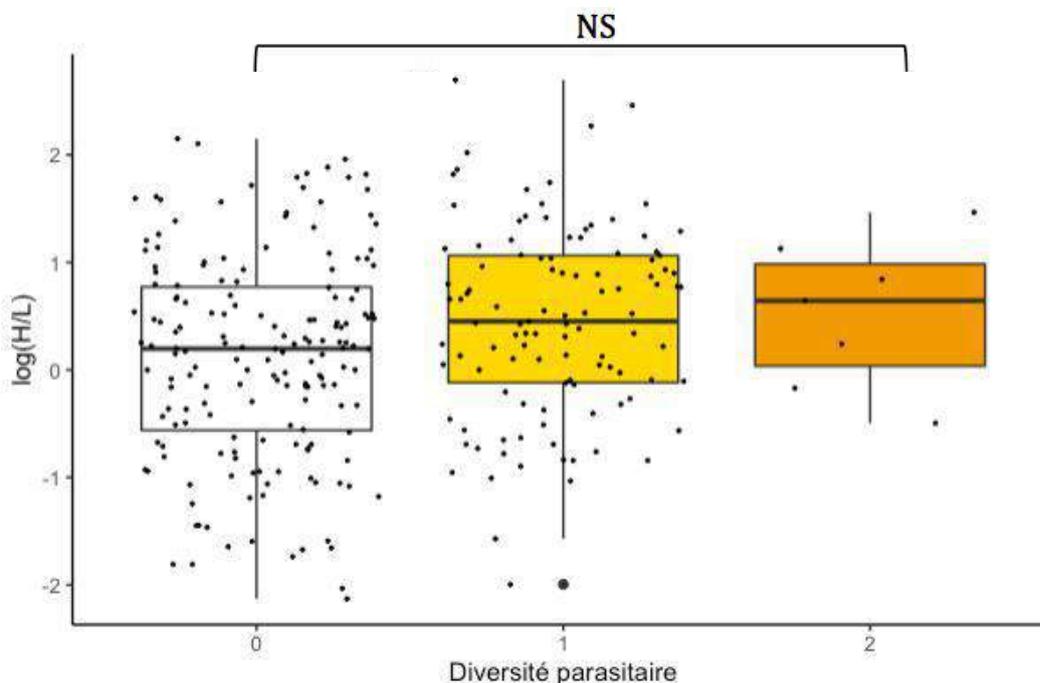
**Figure 2.41 Rapport hétérophiles sur lymphocytes (H/L) en fonction du portage d'au moins un genre d'hémosporidies chez les Sarcelles à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2008 à 2017 en excluant 2011.** Les rapports H/L ont subi une transformation logarithmique et sont comparés entre les individus non porteurs (« 0 » ; n = 194) et ceux porteurs d'au moins un genre d'hémosporidies (« 1 » ; n = 94).



**Figure 2.42 Rapport hétérophiles sur lymphocytes (H/L) en fonction du portage de *Plasmodium* chez les Sarcelles à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2008 à 2017 en excluant 2011.** Les rapports H/L ont subi une transformation logarithmique et sont comparés entre les individus non porteurs (« 0 » ; n = 226) et ceux porteurs d'au moins un genre d'hémosporidies (« 1 » ; n = 62).



**Figure 2.43 Rapport hétérophiles sur lymphocytes (H/L) en fonction de la parasitémie chez les Sarcelles à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2008 à 2017 en excluant 2011.** Les rapports H/L ont subi une transformation logarithmique et sont comparés entre les individus non porteurs d'hémosporidies (« 0 » ; n = 173), les individus présentant une parasitémie faible (« 1 » ; n = 103) et ceux présentant une parasitémie moyenne ou élevée (« 2 » ; n = 12).



**Figure 2.44 Rapport hétérophiles sur lymphocytes (H/L) en fonction de la diversité parasitaire chez les Sarcelles à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2008 à 2017 en excluant 2011.** Les rapports H/L ont subi une transformation logarithmique et sont comparés entre les individus non porteurs d'hémosporidies (« 0 » ; n = 173), les individus porteurs d'un genre parasitaire (« 1 » ; n = 109) et ceux porteurs de 2 genres parasitaires (« 2 » ; n = 7).

Le modèle final obtenu, après analyse statistique (Annexe 6) pour expliquer les variations des rapports H/L observées (variable continue « log(H/L) » correspondant au rapport hétérophiles sur lymphocytes après transformation logarithmique) contient les variables explicatives suivantes :

- Âge (« Age » - HY ou *Hatch Year* correspondant aux individus juvéniles nés l'année de la capture ; AHY ou *After Hatch Year* correspondant aux sarcelles adultes de plus d'un an) ;
- Année de prélèvement (« Year » - de 2008 à 2017, en excluant 2011)
- Résidus de la densité de Sarcelles à ailes bleues (« resBWTE\_Density », variable continue obtenue par calcul des résidus de la régression linéaire de la densité de Sarcelles à ailes bleues sur la densité en étendues d'eau peu profondes)
- Infection par au moins un des genres d'hémosporidies (« Haematozoa », variable binaire, 0 : absence de portage, 1 : portage)
- Indice de condition corporelle (« BCIndex », variable continue correspondant à la masse corporelle prédite selon la méthode décrite partie II.B.4.)

**Tableau II.XIV Caractéristiques du modèle de régression logistique multiple final retenu, avec les variables susceptibles d'expliquer les variations des rapports hétérophiles sur lymphocytes (H/L) chez les Sarcelles à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2008 à 2017, en excluant 2011 (n=288).**

Variable	N	Estimate	p
<b>Year</b>			
2017	29	Reference	
2008	30	-0.12 (-0.53, 0.29)	0.573
2009	31	-0.35 (-0.75, 0.05)	0.085
2010	30	0.60 (0.18, 1.02)	0.006
2012	43	-0.50 (-0.89, -0.10)	0.015
2013	40	-0.11 (-0.51, 0.29)	0.588
2014	30	-0.61 (-1.01, -0.21)	0.003
2015	26	-0.71 (-1.14, -0.27)	0.002
2016	29	-0.81 (-1.21, -0.40)	<0.001
<b>Age</b>			
AHY	179	Reference	
HY	109	-0.65 (-0.85, -0.44)	<0.001
<b>resBWTE_Density</b>	288	0.24 (0.12, 0.35)	<0.001
<b>Haematozoa</b>	288	0.24 (0.04, 0.44)	0.020
<b>BCIndex</b>	288	-0.00 (-0.01, -0.00)	<0.001
<b>(Intercept)</b>		2.34 (1.46, 3.23)	<0.001

Abréviations : N = nombre d'individus ; AHY = « *After Hatch Year* » ou adultes ; HY = « *Hatch Year* » ou juvéniles ; Year = Année de prélèvement, avec 2017 comme année de référence ; Haematozoa = Portage d'au moins un genre d'hémosporidies avec 0 = absence de portage et 1 = portage ; resBWTE\_Density = Résidus de la densité de Sarcelles à ailes bleues ; BCIndex = Indice de condition corporelle.

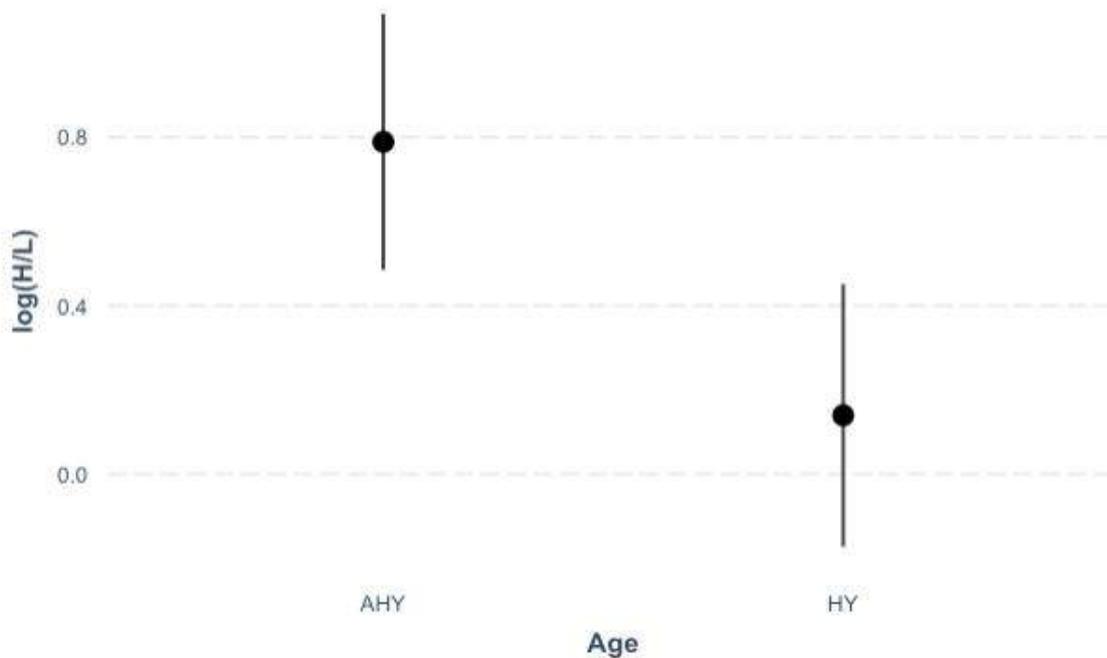
Le modèle statistique retenu est présenté sur le Tableau II.XIV. Le risque d'avoir des rapports H/L élevés est diminué chez les juvéniles (OR = 0,52 ; 95% IC = [0,43 ; 0,64] ; *p-value* < 0,001), les autres variables du modèle étant fixées (Figure 2.45).

Des niveaux plus élevés du rapport H/L sont associés à l'année 2010 (OR = 1,82 ; 95%IC = [1,31 ; 2,45], *p-value* = 0,006), et des niveaux plus faibles sont associés à 2012 (OR = 0,61 ; 95%IC = [0,41 ; 0,91], *p-value* = 0,015), 2014 (OR = 0,54 ; 95%IC = [0,36 ; 0,81], *p-value* = 0,003), 2015 (OR = 0,49 ; 95%IC = [0,32 ; 0,76], *p-value* = 0,002) et 2016 (OR = 0,45 ; 95%IC = [0,30 ; 0,67], *p-value* < 0,001), avec 2017 comme année de référence et les autres variables constantes (Figure 2.46).

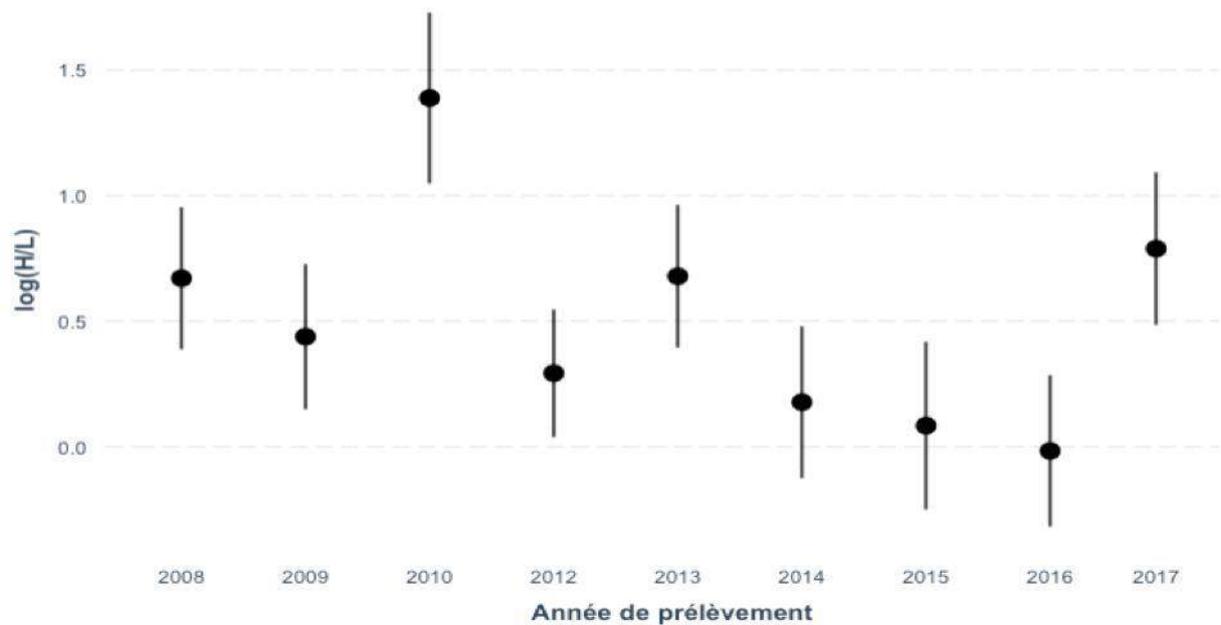
Les résidus de densité de Sarcelles à ailes bleues sont positivement associés aux rapports H/L (OR = 1,27 ; 95%IC = [1,13 ; 1,42], *p-value* < 0,001), tel que des densités plus importantes sont associées à des rapports H/L plus élevés (Figure 2.47).

Les rapports H/L sont majorés lors de portage d'au moins un genre d'hémosporidies chez les Sarcelles à ailes bleues (OR = 1,27 ; 95%IC = [1,04 ; 1,55], *p-value* = 0,020) (Figure 2.48).

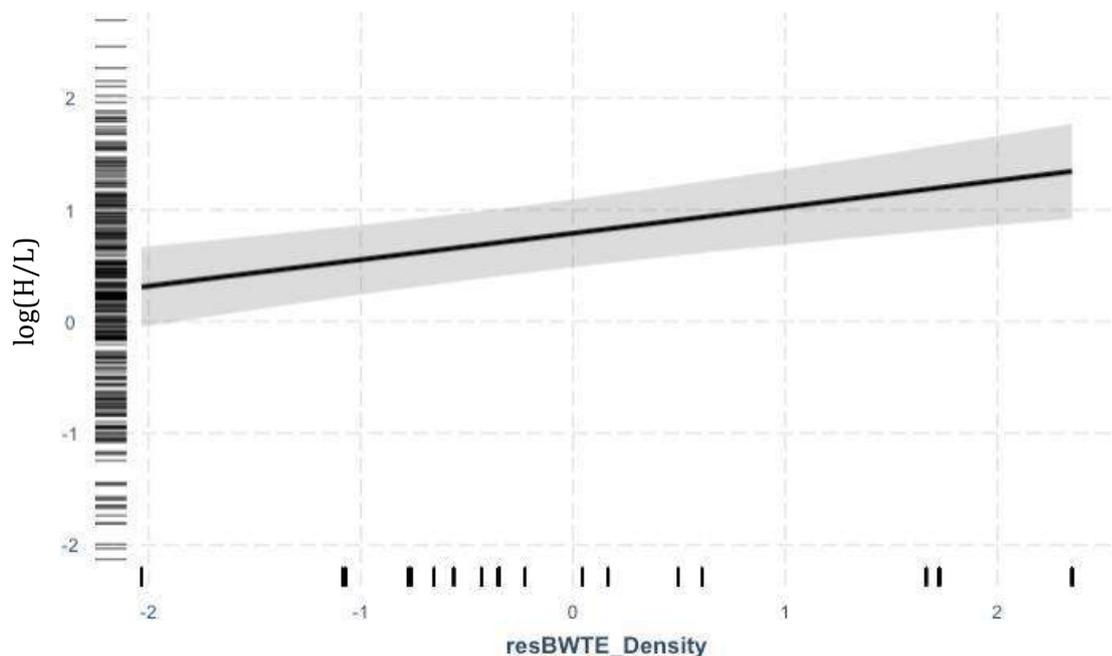
Les rapports H/L sont également corrélés à l'indice de condition corporelle, tel que les sarcelles présentant un index de condition corporelle plus faible sont plus à risque d'avoir des rapports H/L élevés (OR = 0,9956 ; 95% IC = [0,9935 ; 0,9977] ; *p-value* < 0,001) (Figure 2.49).



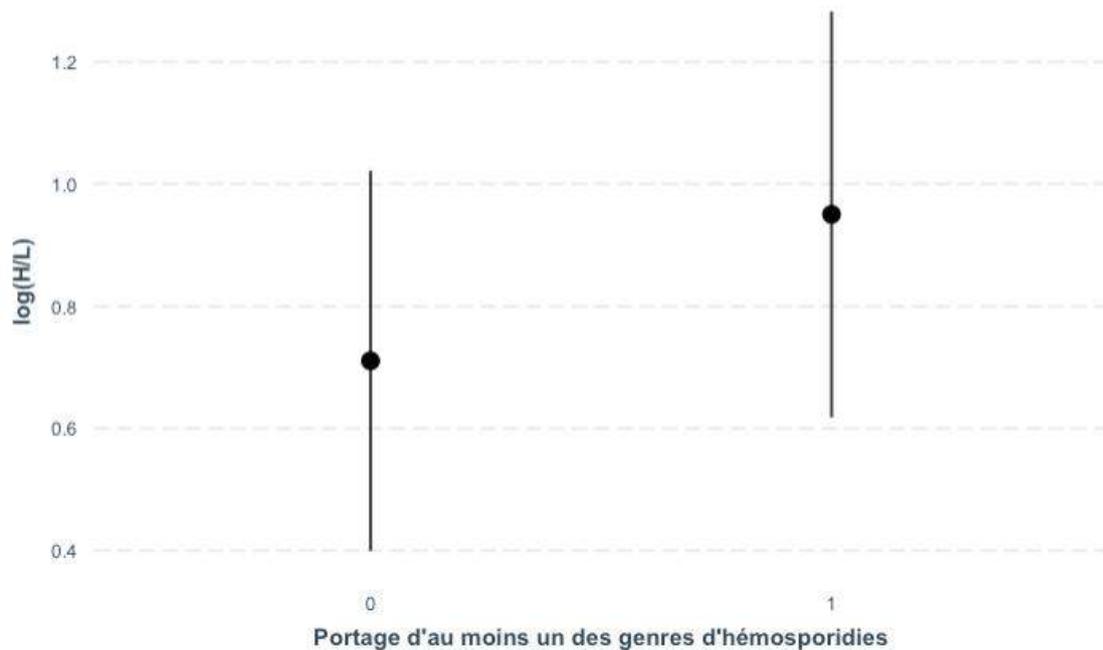
**Figure 2.45 Effet de l'âge sur les rapports H/L après transformation logarithmique, chez les Sarcelles à ailes bleues.** Les valeurs prédites ont été calculées à partir du modèle final avec l'année et « Haematozoa » fixés à 2017 et 0 respectivement, et avec « BCIndex » et « resBWTE\_Density » fixés à leurs moyennes respectives. « AHY » = adultes ; « HY » = juvéniles.



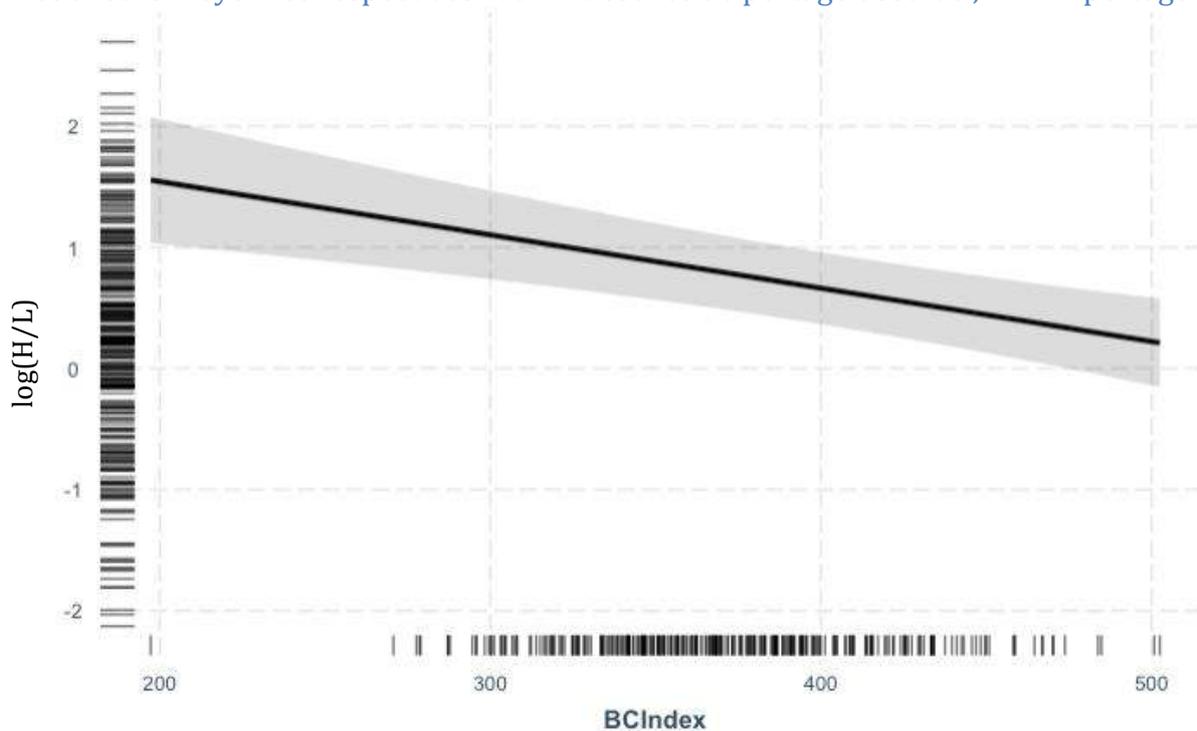
**Figure 2.46** Effet de l'année sur les rapports H/L après transformation logarithmique, chez les Sarcelles à ailes bleues. Les valeurs prédites ont été calculées à partir du modèle final avec l'âge et « Haematozoa » fixés à adulte et 0 respectivement, et avec « BCIndex » et « resBWTE\_Density » fixés à leurs moyennes respectives.



**Figure 2.47** Effet des résidus de densité de Sarcelles à ailes bleues sur les rapports H/L après transformation logarithmique, chez les Sarcelles à ailes bleues. Les valeurs prédites ont été calculées à partir du modèle final avec l'âge, l'année et « Haematozoa » fixés à adulte, 2017 et 0 respectivement, et avec « BCIndex » fixé à sa moyenne. La distribution des données est présentée par des « rug plots » le long des axes. « resBWTE\_Density » = Résidus de densité de Sarcelles à ailes bleues obtenus après régression linéaire de la densité de Sarcelles à ailes bleues en fonction de la densité en étendues d'eau peu profondes ; log(H/L) = rapport hétérophiles sur lymphocytes après transformation logarithmique.



**Figure 2.48 Effet du portage d'au moins un des genres d'hémosporidies sur les rapports H/L après transformation logarithmique, chez les Sarcelles à ailes bleues.** Les valeurs prédites ont été calculées à partir du modèle final avec l'année et l'âge fixés à 2017 et adulte respectivement, et avec « BCIndex » et « resBWTE\_Density » fixés à leurs moyennes respectives. « 0 » = absence de portage observé ; « 1 » = portage.



**Figure 2.49 Effet de l'indice de condition corporelle sur les rapports H/L après transformation logarithmique, chez les Sarcelles à ailes bleues.** Les valeurs prédites ont été calculées à partir du modèle final avec l'âge, l'année et « Haematozoa » fixés à adulte, 2017 et 0 respectivement, et avec « resBWTE\_Density » fixé à sa moyenne. La distribution des données est présentée par des « rug plots » le long des axes. « BCIndex » = Indice de condition corporelle ; log(H/L) = rapport hétérophiles sur lymphocytes après transformation logarithmique.

**Bilan des facteurs de variation du rapport hétérophiles sur lymphocytes (H/L) chez la Sarcelle à ailes bleues dans les prairies canadiennes de 2007 à 2017, lors des rassemblements pré-migratoires.**

- Les facteurs spatio-temporels « Lieu de prélèvement » et « Année », ainsi que les variables climatiques de températures (moyennes, maximales) et vitesse du vent du 17 mai au jour du prélèvement, présentent une association avec les variations des rapports H/L.
- Le portage d'au moins un genre d'hémosporidies aviaires, ainsi que le portage du genre *Plasmodium*, sont significativement associés aux rapports H/L. Le portage des genres *Haemoproteus* ou *Leucocytozoon* n'est pas associé à des élévations significatives.
- Les individus adultes sont plus à risque de présenter des rapports H/L élevés.
- Le fait de présenter un faible indice de condition corporelle est associé à des rapports H/L plus élevés pour les sarcelles de l'étude.
- Le modèle final retenu pour expliquer les variations des rapports H/L inclut les variables « Année », « Âge », « Portage d'au moins un genre d'hémosporidies aviaires », « Résidus de densité de Sarcelles à ailes bleues » et « Indice de condition corporelle ». Les résidus de densité de Sarcelles à ailes bleues apportent plus au modèle que la densité de Sarcelles à ailes bleues.

**Bilan sur les facteurs de stress responsables d'élévation des niveaux de CORTf et du rapport H/L chez la Sarcelle à ailes bleues dans les prairies canadiennes de 2007 à 2017, lors des rassemblements pré-migratoires (Objectif 2b).**

- Les facteurs spatio-temporels « Année » et « Lieu de prélèvement », ainsi que les variables climatiques de températures (moyennes, maximales) et vitesse du vent du 17 mai au jour du prélèvement, sont associés à la fois aux niveaux de CORTf et aux rapports H/L.
- Le portage d'hémosporidies aviaires est significativement associé à des élévations du rapport H/L, mais cette association significative n'est pas retrouvée avec les niveaux de CORTf.
- La présence de deux genres différents d'hémosporidies n'entraîne pas d'élévation significative des niveaux de CORTf, ou du rapport H/L. Une parasitémie moyenne ou élevée montre une corrélation positive avec les niveaux de CORTf.
- Les individus adultes sont plus à risque que les juvéniles de présenter des élévations des niveaux de CORTf et du rapport H/L.
- Une faible condition corporelle est associée à un rapport H/L majoré, mais pas à des élévations des niveaux de CORTf.
- Des élévations de ces deux marqueurs du stress sont notées lors d'augmentation des variables de densité : densité de population de canards de surface pour les niveaux de CORTf et densité de Sarcelles à ailes bleues pour les rapports H/L.

## D. Discussion

Cette étude expérimentale présentait deux objectifs :

- Acquérir de nouvelles connaissances quant à l'épidémiologie des hémospories aviaires chez la Sarcelle à ailes bleues dans les prairies canadiennes, via la détermination des prévalences apparentes, et l'analyse des facteurs de risque intrinsèques et environnementaux associés au portage ;
- Étudier les perturbations environnementales ou facteurs de stress qui seraient responsables d'élévation des niveaux de corticostérone dans les plumes et/ou des rapports hétérophiles sur lymphocytes chez la Sarcelle à ailes bleues.

### 1. Limites liées aux matériel et méthodes :

L'échantillon aléatoire de départ était constitué de 351 sarcelles pour lesquelles les frottis sanguins ont été examinés à la recherche d'hémoparasites et à partir desquelles les prévalences apparentes ont été déterminées. Le choix a été fait d'examiner les frottis sanguins colorés de 15 individus choisis aléatoirement par province et par année. Ce choix était lié à des contraintes temporelles et financières. La qualité insuffisante des frottis sanguins en 2011, ainsi qu'en 2015 et 2016, a conduit à l'exclusion d'une partie des individus de l'étude. En effet, la réalisation des frottis sanguins avait lieu lors des campagnes de capture et de prélèvements, par différents opérateurs, et sous des conditions météorologiques parfois difficiles. Cela a pu avoir pour conséquence la production de frottis de qualité insuffisante pour permettre la recherche d'hémospories de manière sensible. Pour les années 2012 et 2013, 50 sarcelles, dont les frottis avaient préalablement été examinés afin de comparer la sensibilité de la lecture de frottis et de la PCR, ont été incluses dans l'étude. Lors de l'extraction au méthanol et de la mesure par méthode ELISA de la corticostérone des plumes, une erreur de manipulation a conduit à l'exclusion de 13 sarcelles dont les frottis sanguins avaient déjà été examinés.

Après remodelage des données, l'effectif de Sarcelles à ailes bleues retenu pour l'analyse des facteurs de risque impliqués dans le portage d'hémospories et pour l'analyse des facteurs de stress s'élevait donc à 288 individus. Si cela représente un effectif global non négligeable, **l'effectif est restreint pour certaines variables**, et ce malgré la manipulation des données. Ainsi, le nombre de sarcelles chez qui la présence d'*Haemoproteus* ou de *Leucocytozoon* a été mise en évidence s'élève respectivement à 12 et 19 individus. De même, seuls 12 individus présentaient une parasitémie moyenne ou élevée, et seulement 7 individus sur 288 étaient infectés par deux genres différents d'hémospories. Il est alors possible que certaines associations n'aient pu être mises en évidence d'un point de vue statistique.

Les Sarcelles à ailes bleues incluses dans l'étude étaient échantillonnées à partir de sarcelles uniquement capturées la journée grâce à des **pièges à appâts classiques en août, lors des rassemblements pré-migratoires** et lors des campagnes d'identification. Les raisons de ce choix étaient multiples. En premier lieu, c'était un choix logistique permettant l'accès à un grand effectif d'oiseaux et la possibilité de travailler avec une équipe certifiée et spécialisée dans le baguage et l'identification de l'âge et du sexe via le plumage. Cela facilitait également l'obtention de permis car les prélèvements étaient réalisés dans le cadre des campagnes de baguage. Cela permettait aussi d'avoir accès à l'équipement adapté nécessaire à une capture non-vulnérante, à savoir les pièges et les boîtes flottantes, et permettait ainsi une réduction des coûts. La seconde raison était donc une raison financière. Enfin, ce choix était également éthique avec la volonté de limiter le stress lié à la capture et à la manipulation, et ses conséquences. Les sarcelles n'étaient en effet manipulées qu'une seule fois sur les aires de reproduction, la même année, pour la mise en place d'une bague et la réalisation de prélèvements. Ces derniers étaient ensuite utilisés pour plusieurs études (recherche de parasites sanguins, recherche du virus de l'influenza aviaire par RT-PCR et du virus de *West Nile* par méthode ELISA) avec une partie des prélèvements stockés pour d'éventuels futurs travaux. De plus, la sélection de la période pré-migratoire permettait de ne pas capturer les oiseaux lors de la période critique de nidification, avec le risque ensuite de désertion des nids (Putman, 1995).

Cependant, dans le cadre de l'étude des hémospodidies aviaires, ce choix pourrait influencer différents résultats, notamment concernant l'estimation de la prévalence et de la parasitémie. La période de rassemblement pré-migratoire pourrait ne pas être la plus optimale pour la détection d'hémospodidies. Lors de la période de transmission active au printemps et suite au stress induit par la migration, des rechutes surviennent chez les individus infectés de manière latente ou chronique. Ces rechutes de printemps, bien documentées pour *Plasmodium relictum*, *Haemoproteus nettionis* et *Leucocytozoon simondi*, sont à l'origine d'une augmentation du nombre de gamétocytes circulants et donc d'une élévation de la parasitémie transitoire, suivie ensuite généralement par une diminution progressive de cette parasitémie (Atkinson *et al.*, 2008; Valkiūnas, 2005). À ces rechutes, s'ajoute l'infection d'individus naïfs, dont la phase aiguë est caractérisée par des parasitémies élevées. Le fait de **prélever les sarcelles de manière décalée par rapport à ce potentiel pic de charge parasitaire** pourrait diminuer la sensibilité de détection des hémospodidies par lecture de frottis sanguin, avec le risque de sous-estimer la prévalence par catégorisation erronée d'individus infectés en non-infectés (Lachish and Murray, 2018).

De plus, la capture des sarcelles à l'aide de pièges à appâts classiques pourrait être à l'origine du **prélèvement d'une majorité d'individus infectés chroniques ou latents avec une parasitémie faible, alors que les individus ayant une infection aiguë serait très peu représentés** (Valkiūnas, 2005). Cela pourrait notamment s'expliquer par le fait que les individus avec une parasitémie moyenne ou élevée seraient plus inactifs et donc moins capturés par les méthodes classiques. Cette baisse d'activité locomotrice a été observée expérimentalement chez de jeunes Pinsons des arbres

(*Fringilla coelebs*) lors du pic de parasitémie (Valkiūnas, 2005). De plus, une partie des individus peut ne pas survivre à la phase aiguë d'hémosporidiose (Atkinson and Van Riper III, 1991) et ne sera ainsi pas capturée ultérieurement en août. La majorité des individus prélevés serait donc des individus actifs, capables de se déplacer pour entrer et venir se nourrir dans le piège à appâts.

Un autre aspect de la capture via des pièges à appâts est la **possibilité d'obtenir un ratio mâle-femelle différent de celui de la population totale**, avec une probabilité plus forte de capturer des mâles rapportée dans de nombreuses études (Cooper *et al.*, 2019 ; Lovász *et al.*, 2018). Ce potentiel biais lié à la méthode de capture serait possible chez les Anatidés du fait de différences comportementales entre les deux sexes. Les mâles initient leur mue de manière anticipée par rapport aux femelles avec progénitures, et se rassemblent massivement sur de larges étendues d'eau peu profondes avec les femelles sans progéniture et une partie des juvéniles (Catry *et al.*, 2006 ; Rohwer and Anderson, 1988). Ce phénomène, connu sous le terme de migration de mue (« *moult migration* »), favoriserait la capture préférentielle de mâles dans les pièges installés sur les étendues d'eau au début des rassemblements pré-migratoires.

De même, les pièges à appâts pourraient également **biaisier le rapport adulte-juvénile**, en faveur des adultes comme cela a pu être décrit dans des populations de passereaux (Domènech and Senar, 1997). Ce phénomène pourrait s'expliquer par une acquisition d'expérience avec l'âge des pièges à appâts et de leur fonctionnement. Le comportement inverse avec la création d'une aversion aux pièges est rapporté chez des Gobemouches noirs (*Ficedula hypoleuca*), faisant basculer le rapport en faveur des juvéniles (Camacho *et al.*, 2017).

La recherche de portage d'hémosporidies des genres *Haemoproteus*, *Leucocytozoon* et *Plasmodium*, a été réalisée par **lecture au microscope optique de frottis sanguins colorés à la coloration de Wright Giemsa**, technique classiquement utilisée pour la détection de ces hémoparasites (Martinsen *et al.*, 2008 ; Rush *et al.*, 2016 ; Townsend *et al.*, 2018 ; Valkiūnas *et al.*, 2008). La méthode utilisée est décrite précédemment dans la partie II.B.3.b. Le même opérateur a scanné l'ensemble des lames de l'étude pour rechercher la présence d'hémoparasites. Plusieurs études ont montré une sensibilité similaire entre la lecture de frottis sanguin au microscope selon cette méthode, et la méthode PCR (Braga *et al.*, 2011 ; Tostes *et al.*, 2015 ; Valkiūnas *et al.*, 2014, 2008). Afin de déterminer si la sensibilité était similaire dans le cadre de notre étude, les **prévalences obtenues par microscopie et par PCR ont été comparées** pour les Sarcelles à ailes bleues en Saskatchewan et Alberta en 2012 et 2013, deux années pour lesquelles les données moléculaires étaient disponibles, suite à l'étude réalisée par Ramey et son équipe (Ramey *et al.*, 2016). Parmi les sarcelles de la base de données commune aux deux études, un échantillon aléatoire de 46 et 50 sarcelles, pour 2012 et 2013 respectivement, a été réalisé pour la lecture de frottis sanguins. Les résultats de ce travail préliminaire sont présentés en Annexe 7. Aucune différence significative de prévalence n'est notée pour aucun des genres d'hémosporidies (Annexe 7.B).

L'obtention de prévalences sensiblement similaires et l'écart de coût entre les deux méthodes ont fait opter pour le choix de la microscopie optique comme méthode de diagnostic. De plus, la méthode PCR serait moins sensible lors de co-infections par des hémospories, notamment entre les genres *Haemoproteus* et *Plasmodium* (Valkiūnas *et al.*, 2008). La méthode PCR peut aussi être à l'origine de faux positifs (Valkiūnas *et al.*, 2014).

La microscopie optique serait cependant insuffisante pour détecter une infection par des hémospories dans les situations où la parasitémie serait exceptionnellement faible avec seulement quelques parasites par frottis. Le risque, malgré l'examen minutieux et prolongé de la lame, serait de ne pas détecter la présence de parasites dans ce cas, et donc d'être à l'origine de faux négatifs (Valkiūnas *et al.*, 2008). Cette **sensibilité moindre lors de très faibles charges parasitaires** est aussi retrouvée, mais dans une moindre mesure, par recherche PCR (Lachish and Murray, 2018). Le nombre de portages chroniques ou latents pourrait donc être également sous-estimé par PCR, par non-détection des très faibles charges parasitaires.

Le fait de prélever les oiseaux à différentes heures de la journée, par choix logistique, nécessite d'interpréter la parasitémie avec circonspection, car certaines espèces d'hémospories entraîneraient des variations journalières cycliques de cette parasitémie (Valkiūnas, 2005). Ces variations journalières de la parasitémie pourraient être également responsables d'une sous-estimation de la prévalence.

La spécificité de la microscopie optique est bonne lorsque le choix est fait de distinguer seulement les genres d'hémospories, comme dans cette étude. La détermination de l'espèce au sein d'un genre est en effet difficile par microscopie du fait d'un **cryptisme taxonomique**, à savoir une analogie phénotypique forte malgré les différences génétiques (Lachish and Murray, 2018). Notamment, la microscopie ne permet pas toujours d'identifier *Plasmodium* à l'échelle de l'espèce en cas d'infection chronique (Valkiūnas, 2005). Le choix a donc été fait de ne **caractériser que les genres d'hémospories** lors de la lecture des lames, au risque de masquer de possibles associations ou impacts spécifiques à certaines espèces d'hémospories. Par exemple, dans l'étude menée par Lachish et son équipe, l'impact du parasitisme sur les Mésanges bleues (*Cyanistes caeruleus*) différerait selon l'espèce du genre *Plasmodium*, avec une diminution du taux de survie en cas d'infection par *Plasmodium circumflexum*, et un impact sur la fonction reproductrice avec *Plasmodium relictum* (Lachish *et al.*, 2011).

Une des limites de l'étude était la **coloration différée des frottis sanguins pour les années 2014 à 2017**. Le délai entre l'étalement et la coloration entraîne une modification du pH des frottis sanguins et les cellules ont tendance à être teintées d'une couleur bleue trop intense (Valkiūnas *et al.*, 2008). La qualité de coloration des lames en est alors réduite, avec une détection des gamétocytes des genres *Plasmodium* et *Haemoproteus* rendue plus difficile. Les lames de qualité jugée insuffisante étaient exclues de l'étude.

Afin de limiter les sources d'erreur de répétabilité, un seul manipulateur a réalisé la lecture de l'ensemble des frottis sanguins de l'étude pour la recherche des parasites sanguins, et un seul manipulateur a procédé à la réalisation des plaques ELISA pour la mesure des niveaux de CORTf.

La durée de l'étude, réalisée sur dix ans, permet la collection de données sur une période relativement longue. Cependant, cette durée pourrait être insuffisante pour mettre en évidence certains motifs de variation de prévalence, notamment liés aux changements climatiques.

La variable temporelle « Année » a été incluse dans les modèles comme variable explicative à effet fixe. Ce choix permettait d'évaluer d'éventuels motifs temporels de variation de prévalence de portage d'hémosporidies. Cependant, le risque est d'absorber des variations annuelles liées à d'autres variables avec une plus grande signification biologique, comme la température moyenne, qui ne seraient alors pas retenues dans le modèle final obtenu par comparaison des AIC<sub>c</sub>.

Le fait de mesurer les **niveaux de corticostérone dans les plumes à partir de la deuxième rectrice à droite** a plusieurs conséquences sur l'interprétation de la réponse au stress des oiseaux. Chez les oiseaux du genre *Anas*, la mue est asynchrone entre les plumes de vol et les plumes de couverture. Selon le type de plume prélevé (vol ou couverture), les niveaux de corticostérone, intégrés durant la croissance de la plume, seraient donc différents et refléteraient des périodes différentes chez l'individu (Romero and Fairhurst, 2016). Dans l'étude, les mesures de corticostérone ne correspondent donc **qu'aux périodes de croissance des plumes de vol**. Cependant, au contraire d'une majorité de familles d'oiseaux, la mue des plumes de vol est synchrone chez les Anatidés, les rendant incapables de voler jusqu'à la repousse (Fox *et al.*, 2014). Les niveaux de corticostérone intégrés dans les plumes de vol sont donc supposés représenter la même période de vie pour une sarcelle donnée. Le choix a cependant été fait de prélever la deuxième rectrice à droite chez tous les individus par souci de comparaison.

Dans notre étude, les prélèvements sont réalisés pendant la période de mue. **Les titres en corticostérone dans les plumes ne seraient alors représentatifs que d'une période limitée à la fin de la période de reproduction**, et non à la majorité du cycle annuel des sarcelles (Romero and Fairhurst, 2016). Pour les mâles de l'espèce *Anas discors*, les plumes de couverture sont remplacées de mi-juin à début juillet, suivies par le remplacement des rectrices et rémiges de mi-juillet à mi-août (DuBowy 1985). La mue des femelles débute généralement plus tardivement (Rohwer *et al.*, 2002). Ainsi, la mesure intégrée du stress via la titration de la corticostérone dans les plumes est limitée dans notre étude à l'analyse des **perturbations subies dans les deux derniers mois de la période de reproduction**.

Une autre limite de la présente étude est **l'absence d'informations sur l'abondance et la distribution spatio-temporelle des populations de vecteurs compétents** aux sites de prélèvements. Ainsi, il n'est pas possible de déterminer si les variables climatiques mesurées ont un impact réel sur les populations de vecteurs et si les modifications de prévalence observées sont en lien avec des modifications d'abondance ou de distribution de ces vecteurs.

## 2. Synthèse des résultats obtenus

### a) Description de l'échantillon et des effectifs

Le « *sex ratio* » observé dans l'étude, avec 64,1% de mâles contre 35,9% de femelles, est significativement en faveur des mâles (test du Khi-2 ; *p-value* < 0,001 ; n = 351).

Une différence significative (test du Khi-2 ; *p-value* < 0,001 ; n = 351) du nombre de juvéniles (40,5%) et d'adultes (59,5%) dans l'étude est également présente.

Ces différences pourraient refléter des différences réelles dans la population de Sarcelles à ailes bleues, ou être une conséquence de biais de capture comme décrit précédemment.

Une étude, menée à grande échelle sur la Sarcelle à ailes bleues en Amérique du Nord de 1965 à 2009, met également en évidence un rapport du nombre d'individus par sexe en faveur des mâles, confortant l'hypothèse d'un **effectif de mâles plus important dans les populations de Sarcelles à ailes bleues** (*The Teal Harvest Potential Working Group*, 2013). Cependant, dans cette même étude, un nombre plus important de juvéniles était recensé, suggérant un **potentiel biais de capture en faveur des adultes dans notre étude**.

Les effectifs non négligeables obtenus dans cette étude, avec 152 mâles adultes et 73 mâles juvéniles, ainsi que 57 et 69 femelles respectivement adultes et juvéniles, permettent un aperçu des différences de portage d'hétoparasites selon l'âge et le sexe, en lien avec de possibles choix adaptatifs différents. Cependant, les effectifs plus réduits selon le lieu de prélèvement et l'année pourraient ne pas permettre de mettre en évidence certaines associations d'un point de vue statistique, notamment en ce qui concerne les variables climatiques, ou de dégager des motifs annuels de variation.

**b) Caractéristiques épidémiologiques des hémospodioses chez la Sarcelle à ailes bleues en Saskatchewan et Alberta de 2007 à 2017**

(1) Prévalence apparente de portage d'hémospodidies

La prévalence générale observée de portage d'au moins un des genres d'hémospodidies (31,9%, 95% IC = [27,06 ; 37,07]) chez la Sarcelle à ailes bleues (*Anas discors*), pendant la période d'étude dans les prairies canadiennes, est relativement élevée. Selon les études, les prévalences observées pour *Anas discors* varient de 7,1% à 29,6% (7,1% pour celles obtenues dans les provinces maritimes de l'est du Canada par Bennett *et al.* (1975) ; 18,3% pour Garvon *et al.* (2016) au sud des États-Unis ; 18,4% et 29,6% pour Ramey *et al.* (2016) dans les prairies canadiennes et aux États-Unis respectivement). La prévalence observée dans l'étude est significativement plus élevée que celles obtenues par Bennett *et al.*, par Garvon *et al.*, ainsi que par Ramey *et al.* dans les prairies canadiennes (test du Khi-2 :  $p\text{-value} < 0,01$ ), mais non significativement différente de celle obtenue par Ramey *et al.* aux États-Unis.

**L'obtention d'une prévalence apparente globale plus élevée dans notre étude** par rapport à d'autres études plus anciennes comme celle de Bennett et son équipe, pourrait s'expliquer par la modification des dynamiques migratoires face aux modifications climatiques. Cette modification, développée partie I.D.2, est en effet caractérisée par une arrivée anticipée au printemps, avec une potentielle probabilité d'infection plus élevée du fait d'une durée de séjour allongée sur les aires de reproduction.

Dans notre étude, **le genre d'hémospodidies le plus représenté est Plasmodium**, mis en évidence chez 20,5% (95% IC = [16,41 ; 25,13]) des sarcelles étudiées, **suivi par Leucocytozoon puis Haemoproteus**, rencontrés respectivement chez 6,5% (95% IC = [4,19 ; 9,68]) et 4,6% (95% IC = [2,62 ; 7,30]) des sarcelles étudiées. Cette répartition des prévalences est cohérente avec celle obtenue par Ramey et son équipe dans les prairies canadiennes (Ramey *et al.*, 2016), et avec celle décrite par Smith et Ramey en Amérique du Sud à partir de prélèvements réalisés chez 11 espèces de canards de surface (Smith and Ramey, 2015). D'autres études décrivent *Haemoproteus* comme étant le genre le plus représenté chez *Anas discors* (Garvon *et al.*, 2016). Enfin, certaines montrent des prévalences plus élevées pour *Leucocytozoon* (Bennett *et al.*, 1975).

Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer ces **variations de prévalences et de répartition des genres selon les études** :

- La **saison de prélèvement diffère selon les études**, avec des pics de prévalence n'apparaissant pas simultanément selon le territoire et des parasitémies faibles à indétectables hors des périodes de transmission active, avec une diminution majeure des gamétocytes dans la circulation générale (Atkinson *et al.*, 2008 ; Garvon *et al.*, 2016 ; Valkiūnas, 2005). Dans notre étude, les captures ont eu lieu à la fin de la période active de transmission, avec donc des prévalences apparentes potentiellement plus élevées que dans d'autres

études où les prélèvements ont par exemple été réalisés en début de printemps ou en automne (Deviche *et al.*, 2001 ; Garvon *et al.*, 2016).

- **L'année de prélèvement** aurait également une influence sur les prévalences observées (Bennett *et al.*, 1975), et l'estimation des prévalences à partir de prélèvements réalisés sur une seule année (Garvon *et al.*, 2016 ; Meixell *et al.*, 2016) pourrait expliquer les différences observées avec les études comme la nôtre prenant en considération plusieurs années. Au sein de notre étude, des variations importantes de prévalences sont également observées selon les années, avec une prévalence apparente globale de portage d'hémosporidies variant de 14,0% (95% IC = [5,81 ; 26,74]) en 2013 à 50,0% (95% IC = [31,29 ; 68,71]) en 2008.

- Selon les études, les Sarcelles à ailes bleues ont été prélevées dans des **zones géographiques diverses**. La prévalence observée au sein d'une même espèce peut varier de manière significative entre les régions, parfois même adjacentes (Valkiūnas, 2005). Cette variation peut s'expliquer par des modifications locales de conditions météorologiques et d'habitats entraînant une variation dans la distribution spatiale et dans l'abondance des vecteurs (Atkinson *et al.*, 2008).

Cette variabilité de prévalences serait donc en partie liée à des différences spatio-temporelles entre les études, mais également à des **différences méthodologiques**. Des protocoles différents utilisés peuvent renforcer ces écarts de prévalences. En effet, **l'examen des frottis sanguins nécessite un protocole chronophage** décrit par Valkiūnas et son équipe, et utilisé dans notre étude, avec l'examen d'environ 50 000 érythrocytes afin d'obtenir une sensibilité satisfaisante (Valkiūnas *et al.*, 2008). Le protocole employé par Bennett et son équipe (Bennett *et al.*, 1975) pour la détection d'hémosporidies par microscopie optique n'est pas décrit dans l'article, mais un nombre moins important d'érythrocytes examinés pourrait entraîner une sous-estimation de la prévalence réelle.

De même, la **coloration employée** pourrait avoir son importance. La coloration classique Wright Giemsa, utilisée dans la majorité des études (Rush *et al.*, 2016) dont la nôtre, est parfois remplacée par son équivalent rapide Diff-Quik (Dade Behring, Deerfield, Illinois, USA) comme dans l'étude de Garvon et son équipe (Garvon *et al.*, 2016). Dans leur étude, Garvon et son équipe n'ont pas mis en évidence d'éléments parasitaires du genre *Plasmodium*. Comme cela a pu être décrit lors de la recherche de gamétocytes intra-érythrocytaires d'un autre parasite *Hepatozoon canis* (Mercer and Craig, 1988), la coloration rapide des frottis sanguins pourrait être moins adaptée pour permettre de distinguer suffisamment les éléments parasitaires intra-érythrocytaires, et pourrait conduire à une sous-estimation de la prévalence. La réalisation des colorations de notre étude dans un laboratoire spécialisé, avec un **contrôle de la qualité des lames**, nous permettait d'exclure les lames de qualité insuffisante et d'obtenir une qualité de coloration adéquate pour la recherche de parasites sanguins.

Le **choix des individus** a aussi son importance. Dans notre étude, les individus étaient choisis aléatoirement, malgré les biais liés à la méthode de capture précédemment évoqués. Bennett et son équipe, afin d'obtenir une prévalence indiquant le taux de transmission, ont fait un autre choix consistant à sélectionner les individus pour obtenir environ 75% de juvéniles, ce qui peut être à l'origine de biais sur l'estimation de la prévalence globale (Bennett *et al.*, 1975).

Enfin comme développé précédemment, les méthodes de recherche des parasites sanguins par **PCR ou microscopie optique** pourraient entraîner des différences dans les prévalences observées notamment lors de charges parasitaires infimes (Valkiūnas *et al.*, 2008)

Ces différents éléments rendent difficile la comparaison des prévalences obtenues dans les différentes études. Cependant des tendances générales, ou encore des facteurs de risque communs chez les oiseaux migrateurs, pourraient être dégagés de la comparaison de ces différentes études.

## (2) Facteurs de risque impliqués dans le portage d'hémosporidies chez la Sarcelle à ailes bleues

Plusieurs facteurs de risque et leur implication dans le portage d'hémosporidies chez la Sarcelle à ailes bleues dans les prairies canadiennes de 2007 à 2017, en excluant 2011, ont pu être mis en évidence par la modélisation statistique. Ces **facteurs diffèrent selon le genre considéré.**

### ❖ *Portage d'au moins un genre d'hémosporidies*

La prévalence apparente de portage d'au moins un genre d'hémosporidies est associée à des facteurs démographiques et cliniques incluant l'âge, le sexe, les résidus de densité de Sarcelles à ailes bleues et le rapport H/L après transformation logarithmique.

- **Âge :**

Comme rapporté chez la Sarcelle à ailes bleues (Ramey *et al.*, 2016), ainsi que dans la majorité des études sur d'autres espèces d'oiseaux (Valkiūnas, 2005 ; Wojczulanis-Jakubas *et al.*, 2012), les individus adultes de l'étude présentent une prévalence de portage d'au moins un genre d'hémosporidies significativement supérieure à celles des juvéniles. Cette différence peut s'expliquer par une **exposition cumulée plus longue des adultes**, augmentant ainsi la probabilité d'infection (Van Hemert *et al.*, 2019). De plus, une **taille corporelle plus importante** pourrait être un facteur favorisant l'infection par les parasites sanguins. En effet, la possibilité de se nourrir sur un individu de plus grande taille serait donnée à un plus grand nombre de vecteurs, augmentant la probabilité d'inoculation de sporozoïtes (Valkiūnas, 2005).

Cependant, certaines études rapportent des prévalences plus élevées chez les juvéniles (van Oers *et al.*, 2010), différence pouvant être expliquée par les méthodes et périodes de prélèvement. En effet, une part des juvéniles est également inévitablement infectée au cours des premiers mois de leur vie sur les aires de reproduction. Or, les juvéniles sont plus susceptibles aux infections par les parasites sanguins que les adultes, du fait d'un système immunitaire naïf, et connaissent un taux de mortalité plus élevé que les adultes parasités, avec une survie diminuée à la phase aiguë de l'infection rapportée pour *Plasmodium* et *Leucocytozoon* (van Oers *et al.*, 2010). Les prélèvements de l'étude ayant lieu relativement tardivement après leur naissance, la mortalité sélective des juvéniles pourrait entraîner un **assainissement relatif de la partie des juvéniles infectés par des hémospories**. Enfin, les impacts de l'infection sur un individu au système immunitaire naïf seraient majorés, avec des signes généraux comme de la léthargie et de l'anorexie (Atkinson *et al.*, 2008), pouvant expliquer la **non-capture de certains juvéniles infectés par les pièges à appâts standards** utilisés dans notre étude.

- Sexe :

Dans notre étude, les mâles sont plus à risque d'être porteurs d'au moins un genre d'hémospories par rapport aux femelles, comme décrit chez le Pipit rousseline (*Anthus campestris*) (Calero-Riestra and García, 2016). Ce résultat est inconstant dans la littérature, avec une partie des études ne mettant pas en évidence de différence significative de prévalence selon le sexe dans de nombreuses espèces d'oiseaux (Garvon *et al.*, 2016 ; Valkiūnas, 2005). **L'association entre le sexe et l'infection par des hémospories varierait donc selon le système hôte-hémoparasite-vecteur étudié.**

Dans notre étude, la prévalence plus élevée chez les mâles peut s'expliquer par une **exposition différentielle comportementale aux vecteurs**, mais également par un **dimorphisme sexuel des défenses immunitaires résultant de différences hormonales** (Calero-Riestra and García, 2016 ; McCurdy *et al.*, 1998 ; Zuk and Stoehr, 2010). Ces deux points ont été discutés dans la partie I.D.4. Les androgènes ayant un effet dépresseur sur le système immunitaire (Calero-Riestra and García, 2016), les mâles pourraient être plus susceptibles aux infections par des hémospories.

La proportion supérieure de mâles infectés pourrait également s'expliquer par une **dispersion différente entre les deux sexes** (Valkiūnas, 2005). Les mâles des espèces de canards de surface ne participent pas aux soins parentaux. Ils quittent donc leur partenaire femelle et se rassemblent massivement sur de larges étendues d'eau stagnante (Rohwer and Anderson, 1988), ce qui pourrait augmenter la probabilité de succès de transmission d'hémospories, par exposition plus importante de nombreux mâles à proximité d'habitats favorables aux vecteurs d'hémospories.

De plus, selon les études, les prélèvements n'ont pas lieu à la même période dans l'année. Ainsi, des différences de phases du cycle de vie selon le sexe pourraient expliquer les différences de prévalences observées (Papp *et al.*, 2017). Dans notre étude, les prélèvements ont été réalisés au mois d'août à la fin de la saison de reproduction, période d'initiation de la mue. Chez la Sarcelle à ailes bleues, la mue a lieu de manière

anticipée chez les mâles (Rohwer *et al.*, 2002). La mue consiste en un investissement en énergie important, lié à un remplacement massif des protéines corporelles, ainsi qu'à une diminution de la thermorégulation, au possible détriment de la fonction immunitaire (Cornelius *et al.*, 2011). Le **stress occasionné par la mue** et l'investissement d'énergie pourrait majorer les écarts de prévalences observés entre mâles et femelles.

Une autre explication serait liée à une différence de ratio mâles-femelles, elle-même due à une **différence de survie entre les deux sexes** (*The Teal Harvest Potential Working Group*, 2013). Les femelles présenteraient en effet un risque de mortalité plus élevé que les mâles, notamment lié à une nidification dans de possibles habitats perturbés. Les femelles seraient donc plus sujettes à la prédation ou aux activités humaines (Lovász *et al.*, 2018). Dans ce contexte, les femelles infectées auraient une susceptibilité à la prédation majorée par rapport aux autres femelles, du fait d'un potentiel stress occasionné par l'infection par des hémoparasites.

- Résidus de densité de Sarcelles à ailes bleues :

La variable « resBWTE\_Density », pouvant être interprétée comme une mesure de la densité de Sarcelles à ailes bleues non expliquée par la densité en étendues d'eau peu profondes, est négativement associée au portage apparent d'au moins un genre d'hémosporidies aviaires. Cette association non-intuitive est retrouvée dans d'autres publications, qui mettent en évidence une association négative entre la densité en hôtes et le risque d'infection (Plowright *et al.*, 2012). Cela peut être expliqué par l'**effet « rencontre-dilution »** (« *encounter-dilution effect* », Mooring and Hart, 1992), caractérisé par la diminution possible du nombre de vecteurs par hôte et par la dilution des stades infectieux lors de fortes densités d'hôtes. Ainsi, la proportion d'hôtes infectés lors de fortes densités peut diminuer, même si le nombre absolu d'hôtes infectés augmente du fait d'une probabilité accrue de transmission de parasites à un hôte (Buck *et al.*, 2017).

Cependant, il est nécessaire de souligner que les densités de population sont obtenues au printemps et utilisées comme approximation des densités qui seraient observées en août (*cf.* partie II.B.3.e). Les densités de Sarcelles à ailes bleues ont pu être sous-estimées, l'association mise en évidence serait alors une association artéfactuelle liée au protocole de mesure des densités.

L'absence d'influence de la densité en Sarcelles à ailes bleues (« BWTE\_Density ») sur le portage d'hémosporidies, alors qu'une association avec les résidus est observée, pourrait s'expliquer par le lien étroit entre les densités de Sarcelles à ailes bleues et les conditions locales des plans d'eau (Johnson *et al.*, 2005). Les variations des densités de sarcelles sont en effet expliquées en grande partie par la disponibilité en étendues d'eau. Or, la densité en étendues d'eau peu profondes n'est pas associée aux variations de prévalences observées. En ne s'affranchissant pas de l'effet de l'abondance de zones

humides sur la densité de Sarcelles à ailes bleues via l'utilisation des résidus de densité, la significativité de l'association entre la densité en Sarcelles à ailes bleues et le portage en hémospories pourrait alors être masquée.

- Rapport H/L après transformation logarithmique :

Le portage d'au moins un genre d'hémospories est significativement et positivement associé à une augmentation du rapport H/L, due à une élévation du nombre relatif d'hétérophiles en réponse à l'infection et/ou à une diminution du nombre relatif de lymphocytes en réponse au stress. Cette association est également relevée par Wojczulanis-Jakubas et son équipe, qui étudiaient l'association entre le portage de parasites sanguins et les valeurs de H/L chez les espèces *scirpaceus* et *schoenobaenus* du genre *Acrocephalus* (Wojczulanis-Jakubas *et al.*, 2012). Dans d'autres études, cette association n'est pas mise en évidence de manière significative (Norte *et al.*, 2009 ; Ots and Horak, 1996).

Le rapport H/L, comme outil de mesure du stress à court et moyen termes (*cf.* partie I.C.3.c.), peut être considéré comme un **facteur marquant une prédisposition et/ou une conséquence de l'infection par au moins un des genres d'hémospories**. En effet, le portage d'hémospories peut être un facteur de stress et être à l'origine d'une élévation des rapports H/L chez les individus parasités (Lüdtke *et al.*, 2013 ; Müller *et al.*, 2011). À l'inverse, des individus initialement stressés et présentant des rapports H/L élevés auraient une susceptibilité plus forte à l'infection par les parasites sanguins (Davis *et al.* 2008). Dans notre étude, les sarcelles sont prélevées en période de mue, période caractérisée par une demande énergétique élevée au détriment de la fonction immunitaire. De possibles rapports plus élevés chez les sarcelles en période de mue, comme rapporté chez la Mésange charbonnière (*Parus major*) (Pap *et al.*, 2010), pourraient ainsi rendre les individus plus susceptibles aux infections par les hémoparasites (Wojczulanis-Jakubas *et al.*, 2012).

Les niveaux de corticostérone dans les plumes étaient également associés positivement avec le portage d'hémospories aviaires, mais de manière non significative. À l'instar des résultats obtenus par Müller et son équipe, cela suggère une différence de sensibilité entre ces deux paramètres de mesure du stress selon la perturbation considérée (Müller *et al.*, 2011). Il est également possible que la taille de l'échantillon étudié soit insuffisante pour permettre de dégager des effets des niveaux de corticostérone sur le portage d'hémospories (Vleck *et al.*, 2000).

#### ❖ Portage d'*Haemoproteus*

Le portage de parasites du genre *Haemoproteus* est négativement associé au degré-jour cumulatif du 1<sup>er</sup> mai au jour de prélèvement. Cette variable est une mesure de l'accumulation de chaleur, au-dessus de la température seuil fixée à 5°C (*cf.* partie

II.B.3.f), et correspond donc à une approche de l'abondance en vecteurs. **Cette association négative peut de prime abord paraître contradictoire**, compte tenu de l'effet positif habituellement décrit de la température sur le développement et l'activité des vecteurs. Ce résultat coïncide cependant avec ce qui est rapporté dans d'autres études sur les **vecteurs de la famille des *Ceratopogonidae*, où l'augmentation de température a un effet négatif sur l'abondance en vecteurs** (van Hoesel *et al.*, 2019). Par exemple, des études menées sur *Culicoides sonorensis* montrent une diminution de la survie journalière des adultes parallèlement à l'augmentation des températures, avec des espérances de vie passant de plus de 10 jours en hiver à 2-3 jours en été (Gerry and Mullens, 2000 ; Lysyk and Danyk, 2007). Les sporozoïtes d'*Haemoproteus nettionis*, qui infectent les oiseaux du genre *Anas*, sont détectés dans les glandes salivaires du vecteur entre 6 et 10 jours après l'ingestion de gamétocytes (Mullen, 2019 ; Valkiūnas, 2005). À l'heure actuelle, aucune donnée sur la survie de *Culicoides nettionis*, vecteur compétent d'*Haemoproteus nettionis*, n'est disponible à notre connaissance. Cependant, une survie moyenne diminuée des adultes lors de l'augmentation des températures, à l'instar de *Culicoides sonorensis*, pourrait avoir pour conséquence une diminution du nombre de vecteurs infectants, du fait d'une espérance de vie inférieure à la durée de développement du parasite dans le vecteur. Sur la période d'activité des vecteurs du 1<sup>er</sup> mai au jour de prélèvement, un degré-jour cumulatif élevé pourrait donc être associé à un **moins grand nombre de vecteurs capables de transmettre *Haemoproteus*** et donc à une prévalence moindre.

De plus, la plupart des adultes du genre *Culicoides* sont plus actifs à des températures plus douces (van Hoesel *et al.*, 2019), ce qui coïncide avec les résultats de l'étude.

Dans l'étude, cette association n'est pas retrouvée pour les autres genres d'hémosporidies, suggérant une **réponse différente des vecteurs aux variables climatiques**. En outre, la variabilité des réponses des vecteurs aux facteurs climatiques évoquée précédemment (*cf.* partie I.D.3.b) pourrait masquer de possibles associations entre le degré-jour cumulatif et le portage d'hémosporidies pour *Plasmodium relictum* et *Leucocytozoon simondi*. En effet, ces deux espèces d'hémosporidies peuvent être transmises aux oiseaux du genre *Anas* par plusieurs espèces de vecteurs, alors que *Culicoides downesi* est le seul vecteur connu compétent dans la transmission d'*Haemoproteus nettionis* chez les canards de surface (Mullen, 2019 ; Valkiūnas, 2005).

#### ❖ *Portage de Plasmodium*

La variable significativement associée au portage apparent d'hémoparasites du genre *Plasmodium* est le rapport H/L après transformation logarithmique. Le portage de *Plasmodium* en tant que facteur de stress entraînerait une réponse immunitaire avec hétérophilie et lymphopénie, ou bien le portage serait favorisé par des rapports H/L élevés.

Cette association n'est pas retrouvée chez les individus infectés par les genres *Haemoproteus* ou *Leucocytozoon*, pouvant suggérer chez les Sarcelles à ailes bleues une **réponse immunitaire majorée chez les hôtes porteurs de *Plasmodium***. Cette

réponse immunitaire supérieure pourrait être la conséquence d'une pathogénicité plus élevée des parasites du genre *Plasmodium* (Atkinson *et al.*, 2008 ; Friend and United States Geological Survey, 1999 ; Levin and Parker, 2012).

Cette pathogénicité supérieure est aussi évoquée chez *Leucocytozoon* (Atkinson *et al.*, 2008 ; Levin and Parker, 2012 ; Martinsen *et al.*, 2008), et une élévation des rapports H/L serait également attendue pour ce genre parasitaire. Cependant, Norte et son équipe ont suggéré que les individus infectés par *Leucocytozoon* répondraient à l'infection plutôt par une réponse immunitaire cellulaire avec augmentation du nombre de lymphocytes, et par conséquent une diminution du rapport H/L (Norte *et al.*, 2009). Malgré la pathogénicité élevée de *Leucocytozoon*, des rapports H/L élevés ne seraient alors pas observés, à l'inverse de *Plasmodium*.

Aucune différence significative de prévalence n'est notée en fonction de l'âge et du sexe, suggérant une distribution homogène de *Plasmodium* au sein de la population de Sarcelles à ailes bleues étudiée.

#### ❖ Portage de *Leucocytozoon*

À l'instar du portage d'au moins un genre d'hémosporidies et des résultats de Ramey et son équipe (Ramey *et al.*, 2016), les juvéniles sont moins à risque d'être porteurs de *Leucocytozoon* que les adultes. Bien que retrouvée pour les genres *Plasmodium* et *Haemoproteus*, cette association n'est alors pas significative. Différentes hypothèses peuvent être émises pour expliquer cette différence.

D'une part, cela pourrait suggérer une **pathogénicité marquée de *Leucocytozoon* pour les juvéniles, avec une surmortalité des juvéniles infectés**. En effet, la seule espèce mise en évidence ce jour chez les Anseriformes est *L. simondi*, avec une susceptibilité plus élevée chez les jeunes canards sauvages et une mortalité aiguë des juvéniles rapportée (Atkinson *et al.*, 2008 ; Valkiūnas, 2005). Cette pathogénicité élevée pour les jeunes serait alors à l'origine d'une diminution de la part de juvéniles infectés par *Leucocytozoon* dans la population.

Une autre hypothèse serait **l'acquisition de parasites du genre *Leucocytozoon* préférentiellement hors des aires de reproduction**, soit lors de la migration, soit sur les aires d'hivernage, ce qui expliquerait la prévalence plus élevée chez les adultes. Cette hypothèse peut être renforcée par l'étude de la population de vecteurs de *Leucocytozoon* dans les prairies canadiennes. La relative faible richesse en espèces de la famille des *Simuliidea* dans les prairies par rapport à d'autres régions d'Amérique du Nord, et l'absence des deux espèces ayant un rôle majeur dans la transmission de *L. simondi* (*Simulium anatinum* et *Simulium rugglesi*) pourraient en effet conforter l'idée d'une infection limitée des juvéniles sur les aires de reproduction (Currie, 2014 ; Mullen, 2019). De plus, Bennett et son équipe ont relevé chez les Anatidés juvéniles un gradient sud-nord en Saskatchewan caractérisé par une prévalence de *L. simondi* augmentant avec le degré de latitude nord, ce qui coïncide avec la faible abondance en vecteurs adaptés à la transmission de *L. simondi* dans les prairies (Currie, 2014 ; Mullen, 2019).

#### ❖ *Facteurs non associés avec le portage d'hémosporidies*

Contrairement à notre hypothèse de départ, aucune différence significative d'indice de condition corporelle n'est observée entre individus parasités et non-parasités. Cette absence de différence pourrait être attribuée à la phase d'infection des individus capturés, ou à l'hétérogénéité des effets du portage selon les espèces d'oiseaux et les individus. En effet, du fait de la méthode de capture, les sarcelles prélevées seraient majoritairement des individus infectés de manière chronique ou latente avec une charge parasitaire faible (Valkiūnas, 2005), ayant survécu à la phase aiguë de l'infection et donc avec un système immunitaire ayant été capable de réduire le nombre de parasites sanguins circulants. Les impacts négatifs des infections par les hémosporidies pourraient être non détectables chez ces individus. Des études menées sur d'autres espèces d'oiseaux relèvent également **l'absence d'effets des infections par les hémosporidies sur la condition corporelle** (Granthon and Williams, 2017 ; Lüdtke *et al.*, 2013 ; Palinauskas *et al.*, 2008 ; Townsend *et al.*, 2018). La diminution d'état corporel serait plus liée à l'intensité parasitaire qu'à la présence d'hémosporidies, comme rapporté par De La Torre et son équipe (De La Torre *et al.*, 2020).

La province et le lieu de prélèvement ne montraient pas d'association significative avec le portage d'aucun des genres d'hémosporidies. Ce résultat est contraire aux hypothèses de départ selon lesquelles les conditions locales seraient déterminantes dans l'épidémiologie des hémosporidies aviaires (Atkinson *et al.*, 2008 ; Valkiūnas, 2005). Cela pourrait suggérer le fait que les habitats choisis par les Sarcelles à ailes bleues lors de la saison de reproduction seraient écologiquement similaires au sein des prairies canadiennes. Cet aspect est mis en évidence chez d'autres espèces d'oiseaux, avec pour conséquence l'absence de différences significatives de prévalences selon la zone géographique de prélèvement (Scordato and Kardish, 2014). Il convient cependant d'appréhender ce résultat avec circonspection du fait **d'échantillons limités pour certains lieux, qui pourraient alors s'avérer insuffisants pour mettre en évidence une association entre le portage et les données géographiques**. De plus, les prélèvements ont lieu lors des rassemblements pré-migratoires. Les lieux de prélèvement enregistrés ne correspondent donc pas nécessairement aux habitats utilisés précédemment au cours de la saison de reproduction (Rohwer and Anderson, 1988), à l'origine d'un potentiel biais masquant les effets de l'habitat et des conditions locales subies en période de reproduction.

La densité en étendues d'eau peu profondes n'est pas corrélée au portage d'hémosporidies aviaires, pour aucun des trois genres étudiés. De même, les facteurs de précipitation n'ont pas d'influence sur les prévalences de portage. Ces résultats, en accord avec ceux de Pulgarín-R et son équipe (Pulgarín-R *et al.*, 2018), peuvent apparaître surprenants, étant donné le lien entre la présence d'eau et la distribution spatio-temporelle en vecteurs et en hôtes. Des hypothèses peuvent être avancées pour

**expliquer l'absence d'influence des facteurs de disponibilité en eau sur le portage d'hémosporidies à l'échelle de l'étude.**

Les motifs de réponse aux facteurs climatiques diffèreraient selon les espèces de vecteurs. L'étude menée par Lysyk et son équipe a ainsi montré une influence négative des précipitations dans les deux semaines qui précèdent l'échantillonnage pour les espèces de moustiques *Culex tarsalis* et *Culiseta inornata*, l'absence d'effet des précipitations chez les espèces *Aedes dorsalis* et *Aedes campestris*, et un effet positif pour *Aedes vexans* du niveau de précipitations deux à trois semaines avant le piégeage (Lysyk, 2010). De plus, une étude menée par van Hoesel et son équipe montre une abondance paradoxalement plus importante des moustiques à distance des points d'eau stagnante (van Hoesel *et al.*, 2019), ce qui coïncide avec la présence de vecteurs de *Plasmodium* dans des environnements plus arides (Mullen, 2019) et l'absence d'association entre la présence d'eau et le portage de *Plasmodium* dans notre étude.

L'utilisation de canards sentinelles dans l'est du Canada a montré que la transmission de *L. simondi* avait lieu essentiellement en juin et juillet. De plus, sa prévalence chez les canards de surface est plus faible les années de sécheresse à l'ouest du Canada, du fait d'une présence plus limitée en habitats appropriés pour les mouches noires vecteurs (Atkinson *et al.*, 2008). La sécheresse sévère observée en 2015 (*Agriculture and Agri-Food Canada and Government of Canada*, 2020) pourrait participer à expliquer la prévalence nulle observée cette année-là pour *Leucocytozoon*. Cependant, le nombre limité d'épisodes de sécheresse extrême dans les prairies canadiennes sur les années considérées (*Agriculture and Agri-Food Canada and Government of Canada*, 2020), ainsi que les faibles prévalences apparentes de portage de *Leucocytozoon* pourraient ne pas permettre de mettre en évidence une association avec les facteurs de précipitation. De plus, les Simuliidés vecteurs de *Leucocytozoon* sont présents à proximité de sources d'eau en mouvement comme des rivières ou ruisseaux (Mullen, 2019), qui sont des éléments hydriques non pris en compte dans la variable densité en étendues d'eau peu profondes. Ce biais pourrait également expliquer en partie l'absence d'association entre le portage de *Leucocytozoon* et la présence d'eau.

Les données actuelles sur l'abondance et la distribution des vecteurs d'*Haemoproteus* de la famille de *Ceratopogonidae* dans les prairies sont limitées (Lysyk and Galloway, 2014). A l'instar de *Leucocytozoon*, les faibles prévalences apparentes de portage d'*Haemoproteus* pourraient masquer une association avec la présence d'eau, mise en évidence dans des études réalisées dans des habitats différents (Sanders *et al.*, 2019 ; van Hoesel *et al.*, 2019). De plus, le couvert végétal réduit dans les prairies pourrait limiter l'abondance de ces vecteurs, expliquant en partie les faibles prévalences obtenues dans l'étude (van Hoesel *et al.*, 2019).

Si les facteurs climatiques influent sur la dynamique des maladies vectorielles via notamment la distribution des populations de vecteurs et d'hôtes (Loiseau *et al.*, 2013; Santiago-Alarcon *et al.*, 2012), **d'autres facteurs non climatiques pourraient avoir un impact plus important sur la répartition des espèces** (Brambilla *et al.*, 2019) et

expliquer l'absence d'effet de la plupart des variables climatiques étudiées à l'échelle des prairies canadiennes.

La **distribution des parasites sanguins dans les populations aviaires est donc complexe et dépendante de nombreux facteurs imbriqués**. Les motifs variés de prévalences en réponse aux différentes variables intrinsèques et environnementales suggèrent des réactions physiologiques différentes selon les individus hôtes et selon le genre parasitaire étudié.

De plus, les variations observées entre les différentes études semblent indiquer une dynamique infectieuse spatialement et temporellement déterminée, avec des interactions entre les hôtes, les hémospodidies et leurs vecteurs variables à l'échelle locale. Ainsi, l'existence d'adaptations des hôtes à l'échelle locale, qu'elles soient génétiques ou comportementales, et liées à une coévolution entre les différentes parties de la triade, est une hypothèse avancée pour expliquer les variations de prévalences et une résistance différentielle des hôtes selon l'aire de reproduction (Santiago-Alarcon *et al.*, 2012). Cependant, les Sarcelles à ailes bleues sont des oiseaux migrateurs à tendance opportuniste ne retournant pas toujours aux mêmes lieux de reproduction d'une année sur l'autre (Rohwer *et al.*, 2002). Ainsi, l'exposition à une diversité plus importante de parasites que des espèces résidentes chez ces oiseaux migrateurs pourrait limiter cette coévolution (Jenkins *et al.*, 2012).

### *c) Facteurs de stress responsables d'élévation des niveaux de corticostérone dans les plumes (CORTf) et/ou des rapports hétérophiles sur lymphocytes (rapport H/L) chez la Sarcelle à ailes bleues*

#### (1) Facteurs de variation du niveau de CORTf

Les niveaux de CORTf dans la deuxième rectrice sont les marqueurs des **niveaux de stress subis par l'oiseau lors de la croissance de la plume, ayant lieu au cours du mois de juillet et août**. Ces niveaux de CORTf varient selon l'âge et le sexe des sarcelles.

#### ❖ *Influence du sexe sur les niveaux de CORTf*

Dans notre étude, les Sarcelles à ailes bleues femelles présentent, avec un risque majoré, des niveaux plus élevés de corticostérone dans les plumes. Ce résultat est cohérent avec l'étude de Fairhurst et son équipe réalisée chez le Sizerin flammé (*Acanthis flammea*), avec des **niveaux de CORTf plus bas chez les adultes mâles que chez les femelles** (Fairhurst *et al.*, 2014). Cette différence selon le sexe pourrait s'expliquer par des changements des niveaux de corticostérone circulants liés à des **modifications physiologiques saisonnières ainsi qu'à des contraintes environnementales différentes selon le sexe** (Romero *et al.*, 1997). Notamment,

l'élevage des petits par les femelles, avec une exposition plus forte à la prédation et aux activités humaines (Lovász *et al.*, 2018), pourrait expliquer des niveaux de corticostérone majorés chez les femelles de certaines espèces dont *Anas discors*. Ainsi, dans une étude menée par Crossin et son équipe chez deux espèces d'oiseaux marins d'Antarctique, le succès reproducteur était associé chez les femelles à des niveaux de corticostérone plus élevés, eux-mêmes possiblement liés à des demandes métaboliques majorées pour l'élevage de la progéniture (Crossin *et al.*, 2013). De même, chez des individus femelles captives de l'espèce *Alectoris rufa* ou Perdrix rouge, l'investissement reproductif au printemps et en été est fortement corrélé aux niveaux de CORTf obtenus en été et automne (Bortolotti *et al.*, 2008). Au contraire des espaces ouverts où se rassemblent les mâles, les femelles nidifient dans des espaces clos avec une visibilité réduite, majorant le risque de prédation et les incitant à allouer un temps supérieur à la détection des prédateurs au détriment de la recherche et prise de nourriture, ce qui pourrait également être responsable de niveaux de CORTf plus élevés chez les femelles (Behney *et al.*, 2018 ; Will *et al.*, 2014).

Des études menées dans d'autres espèces aviaires ne mettent pas en évidence de différence significative selon le sexe (Adámková *et al.*, 2019 ; Robertson *et al.*, 2017). Cette inconstance de l'influence du sexe sur les niveaux de CORTf pourrait s'expliquer par une différence interspécifique d'investissement du mâle dans l'effort reproductif (Robertson *et al.*, 2017) ou par des prélèvements réalisés à des périodes avec des modifications physiologiques liées au sexe négligeables (Romero *et al.*, 1997).

#### ❖ *Influence de l'âge sur les niveaux de CORTf*

Dans l'étude, une association significative entre les niveaux de CORTf et l'âge des sarcelles est mise en évidence. Ainsi, les **adultes sont plus susceptibles de présenter des niveaux élevés**. Ce résultat **s'oppose à ce qui est généralement décrit dans d'autres espèces**, avec des niveaux de CORTf plus élevés chez les juvéniles pour une majorité d'études (Adámková *et al.*, 2019 ; Boves *et al.*, 2016 ; Lendvai *et al.*, 2015 ; Salleh Hudin *et al.*, 2018). Une des explications possibles serait l'absence d'élévation des niveaux de corticostérone chez les sarcelles juvéniles en préparation au départ du nid. En effet, contrairement à d'autres espèces nichant en hauteur (Heath, 1997), les nids des Sarcelles à ailes bleues sont situés au sol, et des niveaux de corticostérone circulants élevés ne constitueraient pas une valeur adaptative du fait de l'absence de vol nécessaire pour quitter le nid (Blas, 2015). Un biais dû à la capture préférentielle de juvéniles avec des niveaux de corticostérone plus bas pourrait également expliquer les différences observées entre les deux classes d'âge. En effet, des niveaux élevés de corticostérone en réponse au stress chez les oisillons seraient négativement corrélés avec la probabilité de survie ultérieure, pouvant expliquer une sous-représentation des juvéniles avec des niveaux de CORTf élevés (Blas, 2015). Enfin, une exposition différentielle aux facteurs de stress est également possible, avec des adultes faisant face à des conditions générant une charge allostatique plus élevée chez les Sarcelles à ailes bleues.

#### ❖ *Variations annuelles et spatiales des niveaux moyens de CORTf*

Des variations des niveaux de corticostérone dans les plumes sont observées selon l'année de prélèvement. Ces **variations annuelles pourraient s'expliquer par des fluctuations météorologiques**, comme la température ou la vitesse moyenne du vent. En effet, ces deux variables étaient associées aux niveaux de CORTf dans l'étude, bien que n'apparaissant pas dans le modèle final le mieux ajusté. Ces facteurs climatiques peuvent avoir un effet direct sur le stress, ou indirect via par exemple la disponibilité en ressources alimentaires (Boves *et al.*, 2016). D'autres **événements annuels extrêmes** pourraient également expliquer les variations observées. Par exemple, mi-juillet 2008, le sud de l'Alberta et de la Saskatchewan ont été touchés par une tempête avec des vents violents et rafales, de la grêle et des tornades (*Environment and Climate Change Canada*, 2017). Ayant lieu pendant la période de mue, cet événement climatique extrême a pu contribuer aux niveaux élevés de CORTf observés en 2008.

À l'instar des variations temporelles observées, la différence des niveaux de CORTf selon la province (Saskatchewan ou Alberta) pourrait s'expliquer par des environnements climatiques distincts, avec des événements météorologiques et une disponibilité en ressources différents.

#### ❖ *Les niveaux de CORTf sont positivement associés à la densité de population de canards de surface*

Les niveaux de CORTf sont positivement corrélés à la densité de population de canards de surface. L'augmentation du dépôt de corticostérone dans les plumes rectrices avec la densité de population est sûrement en grande partie expliquée par une compétition accrue pour les ressources alimentaires et pour les habitats propices à la nidification. **La compétition interspécifique et les interactions antagonistes résultantes seraient ainsi responsables d'élévation des niveaux de corticostérone**, comme décrit dans d'autres espèces (Creel *et al.*, 2013; Robertson *et al.*, 2017). Cette élévation pourrait être potentiellement majorée par l'arrivée plus tardive des Sarcelles à ailes bleues sur les aires de reproduction, avec un accès restreint aux habitats propices et donc une nidification dans des habitats plus exposés à la prédation ou aux activités humaines (*Conservation of Migratory Species of Wild Animals*, 2014). De plus, des densités de population de canards plus élevées pourraient attirer de plus nombreux prédateurs, comme des renards, visons ou belettes, entraînant un risque majoré de prédation (Creel *et al.*, 2013).

Cependant, les niveaux de CORTf ne sont pas associés avec la densité en Sarcelles à ailes bleues dans notre étude. Cela suggère que **les possibles effets délétères des fortes densités de Sarcelles à ailes bleues seraient contrebalancés par des avantages adaptatifs de l'effet de groupe**, comme par exemple une diminution du risque de prédation via une vigilance collective. En effet, cette vigilance collective permettrait aux individus d'allouer plus de temps à d'autres fonctions vitales comme la

recherche de nourriture. De plus, par effet de dilution, l'intégration de l'individu dans un groupe entraîne une réduction du risque individuel de prédation (Beauchamp, 2008).

## (2) Facteurs de variation du rapport H/L

Les valeurs des rapports H/L sont comprises entre 0,119 et 14,833 dans l'échantillon de l'étude. Aucun intervalle de valeurs du rapport H/L publié pour les Sarcelles à ailes bleues n'était disponible, mais l'intervalle obtenu est proche de la gamme obtenue par Clark et son équipe chez les Ansériformes avec des valeurs allant de 1,32 à 11,53 (Clark, 2015).

Le temps de prélèvement du sang après capture ne pouvait être standardisé du fait de la méthode de capture via des pièges à appâts. Une modification de la numération leucocytaire et des rapports H/L liée à des différences de délai entre la capture et les prélèvements ne peut être exclue. Malgré tout, des motifs de variations des rapports H/L peuvent être dégagés. En plus des variations interspécifiques observées au sein d'une même famille d'oiseaux, des variations interindividuelles des rapports H/L sont observées avec des gammes de valeurs étendues, suggérant une exposition différentielle aux facteurs de stress selon les individus, mais également des réponses individuelles possiblement différentes aux facteurs de stress (Elarabany, 2018 ; Vleck *et al.*, 2000).

Dans la population étudiée, le rapport H/L est associé à différents facteurs : l'âge, l'année de prélèvement, les résidus de densité de Sarcelles à ailes bleues, l'infection par au moins un des genres d'hémosporidies et l'indice de condition corporelle.

### ❖ Influence de l'âge sur les rapports H/L :

Les individus adultes de notre étude présentent des rapports H/L élevés avec un risque majoré par rapport aux juvéniles. Des **rapports plus faibles chez les juvéniles** ont également été décrits chez d'autres espèces d'oiseaux (Charles-Smith *et al.*, 2014 ; Norte *et al.*, 2009 ; Quillfeldt *et al.*, 2008).

Malgré le manque de données sur les populations de leucocytes chez les oiseaux juvéniles, ce résultat peut suggérer une différence du nombre relatif d'hétérophiles et de lymphocytes entre les juvéniles et les adultes. Ainsi, à l'instar des juvéniles de l'espèce *Pachyptila belcheri*, les jeunes Sarcelles à ailes bleues verraient le nombre relatif d'hétérophiles augmenter avec l'âge, parallèlement à une diminution du nombre de lymphocytes, résultant en une élévation des rapports H/L (Quillfeldt *et al.*, 2008). Norte et son équipe ont également suggéré une réponse immunitaire majoritairement cellulaire et médiée par une augmentation des lymphocytes en cas d'infection par des hémosporidies chez les jeunes Mésanges charbonnières (Norte *et al.*, 2009).

D'autres études réalisées dans d'autres espèces d'oiseaux ne mettent pas en évidence d'association entre l'âge et les rapports H/L (Granthon and Williams, 2017), ou rapportent des rapports plus élevés chez les juvéniles (Wojczulanis-Jakubas *et al.*,

2012). **Les proportions relatives des populations de leucocytes en fonction de l'âge diffèrent donc selon les espèces d'oiseaux considérées.**

Une autre hypothèse pour expliquer des rapports H/L plus élevés chez les sarcelles adultes par rapport aux juvéniles de l'étude serait une **exposition différentielle aux facteurs de stress**. Le fait que les niveaux de corticostérone dans les plumes soient également plus élevés chez les adultes est en faveur de cette hypothèse.

❖ *Variations annuelles des rapports H/L :*

Des variations du rapport H/L sont aussi observées entre les années chez la Sarcelle à ailes bleues. Les variations temporelles de ce rapport suggèrent une **exposition plus ou moins importante aux perturbations environnementales selon l'année**. Différents facteurs environnementaux, présentant des variations selon l'année, peuvent participer à expliquer des rapports H/L plus élevés, comme une disponibilité limitée en ressources alimentaires ou encore des conditions climatiques extrêmes (Banbura *et al.*, 2013). Il est intéressant de noter que les variations observées **ne suivent pas le même motif annuel que les niveaux de CORTf**. Ceci est en faveur d'une différence de sensibilité aux facteurs de stress entre ces deux variables (Müller *et al.*, 2011) ou de la mesure de périodes différentes dans la vie des individus (Bortolotti *et al.*, 2008 ; Davis *et al.*, 2008).

❖ *Influence des résidus de la densité de Sarcelles à ailes bleues sur les rapports H/L :*

Après affranchissement de l'effet des densités en étendues d'eau peu profondes, les densités élevées de Sarcelles à ailes bleues sont associées à des rapports H/L plus importants. L'augmentation de la valeur moyenne du rapport H/L avec la densité suggère une compétition intraspécifique pour les ressources, alors responsable d'un stress majoré (Campo *et al.*, 2005). Le fait que la densité de Sarcelles à ailes bleues soit associée aux rapports H/L, mais pas aux niveaux de CORTf, suggère une **compétition intraspécifique pour les ressources n'apparaissant que tardivement en fin de période de reproduction, probablement lors des rassemblements pré-migratoires**.

La relation entre les densités de population et le stress mesuré par les rapports H/L a beaucoup été étudiée chez la Poule domestique (*Gallus gallus domesticus*), avec des résultats divergents selon les études. Ainsi, si certaines études ne montrent aucun effet significatif de la densité sur les rapports H/L chez la Poule domestique (Heckert *et al.*, 2002), d'autres rapportent une élévation du rapport H/L en cas de fortes densités (Simitzis *et al.*, 2012 ; Thaxton *et al.*, 2006). L'inconstance de l'effet de la densité sur le rapport H/L pourrait être liée à des conditions environnementales différentes (Thaxton *et al.*, 2006). Ainsi, **la densité pourrait ne constituer un facteur de stress responsable d'élévation du rapport H/L que dans des conditions environnementales impliquant un accès limité aux ressources**.

❖ *Influence de l'infection par au moins un des genres d'hémosporidies :*

Les rapports H/L des sarcelles infectées par au moins un genre d'hémosporidies étaient significativement plus élevés que ceux des sarcelles non-infectées. Comme discuté précédemment, **l'augmentation du rapport H/L peut constituer une prédisposition aux infections par les hémosporidies et/ou en être une conséquence.**

❖ *Association entre les rapports H/L et l'indice de condition corporelle (BCI) :*

Une association négative entre l'indice de condition corporelle et le rapport H/L est observée. Cette association négative, retrouvée dans d'autres espèces d'oiseaux (Hörak *et al.*, 2000 ; Quillfeldt *et al.*, 2008 ; Skwarska, 2019), corrobore l'hypothèse selon laquelle les **réponses aux facteurs de stress environnementaux ou intrinsèques pendant la mue sont responsables d'une baisse d'état corporel chez la Sarcelle à ailes bleues.** La condition corporelle d'un individu reflète l'énergie stockée qui peut être allouée aux grandes fonctions, dont la reproduction et la fonction immunitaire (Peig and Green, 2009). Une baisse de la condition corporelle signe donc une utilisation importante de l'énergie stockée, lors notamment d'élévations chroniques des niveaux de glucocorticoïdes, entraînant une augmentation du catabolisme protéique, de la néoglucogenèse et une mobilisation des triglycérides stockés (Blas, 2015). De même, une mauvaise condition corporelle peut correspondre à un stress chronique intrinsèque, interférant avec l'homéostasie des oiseaux, du fait d'un défaut d'énergie allouable aux fonctions vitales (Müller *et al.*, 2011). Aussi, **les individus avec de faibles indices de condition corporelle auraient un pouvoir adaptatif également plus faible, avec une plasticité moindre face aux agents pathogènes** (Hörak *et al.*, 2000). Pour ces individus, le coût pour le maintien de leur homéostasie face aux infections par les hémoparasites serait supérieur, entraînant un stress et des rapports H/L majorés.

❖ *Absence d'influence significative du sexe sur les rapports H/L :*

L'absence d'effet significatif du sexe sur les rapports H/L dans l'étude, contrairement à ce qui a été rapporté pour les niveaux de CORTf, corrobore le fait que la mesure du stress via le rapport H/L serait à plus court terme que pour les niveaux de CORTf. En effet, les rapports H/L ne semblent pas montrer de différences liées à l'investissement reproductif, et mesureraient donc le stress subi par les sarcelles ultérieurement à la période d'élevage des jeunes par les femelles.

Le rapport H/L est donc un marqueur du stress chronique très utilisé chez les oiseaux et qui semble pertinent chez la Sarcelle à ailes bleues. Cependant, l'interprétation de ses variations peut être difficile. En effet, en tant que rapport, il dépend des variations de deux populations cellulaires impliquées dans la réponse immunitaire. De plus, les effets du stress et ceux d'une réponse à une infection parasitaire se caractérisent tous les deux par un rapport H/L élevé. En effet, une hétérophilie peut indiquer un stress ou une réponse immunitaire face à une infection, alors qu'une lymphopénie est la marque d'une réponse au stress, d'une absence de parasites ou bien d'une immunosuppression (Davis et al., 2008).

### 3. Perspectives

Les prévalences observées de portage d'hémosporidies décrites dans cette étude sont basées sur la microscopie optique. Il serait intéressant de mener en parallèle une étude se basant sur des résultats obtenus par PCR. En effet, les deux méthodes peuvent être complémentaires, la microscopie pouvant être insuffisante pour des infections avec une charge parasitaire exceptionnellement faible, alors que la méthode PCR pourrait générer des faux positifs et serait moins sensible lors de co-infections (Valkiūnas *et al.*, 2014, 2008).

Cette étude a permis de mettre en évidence des facteurs de risque impliqués dans le portage des trois genres communs d'hémosporidies aviaires chez la Sarcelle à ailes bleues dans les prairies canadiennes, mais pas d'étudier l'impact éventuel de ce portage sur la survie des populations de sarcelles. L'analyse des données collectées dans le cadre de cette étude combinées aux données issues du système de surveillance de marquage-recapture est en cours. L'utilisation du logiciel MARK® permettra d'obtenir des estimations de paramètres de survie dans la population de Sarcelles à ailes bleues à partir de modèles construits selon la méthode de Brownie et son équipe (White and Burnham, 1999). L'influence du sexe, de l'âge, des niveaux de corticostérone et des rapports H/L sur la survie sera également investiguée. L'interaction entre le portage, l'âge et le sexe fera également partie intégrante des modèles construits pour l'étude de la survie.

Dans une future étude, il serait également intéressant de recueillir sur les sites de prélèvement des informations sur l'abondance et la distribution spatio-temporelle des populations de vecteurs d'hémosporidies. Le recueil de ces informations permettrait d'étudier si les relations observées entre les variables climatiques et le portage d'hémosporidies chez les canards de surface sont en lien avec un impact du climat sur les populations de vecteurs.

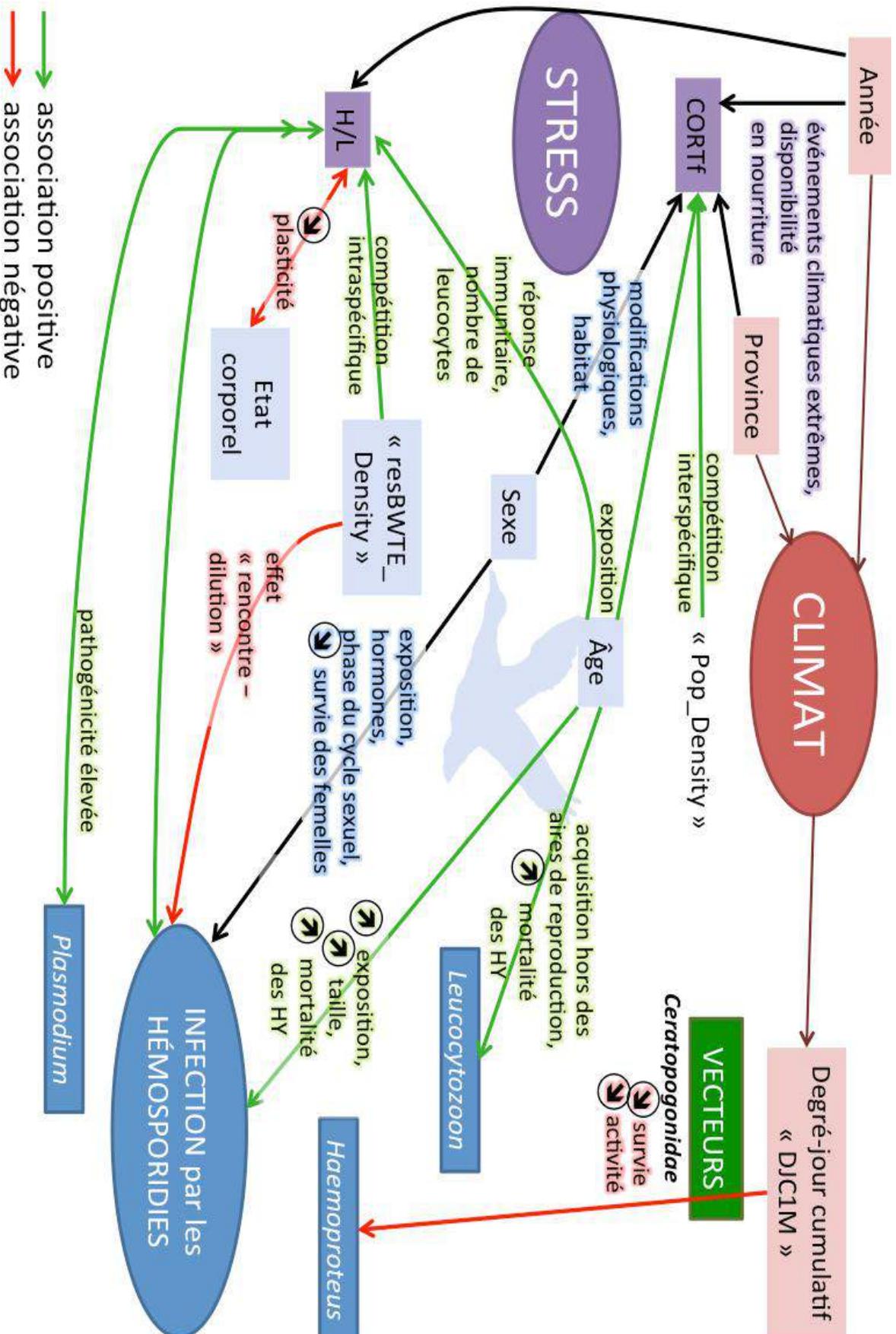


Figure 2.50 Schéma bilan des interactions mises en évidence dans l'étude chez la Sarcelle à ailes bleues dans les prairies canadiennes, au sein de la triade "climat-stress-infection par les hémosporidae" (© A. Le Gac).

Abréviations : « Pop\_Density » : densité de population de canards de surface ; « resBWTE\_Density » : résidus de la densité de population de Sarcelles à ailes bleues ; HY : hatch-year ou juvéniles ; « DJC1M » : degré-jour cumulatif du 1<sup>er</sup> mai au jour de prélèvement ; CORTF : niveaux de corticostérone dans les plumes ; H/L : rapport hétérophiles sur lymphocytes.

## Conclusion

La compréhension des possibles effets des modifications climatiques sur les organismes, et des conséquences sur la dynamique des maladies infectieuses, constitue à ce jour un axe majeur de la recherche en santé publique, en écologie et en biologie évolutive.

Dans notre étude, l'impact du climat a été évalué en relation avec le stress chez la Sarcelle à ailes bleues, espèce commune des prairies canadiennes, en s'intéressant aux conséquences sur le portage d'hémosporidies et sur l'état corporel (Figure 2.50).

Les apports de l'étude à l'épidémiologie des hémosporidies dans cette espèce de canards de surface, ainsi que l'analyse des facteurs de risque associés, ont mis en évidence des différences majeures selon le genre étudié (*Haemoproteus spp.*, *Plasmodium spp.* et *Leucocytozoon spp.*). Ces différences peuvent être liées à une diversité des réponses des vecteurs aux changements environnementaux, mais également à des différences de pathogénicité ou d'exposition à chacun des genres étudiés.

Les résultats de l'étude ont de plus montré une association entre le stress et les parasites sanguins d'une part, et le stress et l'état corporel d'autre part. Ainsi, l'addition d'un facteur de stress lors de la mue, période déjà énergivore, serait responsable d'une utilisation excessive d'énergie afin de maintenir l'homéostasie, et donc d'une dégradation de l'état corporel. Que ce facteur soit climatique ou intrinsèque, cette consommation supplémentaire des réserves énergétiques pourrait donc compromettre la survie ou le vol vers les aires d'hivernage.

L'absence d'influence majeure des variables climatiques sur le portage d'hémosporidies et sur le stress dans la population de notre étude souligne la complexité des interactions de la triade « climat-stress-infection par les hémosporidies ». Les changements climatiques ne constituent pas le seul facteur agissant sur les populations de vecteurs et d'hôtes. La multiplicité de facteurs imbriqués, avec une action parfois synergique, explique la difficulté de construction de scénarios sur les impacts futurs du climat sur les populations d'oiseaux.

Les résultats observés dans cette étude viennent compléter les données disponibles sur les hémosporidies aviaires et leur association avec le stress et les conditions environnementales. Il convient cependant de considérer les effets des hémosporidies sur les populations d'hôtes aviaires selon le contexte d'occurrence parasitaire, avec des conditions intrinsèques et environnementales influençant les compromis adaptatifs. L'ensemble des effets observés dans l'étude ne serait en effet pas généralisable à des contextes différents, du fait de variations des réponses des populations et de l'hétérogénéité des modifications environnementales à l'échelle locale.

## Références

- Adámková, M., Bílková, Z., Tomášek, O., Šimek, Z., Albrecht, T. (2019). Feather steroid hormone concentrations in relation to age, sex, and molting time in a long-distance migratory passerine. *Ecology and Evolution*, 9 (16), pp. 9018–9026. <https://doi.org/10.1002/ece3.5447>
- Agriculture and Agri-Food Canada, Government of Canada. (2020). Canadian Drought Monitor - Drought Analysis - Monthly Comparisons [en ligne]. <https://www.agr.gc.ca/eng/agriculture-and-climate/drought-watch/canadian-drought-monitor/drought-analysis/monthly-comparisons/?id=1518631888606> (consulté le 20/09/2020).
- Asghar, M., Hasselquist, D., Hansson, B., Zehtindjiev, P., Westerdahl, H., Bensch, S. (2015). Hidden costs of infection: Chronic malaria accelerates telomere degradation and senescence in wild birds. *Science*, 347 (6220), pp. 436–438. <https://doi.org/10.1126/science.1261121>
- Atkinson, C.T., Thomas, N.J., Hunter, D.B. (2008). Parasitic diseases of wild birds. Ames, Iowa : Wiley-Blackwell, 595 p.
- Atkinson, C.T., Van Riper III, C. (1991). Pathogenicity and epizootiology of avian haematozoa: Plasmodium, Leucocytozoon, and Haemoproteus. *Bird-Parasite Interactions: Ecology, Evolution and Behaviour*, Oxford University Press, pp. 19–48.
- Ballweber, L.R. (2004). Waterfowl parasites. *Seminars in Avian and Exotic Pet Medicine*, 13 (4), pp. 197–205. <https://doi.org/10.1053/j.saep.2004.04.005>
- Banbura, J., Skwarska, J., Banbura, M., Gladalski, M., Holysz, M., Kalinski, A., Markowski, M., Wawrzyniak, J., Zielinski, P. (2013). Spatial and Temporal Variation in Heterophil-to-Lymphocyte Ratios of Nestling Passerine Birds: Comparison of Blue Tits and Great Tits. *PLoS ONE*, 8 (9). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0074226>
- Barbault, R. (1995). Ecologie des peuplements: structure et dynamique de la biodiversité. Paris : Elsevier Masson, 273 p.
- Beauchamp, G. (2008). What is the magnitude of the group-size effect on vigilance? *Behavioral Ecology*, 19 (6), pp. 1361–1368. <https://doi.org/10.1093/beheco/arn096>
- Behney, A.C., O'Shaughnessy, R., Eichholz, M.W., Stafford, J.D. (2018). Indirect risk effects reduce feeding efficiency of ducks during spring. *Ecology and Evolution*, 8 (2), pp. 961–972. <https://doi.org/10.1002/ece3.3714>
- Bennett, G.F., Blandin, W., Heusmann, H.W., Campbell, A.G. (1974). Hematozoa of the Anatidae of the Atlantic Flyway. I. Massachusetts. *Journal of Wildlife Diseases*, 10 (4), pp. 442–451. <https://doi.org/10.7589/0090-3558-10.4.442>
- Bennett, L.J. (1938). The Blue-Winged Teal: Its Ecology and Management. Ames, Iowa : Collegiate press Incorporated, 144 p.
- Bennett, G.F., Nieman, D.J., Turner, B., Kuyt, E., Whiteway, M., Greiner, E.C. (1982). Blood parasites of Prairie Anatids and their implication in waterfowl management in Alberta and Saskatchewan. *Journal of Wildlife Diseases*, 18 (3), pp. 287–296. <https://doi.org/10.7589/0090-3558-18.3.287>
- Bennett, G.F., Smith, A.D., Whitman, W., Cameron, M. (1975). Hematozoa of the Anatidae of the Atlantic Flyway. II. The Maritime Provinces of Canada. *Journal of Wildlife Diseases*, 11 (2), pp. 280–289. <https://doi.org/10.7589/0090-3558-11.2.280>
- Bergeron, R., Cousineau, M., Cyr, M.-A. (2015). Population status of migratory game birds in Canada. Gatineau, Québec : Environment Canada, 236 p.
- Blas, J. Chapter 33: Stress in birds. In : Scanes, C.G., Sturkie, P.D. (2015). Sturkie's avian physiology -, Sixth Edition. London : Elsevier/Academic Press.
- Bortolotti, G.R., Marchant, T., Blas, J., Cabezas, S. (2009). Tracking stress: localisation, deposition and stability of corticosterone in feathers. *Journal of Experimental Biology*, 212 (10), pp. 1477–1482. <https://doi.org/10.1242/jeb.022152>
- Bortolotti, G.R., Marchant, T.A., Blas, J., German, T. (2008). Corticosterone in feathers is a long-term, integrated measure of avian stress physiology. *Functional Ecology*, 22 (3), pp. 494–500. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2008.01387.x>
- Boves, T.J., Fairhurst, G.D., Rushing, C.S., Buehler, D.A. (2016). Feather corticosterone levels are related to age and future body condition, but not to subsequent fitness, in a declining migratory songbird. *Conservation Physiology*, 4 (1). <https://doi.org/10.1093/conphys/cow041>

- Braga, É.M., Silveira, P., Belo, N.O., Valkiūnas, G. (2011). Recent advances in the study of avian malaria: an overview with an emphasis on the distribution of *Plasmodium* spp in Brazil. *Memorias do Instituto Oswaldo Cruz*, 106 (1), pp. 3–11. <https://doi.org/10.1590/S0074-02762011000900002>
- Brambilla, M., Gustin, M., Cento, M., Ilahiane, L., Celada, C. (2019). Predicted effects of climate factors on mountain species are not uniform over different spatial scales. *Journal of Avian Biology*, 50 (9). <https://doi.org/10.1111/jav.02162>
- Buck, J.C., Hechinger, R.F., Wood, A.C., Stewart, T.E., Kuris, A.M., Lafferty, K.D. (2017). Host density increases parasite recruitment but decreases host risk in a snail-trematode system. *Ecology*, 98 (8), pp. 2029–2038. <https://doi.org/10.1002/ecy.1905>
- Burkett-Cadena, N.D., Bingham, A.M., Unnasch, T.R. (2014). Sex-biased avian host use by arbovirus vectors. *Royal Society Open Science*, 1 (3). <https://doi.org/10.1098/rsos.140262>
- Calero-Riestra, M., García, J.T. (2016). Sex-dependent differences in avian malaria prevalence and consequences of infections on nestling growth and adult condition in the Tawny pipit, *Anthus campestris*. *Malaria Journal*, 15 (1), pp. 178-189. <https://doi.org/10.1186/s12936-016-1220-y>
- Camacho, C., Canal, D., Potti, J. (2017). Lifelong effects of trapping experience lead to age-biased sampling: lessons from a wild bird population. *Animal Behaviour*, 130, pp. 133–139. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2017.06.018>
- Campbell, T.W. (2015). Exotic animal hematology and cytology, Fourth edition. Ames, Iowa : Wiley-Blackwell, 432 p.
- Campo, J.L., Garcia-Gil, M., Davila, S. (2005). Effect of intermingling chicks and bird density on fear and stress responses in chickens. *Archiv fur Geflugelkunde*, 69 (5), pp 199-205.
- Canada, Environment and Climate Change Canada (2019). Canada's changing climate report. Ottawa, Ontario : Government of Canada, 444 p.
- Carney, S.M. (1992). Species, Age and Sex Identification of Ducks Using Wing Plumage. Washington D.C. : U.S. Dept. of the Interior, U.S. Fish and Wildlife Service, 144 p.
- Catry, P., Phillips, R.A., Croxall, J.P. Sexual segregation in birds: patterns, processes and implications for conservation. In : Ruckstuhl, K., Neuhaus, P. (2006). Sexual Segregation in Vertebrates. Cambridge : Cambridge University Press, pp. 351–378. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511525629.019>
- Cayman Chemical Company (2016). Corticosterone ELISA Kit - Item No. 501320 - Instructions. Ann Arbor, Minnesota : Cayman Chemical. 35 p.
- Charles-Smith, L.E., Rutledge, M.E., Meek, C.J., Baine, K., Massey, E., Ellsaesser, L.N., DePerno, C.S., Moorman, C.E., Degernes, L.A. (2014). Hematologic Parameters and Hemoparasites of Nonmigratory Canada Geese (*Branta canadensis*) From Greensboro, North Carolina, USA. *Journal of Avian Medicine and Surgery*, 28 (1), pp. 16–23. <https://doi.org/10.1647/2012-072>
- Čirule, D., Krama, T., Vrublevska, J., Rantala, M.J., Krams, I. (2012). A rapid effect of handling on counts of white blood cells in a wintering passerine bird: a more practical measure of stress? *Journal of Ornithology*, 153 (1), pp. 161–166. <https://doi.org/10.1007/s10336-011-0719-9>
- Clark, N.J., Wells, K., Dimitrov, D., Clegg, S.M. (2016). Co-infections and environmental conditions drive the distributions of blood parasites in wild birds. *Journal of Animal Ecology*, 85 (6), pp. 1461–1470. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.12578>
- Clark, P., 2015. Observed variation in the heterophil to lymphocyte ratio values of birds undergoing investigation of health status. *Comparative Clinical Pathology*, 24 (5), pp. 1151–1157. <https://doi.org/10.1007/s00580-014-2052-1>
- Conservation of Migratory Species of Wild Animals, Galbraith, C.A., Jones, T., Kirby, J. (2014). A Review of Migratory Bird Flyways and Priorities for Management. CMS Technical Series (No 27). Bonn : UNEP/CMS Secretariat, 164 p.
- Cooper, N., Bond, A.L., Davis, J.L., Portela Miguez, R., Tomsett, L., Helgen, K.M. (2019). Sex biases in bird and mammal natural history collections. *Proceedings of the Royal Society B : Biological Sciences*, 286 (1913), pp. 2019-2025. <https://doi.org/10.1098/rspb.2019.2025>
- Cornelius, J.M., Perfito, N., Zann, R., Breuner, C.W., Hahn, T.P. (2011). Physiological trade-offs in self-maintenance: plumage molt and stress physiology in birds. *Journal of Experimental Biology*, 214 (16), pp. 2768–2777. <https://doi.org/10.1242/jeb.057174>

- Cornet, S., Nicot, A., Rivero, A., Gandon, S. (2013). Both infected and uninfected mosquitoes are attracted toward malaria infected birds. *Malaria Journal*, 12 (1), p. 179. <https://doi.org/10.1186/1475-2875-12-179>
- Creel, S., Dantzer, B., Goymann, W., Rubenstein, D.R., 2013. The ecology of stress: effects of the social environment. *Functional Ecology*, 27 (1), pp. 66–80. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2012.02029.x>
- Crossin, G.T., Phillips, R.A., Lattin, C.R., Romero, L.M., Williams, T.D. (2013). Corticosterone mediated costs of reproduction link current to future breeding. *General and Comparative Endocrinology*, 193, pp. 112–120. <https://doi.org/10.1016/j.ygcen.2013.07.011>
- Currie, D.C.. Black Flies (Diptera: *Simuliidae*) of the Prairie Grasslands of Canada. In: Currie, D.C. (2014). *Arthropods of Canadian Grasslands (Volume 3): Biodiversity and Systematics Part 1*. Toronto, Ontario : Biological Survey of Canada, pp. 371–387.
- Davis, A.K., Maney, D.L., Maerz, J.C. (2008). The use of leukocyte profiles to measure stress in vertebrates: a review for ecologists. *Functional Ecology*, 22 (5), pp. 760–772. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2008.01467.x>
- De La Torre, G.M., Freitas, F.F., Fratoni, R.D.O., Guaraldo, A.D.C., Dutra, D.D.A., Braga, É.M., Manica, L.T. (2020). Hemoparasites and their relation to body condition and plumage coloration of the White-necked thrush (*Turdus albicollis*). *Ethology Ecology and Evolution*, 32 (6), pp. 509–526. <https://doi.org/10.1080/03949370.2020.1769739>
- Deviche, P., Greiner, E.C., Manteca, X. (2001). Seasonal and age-related changes in blood parasite prevalence in dark-eyed juncos (*Junco hyemalis*, Aves, Passeriformes). *Journal of Experimental Zoology*, 289 (7), pp. 456–466. <https://doi.org/10.1002/jez.1027>
- Domènech, J., Senar, J.C. (1997). Trapping methods can bias age ratio in samples of passerine populations. *Bird Study*, 44 (3), pp. 348–354. <https://doi.org/10.1080/00063659709461070>
- Elarabany, N. (2018). A comparative study of some haematological and biochemical parameters between two species from the Anatidae family within migration season. *Journal of Basic and Applied Zoology*, 79 (1), pp. 1-9. <https://doi.org/10.1186/s41936-018-0044-4>
- Elbers, A.R.W., Koenraad, C., Meiswinkel, R. (2015). Mosquitoes and Culicoides biting midges: vector range and the influence of climate change. *Revue Scientifique et Technique de l'OIE*, 34 (1), pp. 123–137. <https://doi.org/10.20506/rst.34.1.2349>
- Environment and Climate Change Canada (2017). Regional highlights for the Prairie Provinces for 2008 [en ligne]. <https://ec.gc.ca/meteo-weather/default.asp?lang=En&n=9A083D66-1> (consulté le 20/09/2020).
- Environment and Climate Change Canada and Government of Canada (2019). Historical Data - Climate [en ligne]. [https://climate.weather.gc.ca/historical\\_data/search\\_historic\\_data\\_e.html](https://climate.weather.gc.ca/historical_data/search_historic_data_e.html) (consulté le 28/07/2020).
- Fairhurst, G.D., Dawson, R.D., van Oort, H., Bortolotti, G.R. (2014). Synchronizing feather-based measures of corticosterone and carotenoid-dependent signals: what relationships do we expect? *Oecologia*, 174 (3), pp. 689–698. <https://doi.org/10.1007/s00442-013-2830-5>
- Forest-Bérard, K., Institut national de santé publique du Québec, Direction des risques biologiques et de la santé au travail (2019). Utilisation d'indicateurs météorologiques de la présence de vecteurs du virus du Nil occidental (VNO): synthèse des connaissances. Montréal, Québec : Institut national de santé publique du Québec, 46 p.
- Fowler, M.E., Cubas, Z.S. (2001). *Biology, medicine, and surgery of South American wild animals*, 1st edition. Ames, Iowa : Iowa State University Press, 536 p.
- Fox, A., Flint, P., Hohman, W., Savard, J.-P. (2014). Waterfowl habitat use and selection during the remigial moult period in the northern hemisphere. *Wildfowl*, 4, pp.131-168.
- Freeman, N.E., Newman, A.E.M. (2018). Quantifying corticosterone in feathers: validations for an emerging technique. *Conservation Physiology*, 6 (1). <https://doi.org/10.1093/conphys/coy051>
- Friend, M., United States Geological Survey. (1999). *Field manual of wildlife diseases: general field procedures and diseases of birds*. Washington D.C. : U.S. Dept. of the Interior, U.S. Geological Survey, 426 p.
- Garvon, J.M., Mott, J.B., Jacobs, S.S., Fedynich, A.M. (2016). Blood Parasites of Blue-winged Teal (*Anas discors*) from Two Migratory Corridors, in the Southern USA. *Journal of Wildlife Diseases*, 52 (3), pp. 725–729. <https://doi.org/10.7589/2016-01-010>

- Gerry, A.C., Mullens, B.A. (2000). Seasonal Abundance and Survivorship of *Culicoides sonorensis* (Diptera: Ceratopogonidae) at a Southern California Dairy, with Reference to Potential Bluetongue Virus Transmission and Persistence. *Journal of Medical Entomology*, 37 (5), pp. 675–688. <https://doi.org/10.1603/0022-2585-37.5.675>
- Granthon, C., Williams, D.A. (2017). Avian Malaria, Body Condition, and Blood Parameters In Four Species of Songbirds. *Wilson Journal of Ornithology*, 129 (3), pp. 492–508. <https://doi.org/10.1676/16-060.1>
- Guillemain, M., Elmberg, J. (2014). The teal. London : T & AD Poyser, 320 p.
- Heath, J. (1997). Corticosterone Levels during Nest Departure of Juvenile American Kestrels. *The Condor*, 99 (3), pp. 806–811. <https://doi.org/10.2307/1370493>
- Heckert, R.A., Estevez, I., Russek-Cohen, E., Pettit-Riley, R. (2002). Effects of density and perch availability on the immune status of broilers. *Poultry Science*, 81 (4), pp. 451–457. <https://doi.org/10.1093/ps/81.4.451>
- Heisey, D.M., Jennelle, C.S., Russell, R.E., Walsh, D.P. (2014). Using Auxiliary Information to Improve Wildlife Disease Surveillance When Infected Animals Are Not Detected: A Bayesian Approach. *PLoS ONE*, 9 (3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0089843>
- Helbing, C.M., Moorhead, D.L., Mitchell, L. (2015). Population Dynamics of *Culex restuans* and *Culex pipiens* (Diptera: Culicidae) Related to Climatic Factors in Northwest Ohio. *Environmental Entomology*, 44 (4), pp. 1022–1028. <https://doi.org/10.1093/ee/nvv094>
- Hill, R.W., Wyse, G.A., Anderson, M. (2012). Animal physiology, 3rd edition. Sunderland, Mass : Sinauer Associates, Inc. Publishers. 800 p.
- Hines, R.W. (1978). Ducks at a distance a waterfowl identification guide. Hamberg : Tredition GmbH, 71 p.
- Hörak, P., Ots, I., Tegelmann, L., Møller, A.P. (2000). Health impact of phytohaemagglutinin-induced immune challenge on great tit (*Parus major*) nestlings. *Canadian Journal of Zoology*, 78 (6), pp. 905–910. <https://doi.org/10.1139/cjz-78-6-905>
- Houston, A.I., McNamara, J.M., Barta, Z., Klasing, K.C. (2007). The effect of energy reserves and food availability on optimal immune defence. *Proceedings of the Royal Society B: Biology Science*, 274 (1627), pp. 2835–2842. <https://doi.org/10.1098/rspb.2007.0934>
- Howerter, D.W., Anderson, M.G., Devries, J.H., Joynt, B.L., Armstrong, L.M., Emery, R.B., Arnold, T.W. (2014). Variation in mallard vital rates in Canadian Aspen Parklands: The Prairie Habitat Joint Venture assessment: Variation in Mallard Vital Rates. *Wildlife Monographs*, 188 (1), pp. 1–37. <https://doi.org/10.1002/wmon.1012>
- Jenkins, T., Thomas, G.H., Hellgren, O., Owens, I.P.F. (2012). Migratory behavior of birds affects their coevolutionary relationship with blood parasites: effects of host traits on coevolution. *Evolution*, 66 (3), pp. 740–751. <https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.2011.01470.x>
- Johnson, W.C., Millett, B.V., Gilmanov, T., Voldseth, R.A., Guntenspergen, G.R., Naugle, D.E. (2005). Vulnerability of Northern Prairie Wetlands to Climate Change. *BioScience*, 55 (10), pp. 863–872. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2005\)055\[0863:VONPWT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2005)055[0863:VONPWT]2.0.CO;2)
- Lachish, S., Knowles, S.C.L., Alves, R., Wood, M.J., Sheldon, B.C. (2011). Infection dynamics of endemic malaria in a wild bird population: parasite species-dependent drivers of spatial and temporal variation in transmission rates: Infection dynamics of endemic avian malaria. *Journal of Animal Ecology*, 80 (6), pp. 1207–1216. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2011.01893.x>
- Lachish, S., Murray, K.A. (2018). The Certainty of Uncertainty: Potential Sources of Bias and Imprecision in Disease Ecology Studies. *Frontiers in Veterinary Science*, 5, pp.1-14. <https://doi.org/10.3389/fvets.2018.00090>
- Legagneux, P., Harms, N.J., Gauthier, G., Chastel, O., Gilchrist, H.G., Bortolotti, G., Bêty, J., Soos, C. (2013). Does Feather Corticosterone Reflect Individual Quality or External Stress in Arctic-Nesting Migratory Birds? *PLoS ONE*, 8 (12). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0082644>
- Lendvai, Á.Z., Giraudeau, M., Bókony, V., Angelier, F., Chastel, O. (2015). Within-individual plasticity explains age-related decrease in stress response in a short-lived bird. *Biology Letters*. 11 (7). <https://doi.org/10.1098/rsbl.2015.0272>
- Levin, I.I., Parker, P.G. Haemosporidian Parasites. In: Levin, I.I, Parker, P.G. (2012) *Fowler's Zoo and Wild Animal Medicine*. Paris : Elsevier Masson, pp. 356–363.

- Loiseau, C., Harrigan, R.J., Bichet, C., Julliard, R., Garnier, S., Lendvai, Á.Z., Chastel, O., Sorci, G. (2013). Predictions of avian Plasmodium expansion under climate change. *Scientific Reports*, 3 (1). <https://doi.org/10.1038/srep01126>
- Lovász Lovász, L., Roth, T., Karcza, Z., Lukács, K.O., Gyurác, J., Amrhein, V. (2018). Survival, dispersal, and capture probability of male and female birds. *Biology, Peerj Preprints*. <https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.27090v2>
- Lüdtke, B., Moser, I., Santiago-Alarcon, D., Fischer, M., Kalko, E.KV., Schaefer, H.M., Suarez-Rubio, M., Tschapka, M., Renner, S.C. (2013). Associations of Forest Type, Parasitism and Body Condition of Two European Passerines, *Fringilla coelebs* and *Sylvia atricapilla*. *PLoS ONE*, 8 (12). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0081395>
- Lysyk, T.J. (2010). Species Abundance and Seasonal Activity of Mosquitoes on Cattle Facilities in Southern Alberta, Canada. *Journal of Medical Entomology*, 47 (1), pp. 32–42. <https://doi.org/10.1093/jmedent/47.1.32>
- Lysyk, T.J., Danyk, T. (2007). Effect of Temperature on Life History Parameters of Adult *Culicoides sonorensis* (Diptera: Ceratopogonidae) in Relation to Geographic Origin and Vectorial Capacity for Bluetongue Virus. *Journal of Medical Entomology*, 44 (5), pp. 741–751. <https://doi.org/10.1093/jmedent/44.5.741>
- Lysyk, T.J., Galloway, T.D. Biting Flies (*Culicidae*, *Ceratopogonidae*, *Tabanidae*) of the Prairies Ecozone In : Lysyk, T.J., Galloway, T.D. (2014). Arthropods of Canadian Grasslands: Biodiversity and Systematics Part1. Toronto, Ontario : Biological Survey of Canada. pp. 389-398.
- Martinsen, E.S., Blumberg, B.J., Eisen, R.J., Schall, J.J. (2008). Avian Hemosporidian Parasites from Northern California Oak Woodland and Chaparral Habitats. *Journal of Wildlife Diseases*, 44 (2), pp. 260–268. <https://doi.org/10.7589/0090-3558-44.2.260>
- Mausser, D.M., Mensik, J.G. (1992). A Portable Trap for Ducks. *Wildlife Society Bulletin*, 20 (3), pp. 299–302.
- Mayor, S.J., Guralnick, R.P., Tingley, M.W., Otegui, J., Withey, J.C., Elmendorf, S.C., Andrew, M.E., Leyk, S., Pearse, I.S., Schneider, D.C. (2017). Increasing phenological asynchrony between spring green-up and arrival of migratory birds. *Scientific Report*, 7 (1), pp. 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-02045-z>
- McCurdy, D.G., Shutler, D., Mullie, A., Forbes, M.R. (1998). Sex-Biased Parasitism of Avian Hosts: Relations to Blood Parasite Taxon and Mating System. *Oikos*, 82 (2), pp. 303-312. <https://doi.org/10.2307/3546970>
- Meixell, B.W., Arnold, T.W., Lindberg, M.S., Smith, M.M., Runstadler, J.A., Ramey, A.M. (2016). Detection, prevalence, and transmission of avian hematozoa in waterfowl at the Arctic/sub-Arctic interface: co-infections, viral interactions, and sources of variation. *Parasites and Vectors*, 9 (1), pp. 390-408. <https://doi.org/10.1186/s13071-016-1666-3>
- Mercer, S.H., Craig, T.M. (1988). Comparison of Various Staining Procedures in the Identification of *Hepatozoon canis* Gamonts. *Veterinary Clinical Pathology*, 17 (3), pp. 63–65. <https://doi.org/10.1111/j.1939-165X.1988.tb00492.x>
- Millennium Ecosystem Assessment (Program). (2005). Ecosystems and human well-being: synthesis. Washington D.C. : Island Press, 137 p.
- Møller, A.P., Fiedler, W., Berthold, P. (2010). Effects of climate change on birds. Oxford : University Press, Oxford, 321 p.
- Mooring, M.S., Hart, B.L., 1992. Animal Grouping for Protection From Parasites: Selfish Herd and Encounter-Dilution Effects. *Behaviour*, 123 (3-4), pp. 173–193. <https://doi.org/10.1163/156853992X00011>
- Mullen, G.R. (2019). Medical and veterinary entomology, 3rd edition. San Diego : Elsevier, 792 p.
- Müller, C., Jenni-Eiermann, S., Jenni, L. (2011). Heterophils/Lymphocytes-ratio and circulating corticosterone do not indicate the same stress imposed on Eurasian kestrel nestlings: H/L-ratio and corticosterone in kestrel nestlings. *Functional Ecology*, 25 (3), pp. 566–576. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2010.01816.x>
- Nallar, R., Papp, Z., Leighton, F.A., Epp, T., Pasick, J., Berhane, Y., Lindsay, R., Soos, C. (2016). Ecological determinants of Avian Influenza virus, West Nile virus, and Avian Paramyxovirus infection and antibody status in Blue-winged Teal (*Anas discors*) in the Canadian Prairies. *Journal of Wildlife Diseases*, 52 (1), pp. 33–46. <https://doi.org/10.7589/2013-07-191>

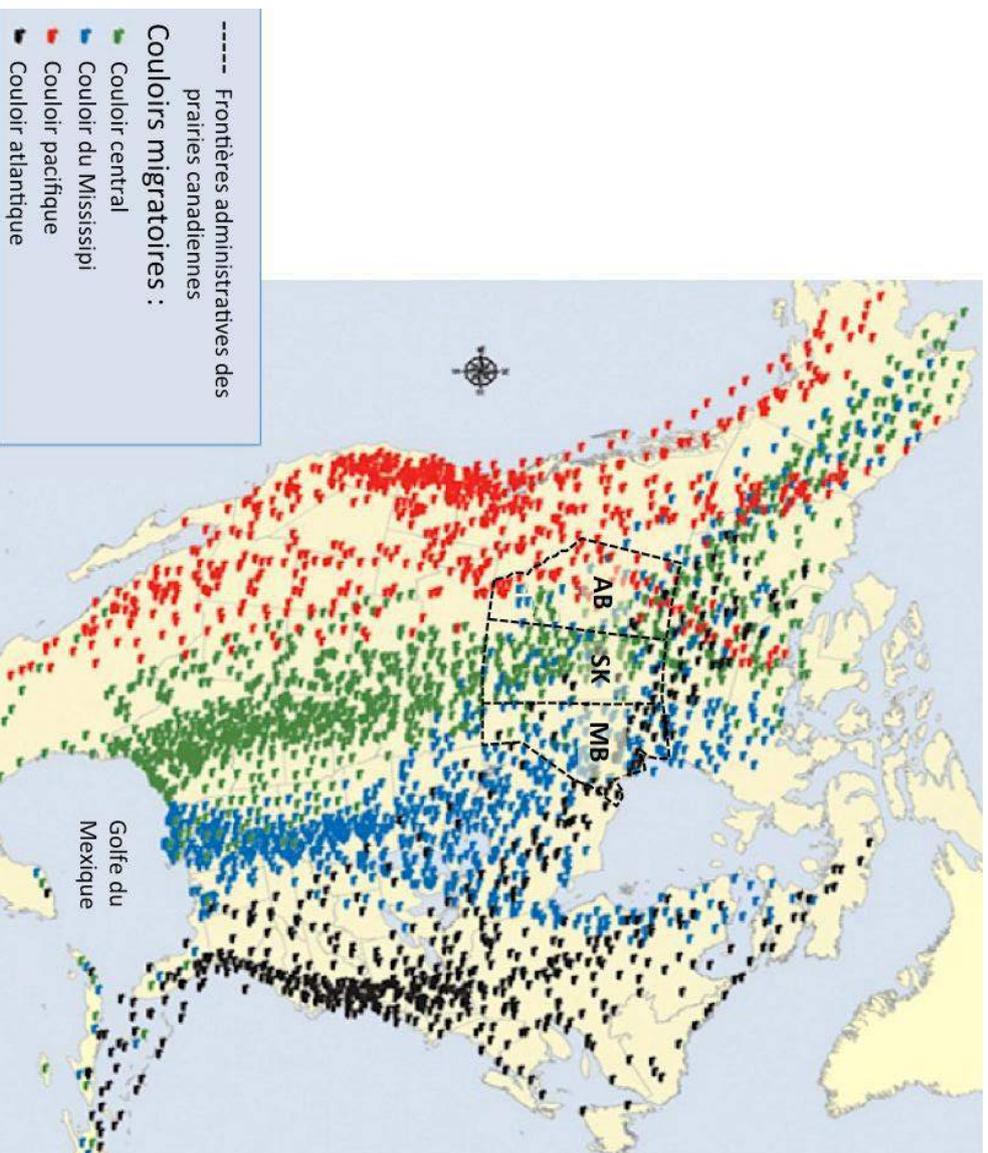
- Norte, A.C., Araújo, P.M., Sampaio, H.L., Sousa, J.P., Ramos, J.A. (2009). Haematzoa infections in a Great Tit *Parus major* population in Central Portugal: relationships with breeding effort and health: Haematzoa infections in Great Tits from Central Portugal. *Ibis*, 151 (4), pp. 677–688. <https://doi.org/10.1111/j.1474-919X.2009.00960.x>
- Ots, I., Horak, P., 1996. Great tits *Parus major* trade health for reproduction. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 263 (1376), pp. 1443–1447. <https://doi.org/10.1098/rspb.1996.0210>
- Palinauskas, V., Valkiūnas, G., Bolshakov, C.V., Bensch, S. (2008). *Plasmodium relictum* (lineage P-SGS1): Effects on experimentally infected passerine birds. *Experimental Parasitology*, 120 (4), pp. 372–380. <https://doi.org/10.1016/j.exppara.2008.09.001>
- Pap, P.L., Vágási, C.I., Tökölyi, J., Czirják, G.Á., Barta, Z. (2010). Variation in Haematological Indices and Immune Function During the Annual Cycle in the Great Tit *Parus major*. *Ardea*, 98 (1), pp. 105–112. <https://doi.org/10.5253/078.098.0113>
- Papp, Z., Clark, R.G., Parmley, E.J., Leighton, F.A., Waldner, C., Soos, C. (2017). The ecology of avian influenza viruses in wild dabbling ducks (*Anas spp.*) in Canada. *PLOS ONE*, 12. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176297>
- Peig, J., Green, A.J. (2009). New perspectives for estimating body condition from mass/length data: the scaled mass index as an alternative method. *Oikos*, 118 (12), pp. 1883–1891. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2009.17643.x>
- Plowright, R.K., Cross, P.C., Tabor, C., Hudson, P., Almberg, E., Bienen, L. (2012). Climate Change and Infectious Disease Dynamics. *New Directions in Conservation Medicine*, 2, pp. 111–121.
- Pulgarín-R, P.C., Gómez, J.P., Robinson, S., Ricklefs, R.E., Cadena, C.D. (2018). Host species, and not environment, predicts variation in blood parasite prevalence, distribution, and diversity along a humidity gradient in northern South America. *Ecology and Evolution*, 8 (8), pp. 3800–3814. <https://doi.org/10.1002/ece3.3785>
- Putman, R.J. (1995). Ethical considerations and animal welfare in ecological field studies. *Biodiversity and Conservation*, 4 (8), pp. 903–915. <https://doi.org/10.1007/BF00056197>
- Quillfeldt, P., Ruiz, G., Rivera, M.A., Masello, J.F. (2008). Variability in leucocyte profiles in thin-billed prions *Pachyptila belcheri*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular Integrative Physiology*, 150 (1), pp. 26–31. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2008.02.021>
- Ramey, A.M., Reed, J.A., Walther, P., Link, P., Schmutz, J.A., Douglas, D.C., Stallknecht, D.E., Soos, C. (2016). Evidence for the exchange of blood parasites between North America and the Neotropics in blue-winged teal (*Anas discors*). *Parasitology Research*, 115 (10), pp. 3923–3939. <https://doi.org/10.1007/s00436-016-5159-2>
- Rashford, B.S., Bastian, C.T., Cole, J.G. (2011). Agricultural Land-Use Change in Prairie Canada: Implications for Wetland and Waterfowl Habitat Conservation. *Canadian Journal of Agricultural Economics*, 59 (2), pp. 185–205. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7976.2010.01212.x>
- Robertson, J.K., Muir, C., Hurd, C.S., Hing, J.S., Quinn, J.S. (2017). The effect of social group size on feather corticosterone in the co-operatively breeding Smooth-billed Ani (*Crotophaga ani*): An assay validation and analysis of extreme social living. *PLOS ONE*, 12 (3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174650>
- Rohwer, F.C., Anderson, M.G. Female-Biased Philopatry, Monogamy, and the Timing of Pair Formation in Migratory Waterfowl. In: Johnston, R.F. (1988). *Current Ornithology*. Boston : Springer US, pp. 187–221. [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6787-5\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6787-5_4)
- Rohwer, F.C., Johnson, W.P., Loos, E.R. (2002). Blue-winged Teal (*Anas discors*). *Birds of North America Online* [en ligne]. <https://birdsna.org/Species-Account/bna/species/buwtea/introduction> (consulté le 10/10/2019).
- Romero, L.M., Dickens, M.J., Cyr, N.E. (2009). The reactive scope model — A new model integrating homeostasis, allostasis, and stress. *Hormones and Behavior*, 55 (3), pp. 375–389. <https://doi.org/10.1016/j.yhbeh.2008.12.009>
- Romero, L.M., Fairhurst, G.D. (2016). Measuring corticosterone in feathers: Strengths, limitations, and suggestions for the future. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular Integrative Physiology*, 202, pp. 112–122. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2016.05.002>

- Romero, L.M., Ramenofsky, M., Wingfield, J.C. (1997). Season and Migration Alters the Corticosterone Response to Capture and Handling in an Arctic Migrant, the White-Crowned Sparrow (*Zonotrichia leucophrys gambelii*). *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Pharmacology, Toxicology, Endocrinology*, 116 (2), pp. 171–177. [https://doi.org/10.1016/S0742-8413\(96\)00208-3](https://doi.org/10.1016/S0742-8413(96)00208-3)
- RStudio Team, 2020. RStudio: Integrated Development for R. Boston : RStudio, PBC.
- Rush, E.M. Advances in clinical pathology and diagnostic medicine. In : Rush, E.M., Wernick, M., Beaufrère, H., Ammersbach, M., Vergneau-Grosset, C., Stacy, N., Pendl, H., Wellehan, J.F.X., Warren, K., Souef, A.L., Cooley, C., Klandorf, H. (2016). Current Therapy in Avian Medicine and Surgery. Paris : Elsevier, pp. 461–530. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-4671-2.00022-7>
- Salleh Hudin, N., Teyssier, A., Aerts, J., Fairhurst, G.D., Strubbe, D., White, J., De Neve, L., Lens, L. (2018). Do wild-caught urban house sparrows show desensitized stress responses to a novel stressor? *Biology Open*, 7 (6). <https://doi.org/10.1242/bio.031849>
- Sanders, C.J., Shortall, C.R., England, M., Harrington, R., Purse, B., Burgin, L., Carpenter, S., Gubbins, S. (2019). Long-term shifts in the seasonal abundance of adult *Culicoides* biting midges and their impact on potential arbovirus outbreaks. *Journal of Applied Ecology*, 56 (7), pp. 1649–1660. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13415>
- Santiago-Alarcon, D., Palinauskas, V., Schaefer, H.M. (2012). Diptera vectors of avian Haemosporidian parasites: untangling parasite life cycles and their taxonomy. *Biological Reviews*, 87 (4), pp. 928–964. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.2012.00234.x>
- Schlaepfer, M.A., Runge, M.C., Sherman, P.W. (2002). Ecological and evolutionary traps. *Trends in Ecology and Evolution*, 17 (10), pp. 474–480. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(02\)02580-6](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(02)02580-6)
- Scordato, E.S.C., Kardish, M.R. (2014). Prevalence and beta diversity in avian malaria communities: host species is a better predictor than geography. *Journal of Animal Ecology*, 83 (6), pp. 1387–1397. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.12246>
- Simitzis, P.E., Kalogeraki, E., Goliomytis, M., Charismiadou, M.A., Triantaphyllopoulos, K., Ayoutanti, A., Niforou, K., Hager-Theodorides, A.L., Deligeorgis, S.G. (2012). Impact of stocking density on broiler growth performance, meat characteristics, behavioural components and indicators of physiological and oxidative stress. *British Poultry Science*, 53 (6), pp. 721–730. <https://doi.org/10.1080/00071668.2012.745930>
- Skwarska, J. (2019). Variation of Heterophil-to-Lymphocyte Ratio in the Great Tit *Parus major* — a Review. *Acta Ornithology*, 53 (2). <https://doi.org/10.3161/00016454AO2018.53.2.001>
- Smith, M.M., Ramey, A.M. (2015). Prevalence and genetic diversity of haematzoa in South American waterfowl and evidence for intercontinental redistribution of parasites by migratory birds. *International Journal Parasitology Parasites and Wildlife*, 4 (1), pp. 22–28. <https://doi.org/10.1016/j.ijppaw.2014.12.007>
- Starkweather, J. (2011). Bayesian Generalized Linear Models in R. Benchmarks RSS Matters.
- Taves, M.D., Gomez-Sanchez, C.E., Soma, K.K. (2011). Extra-adrenal glucocorticoids and mineralocorticoids: evidence for local synthesis, regulation, and function. *American Journal of Physiology Endocrinology and Metabolism*, 301 (1), pp. 11–24. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.00100.2011>
- Taylor, M.A., Coop, R.L., Wall, R. (2016). Veterinary parasitology, 4th edition. Ames, Iowa : John Wiley and Sons, Inc, 1006 p.
- Thaxton, J.P., Dozier, W.A., Branton, S.L., Morgan, G.W., Miles, D.W., Roush, W.B., Lott, B.D., Vizzier-Thaxton, Y. (2006). Stocking Density and Physiological Adaptive Responses of Broilers. *Poultry Science*, 85 (5), pp. 819–824. <https://doi.org/10.1093/ps/85.5.819>
- The Teal Harvest Potential Working Group, Devink, J.-M. (2013). An Assessment of the Harvest Potential of North American Teal. , 98 p.
- Tostes, R., Vashist, U., Scopel, K.K.G., Massard, C.L., Daemon, E., D'Agosto, M. (2015). *Plasmodium spp.* and *Haemoproteus spp.* infection in birds of the Brazilian Atlantic Forest detected by microscopy and polymerase chain reaction. *Pesquisa Veterinária Brasileira*, 35 (1), pp. 67–74. <https://doi.org/10.1590/S0100-736X2015000100014>
- Townsend, A.K., Wheeler, S.S., Freund, D., Sehgal, R.N.M., Boyce, W.M. (2018). Links between blood parasites, blood chemistry, and the survival of nestling American crows. *Ecology and Evolution*, 8 (17), pp. 8779–8790. <https://doi.org/10.1002/ece3.4287>
- USGS Patuxent Wildlife Research Center Bird Banding Laboratory, 2018. Bandit. Laurel, MD.

- Valkiūnas, G. (2005). Avian malaria parasites and other haemosporidia. Boca Raton : CRC Press, 932 p.
- Valkiūnas, G., Iezhova, T.A., Križanauskienė, A., Palinauskas, V., Sehgal, R.N.M., Bensch, S. (2008). A Comparative Analysis of Microscopy and PCR-Based Detection Methods for Blood Parasites. *Journal of Parasitology*, 94 (6), pp. 1395–1401. <https://doi.org/10.1645/GE-1570.1>
- Valkiūnas, G., Palinauskas, V., Ilgūnas, M., Bukauskaitė, D., Dimitrov, D., Bernotienė, R., Zehtindjiev, P., Ilieva, M., Iezhova, T.A. (2014). Molecular characterization of five widespread avian haemosporidian parasites (*Haemosporida*), with perspectives on the PCR-based detection of haemosporidians in wildlife. *Parasitology Research*, 113 (6), pp. 2251–2263. <https://doi.org/10.1007/s00436-014-3880-2>
- Van Hemert, C., Meixell, B.W., Smith, M.M., Handel, C.M. (2019). Prevalence and diversity of avian blood parasites in a resident northern passerine. *Parasites and Vectors*, 12 (1). <https://doi.org/10.1186/s13071-019-3545-1>
- van Hoesel, W., Marzal, A., Magallanes, S., Santiago-Alarcon, D., Ibáñez-Bernal, S., Renner, S.C. (2019). Management of ecosystems alters vector dynamics and haemosporidian infections. *Scientific Reports*, 9 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45068-4>
- van Oers, K., Richardson, D.S., Sæther, S.A., Komdeur, J. (2010). Reduced blood parasite prevalence with age in the Seychelles Warbler: selective mortality or suppression of infection? *Journal of Ornithology*, 151 (1), pp. 69–77. <https://doi.org/10.1007/s10336-009-0427-x>
- Vleck, C.M., Vertalino, N., Vleck, D., Bucher, T.L. (2000). Stress, Corticosterone, and Heterophil to Lymphocyte Ratios in Free-Living Adélie Penguins. *The Condor*, 102 (2), pp. 392–400. <https://doi.org/10.1093/condor/102.2.392>
- Wang, J., Ogden, N.H., Zhu, H. (2011). The Impact of Weather Conditions on *Culex pipiens* and *Culex restuans* (Diptera: Culicidae) Abundance: A Case Study in Peel Region. *Journal of Medical Entomology*, 48 (2), pp. 468–475. <https://doi.org/10.1603/ME10117>
- Waterfowl Breeding Population and Habitat Survey - Traditional Survey (2015) [en ligne]. <https://migbirdapps.fws.gov> (consulté le 10/07/2020)
- White, G.C., Burnham, K.P. (1999). Program MARK: survival estimation from populations of marked animals. *Bird Study*, 46, pp. 120–139. <https://doi.org/10.1080/00063659909477239>
- Will, A.P., Suzuki, Y., Elliott, K.H., Hatch, S.A., Watanuki, Y., Kitaysky, A.S. (2014). Feather corticosterone reveals developmental stress in seabirds. *Journal of Experimental Biology*, 217 (13), pp. 2371–2376. <https://doi.org/10.1242/jeb.098533>
- Wilson, C.M., Sims, C.G., Schoech, S.J., Peltier, S.K., Robinson, Z.L. (2017). A test of the migration-modulation hypothesis in a non-passerine Neotropical migrant, the Blue-winged Teal *Anas discors*. *Journal of Ornithology*, 158 (1), pp. 91–100. <https://doi.org/10.1007/s10336-016-1386-7>
- Wittmann, E.J., Baylis, M. (2000). Climate Change: Effects on Culicoides -Transmitted Viruses and Implications for the UK. *The Veterinary Journal*, 160 (2), pp. 107–117. <https://doi.org/10.1053/tvj.2000.0470>
- Wojczulanis-Jakubas, K., Jakubas, D., Czujkowska, A., Kulaszewicz, I., Kruszewicz, A.G. (2012). Blood Parasite Infestation and the Leukocyte Profiles in Adult and Immature Reed Warblers (*Acrocephalus scirpaceus*) and Sedge Warblers (*Acrocephalus schoenobaenus*) During Autumn Migration. *Annales Zoologici Fennici*, 49 (5-6), pp. 341–349. <https://doi.org/10.5735/086.049.0507>
- Zamora-Vilchis, I., Williams, S.E., Johnson, C.N. (2012). Environmental Temperature Affects Prevalence of Blood Parasites of Birds on an Elevation Gradient: Implications for Disease in a Warming Climate. *PLoS ONE*, 7 (6). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0039208>
- Zuk, M., Stoehr, A.M. Sex Differences in Susceptibility to Infection: An Evolutionary Perspective. In: Klein, S.L., Roberts, C. (2010). Sex Hormones and Immunity to Infection. Berlin : Springer Berlin Heidelberg, pp. 1–17. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-02155-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-02155-8_1)

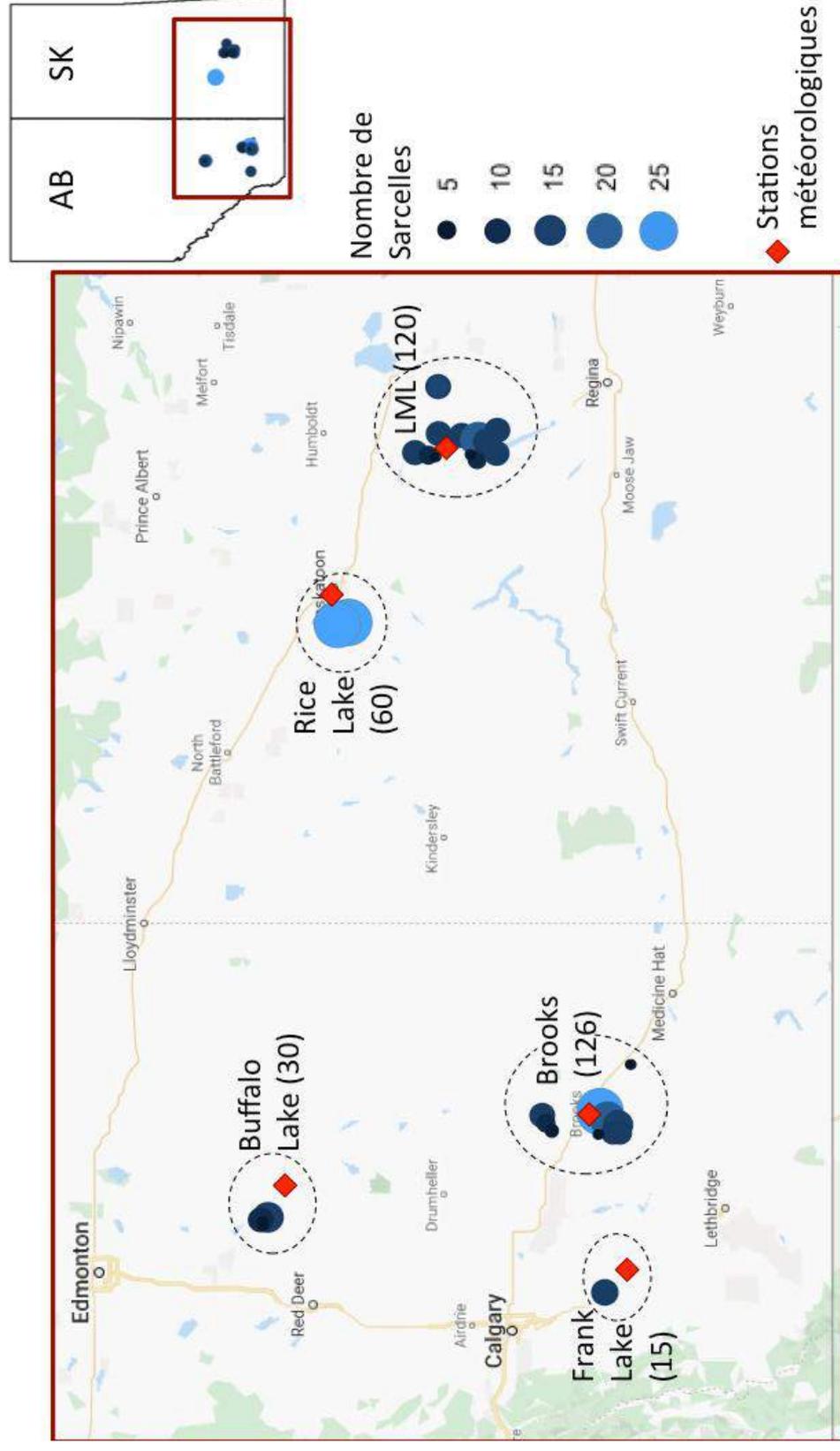
## Annexes

Annexe 1 : **Couloirs nord-américains de migration des canards de surface** (d'après ©North Dakota Game and Fish Department, USFWS) AB : Alberta ; SK : Saskatchewan ; MB : Manitoba



Annexe 2 : Sites de prélèvement des Sarcelles à ailes bleues incluses dans l'étude, en Alberta et Saskatchewan, entre 2007 et 2017. Le nombre total de sarcelles prélevées pour chaque site est indiqué entre parenthèses. Les stations météorologiques, dont sont issues les données climatiques, sont localisées à l'aide de losanges rouges.

AB : Alberta ; SK : Saskatchewan ; LML : Last Mountain Lake



### **Annexe 3 : Préparation des réactifs, solutions et contrôles internes pour la mesure de la corticostérone dans les plumes.**

#### **i) Milieu tampon**

La préparation du milieu tampon se fait en ajoutant les 10mL du contenu du flacon tampon du kit ELISA dans 90mL d'eau ultra-pure, qui correspond à une eau déminéralisée et libre de toute trace de contaminant organique. Le flacon vide est rincé avec quelques millilitres du mélange tampon réalisé, et ce jusqu'à ce que toutes les bulles pouvant se former aient disparues. Le tube contenant les 100mL du milieu tampon est homogénéisé à l'aide d'un agitateur de type VORTEX.

#### **ii) Solution étalon à 50ng/mL de corticostérone**

L'embout de la pipette est rempli et vidé de façon répétée plusieurs fois avec de l'éthanol. Avec cet embout, 100µL de l'étalon de corticostérone à 500ng/mL fourni avec le kit ELISA est transféré dans un tube de 1,5mL, auquel on ajoute 900µL d'eau ultra-pure. Une solution à la concentration de 50ng/mL est obtenue. Celle-ci peut être stockée et conservée six semaines à froid positif (4°C). Cette solution sert de base pour préparer les tubes étalons de corticostérone utilisés dans le processus ELISA.

#### **iii) Solution de corticostérone à 5000pg/mL**

Cette solution est préparée en réalisant une dilution au dixième de la préparation standard de corticostérone, en ajoutant 100µL de cette préparation à 900µL de la solution tampon du kit ELISA. La solution obtenue est utilisée pour préparer les contrôles internes et les échantillons.

#### **iv) Contrôles internes :**

Ces contrôles internes permettent de déterminer la variabilité entre les différents tests ELISA et assurer la fiabilité du processus.

Ils sont préparés à partir de la même solution de corticostérone utilisée pour le groupe d'échantillons avec lesquels ils seront analysés.

- Le témoin négatif : 10mL de méthanol sont ajoutés dans une fiole de verre vide.
- Deux contrôles de l'extraction à 200pg/mL de corticostérone : dans une fiole de verre contenant 10mL de méthanol, 20µL de la solution de corticostérone à 5000pg/mL sont adjoints. L'opération est répétée pour obtenir un deuxième contrôle.
- La plume témoin : cet échantillon correspond à un flacon contenant une plume qui a déjà subi précédemment un processus d'extraction et qui n'a donc plus de corticostérone. 10mL de méthanol sont ajoutés au flacon.
- Deux plumes avec un niveau de corticostérone contrôlé à 200pg/mL : 10mL de méthanol et 20µL de solution à 5000pg/mL de corticostérone sont mélangés dans une fiole contenant un échantillon ayant déjà subi une extraction. L'opération est répétée une seconde fois.

- Le témoin global : Ce témoin est un flacon de verre contenant 15mL de méthanol.
- Deux témoins à 200pg/mL de corticostérone : ces deux témoins correspondent à deux flacons contenant chacun 15mL de méthanol et 20 $\mu$ L de la solution de corticostérone à 5000pg/mL.

**Annexe 4 : Modèles de régression logistique construits pour étudier les facteurs de risque impliqués dans le portage d'hémosporidies aviaires chez la Sarcelle à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2008 à 2017 en excluant 2011, lors des rassemblements pré-migratoires (n=288).**

Annexe 4.A : Comparaison de modèles linéaires généralisés avec réponse binomiale et lien « logit », pour expliquer les variations observées dans le portage d'au moins un genre d'hémosporidies aviaires chez les Sarcelle à ailes bleues prélevées en Alberta et Saskatchewan, de 2008 à 2017, en excluant 2011, lors des rassemblements pré-migratoires (n=288).

<b>Modèle</b>	<b>K<sup>a</sup></b>	<b>AIC<sup>c,b</sup></b>
Âge + Sexe + Résidus de la densité de Sarcelles à ailes bleues + log(H/L) <sup>c</sup> + <i>Moyenne des températures journalières minimales en juin</i>	6	343,3
Âge + Sexe + Résidus de la densité de Sarcelles à ailes bleues + log(H/L) <sup>c</sup>	5	343,9
Âge + Sexe + Résidus de la densité de Sarcelles à ailes bleues + log(H/L) <sup>c</sup> + <i>Moyenne des températures journalières moyennes en juin</i>	6	344,1
Âge + Sexe + Résidus de la densité de Sarcelles à ailes bleues + log(H/L) <sup>c</sup> + <i>Moyenne de la température moyenne du 17 mai au jour de prélèvement</i>	6	344,6
Poids + Résidus de la densité de Sarcelles à ailes bleues + log(H/L) <sup>c</sup>	4	344,7
Âge + Sexe + Résidus de la densité de Sarcelles à ailes bleues	4	346,4
Âge + Sexe + Densité de population de canards de surface	4	346,5
Âge + Sexe + Moyenne des températures journalières moyennes du 17 mai au jour de prélèvement	4	347,2
Âge + Sexe + Moyenne des températures journalières minimales du 17 mai au jour de prélèvement	4	347,4
Âge + Sexe + log(H/L) <sup>c</sup>	4	347,6
Âge + Sexe	3	348,8
Âge + Sexe + log(CORTf) <sup>d</sup>	4	349,3
Âge + Sexe + Moyenne des températures journalières maximales du 17 mai au jour de prélèvement	4	349,3
Âge	2	352,9
Poids	2	355,7
Sexe	2	357,2
log(H/L) <sup>c</sup>	2	358,5
Longueur « tête-bec »	2	361,1
Moyenne des températures journalières moyennes du 17 mai au jour de prélèvement	2	361,2
Moyenne des températures journalières minimales en juin	2	361,6
Moyenne des températures journalières moyennes en juin	2	361,7
Moyenne des températures journalières minimales du 17 mai au jour de prélèvement	2	362,6
Moyenne des températures journalières maximales du 17 mai au jour de prélèvement	2	364,1
Résidus de la densité de Sarcelles à ailes bleues	2	364,2

Densité de population de canards de surface	5	364,5
log(CORTf) <sup>d</sup>	2	364,7
Densité de Sarcelles à ailes bleues	2	365,3
Moyenne des températures journalières minimales en juillet	2	365,3
Indice de condition corporelle	2	365,4
Moyenne des températures journalières maximales en juin	2	365,6
Moyenne des températures journalières moyennes en juillet	2	365,6
<b>Modèle nul</b>	<b>1</b>	<b>365,8</b>
Lieu de prélèvement	2	365,9
Moyenne des précipitations totales journalières en juin	2	365,9
Moyenne des températures journalières maximales en juillet	2	366,6
Vitesse moyenne du vent par heure du 17 mai au jour de prélèvement	2	366,7
Province	2	366,8
Pourcentage de Sarcelles à ailes bleues	2	367,0
Moyenne des précipitations totales journalières en juillet	2	367,0
Année	9	367,2
Moyenne des précipitations totales journalières du 17 mai au jour du prélèvement	2	367,5
Vitesse moyenne du vent par heure en juillet	2	367,5
Vitesse moyenne du vent par heure en juin	2	367,7
Densité en étendues d'eau peu profondes	2	367,7

<sup>a</sup> K = nombre de paramètre dans le modèle

<sup>b</sup> AIC<sub>c</sub> = Critère d'Information d'Akaike ajusté pour les échantillons de petite taille

<sup>c</sup> log(H/L) = rapport hétérophiles sur lymphocytes après transformation logarithmique

<sup>d</sup> log(CORTf) = niveaux de corticostérone dans les plumes après transformation logarithmique

Annexe 4.B : Comparaison de modèles linéaires généralisés avec réponse binomiale et lien « logit », pour expliquer les variations observées dans le portage d'*Haemoproteus* chez les Sarcelle à ailes bleues prélevées en Alberta et Saskatchewan, de 2008 à 2017, en excluant 2011, lors des rassemblements pré-migratoires (n=288).

Modèle	K <sup>a</sup>	AIC <sub>c</sub> <sup>b</sup>
Degré-jour cumulatif du 1 <sup>er</sup> mai au jour de prélèvement + Résidus de la densité de Sarcelles à ailes bleues	3	96,8
Degré-jour cumulatif du 1 <sup>er</sup> mai au jour de prélèvement + log(H/L) <sup>c</sup>	3	96,9
Degré-jour cumulatif du 1 <sup>er</sup> mai au jour de prélèvement	2	97,3
Degré-jour cumulatif du 1 <sup>er</sup> mai au jour de prélèvement + Âge	3	97,8
Degré-jour cumulatif du 1 <sup>er</sup> janvier au jour de prélèvement	2	98,0
Moyenne des températures journalières minimales en juillet	2	98,1
Moyenne des températures journalières moyennes du 17 mai au jour de prélèvement	2	99,0

Résidus de la densité de Sarcelles à ailes bleues	2	99,2
Moyenne des températures journalières minimales du 17 mai au jour de prélèvement	2	99,3
Moyenne des températures journalières moyennes en juillet	2	99,3
Moyenne des températures journalières moyennes en juin	2	99,6
Moyenne des températures journalières minimales en juin	2	99,9
Année *	9	100,1
<i>Moyenne des températures journalières maximales du 17 mai au jour de prélèvement</i>	2	100,9
<i>Densité de population de canards de surface</i>	2	100,9
<i>Log(H/L)<sup>c</sup></i>	2	101,1
<i>Âge</i>	2	101,1
<i>Moyenne des températures journalières maximales en juillet</i>	2	101,2
<i>Densité de Sarcelles à ailes bleues</i>	2	101,7
<i>Poids</i>	2	101,8
<b>Modèle nul</b>	<b>1</b>	<b>101,8</b>
<i>Log(CORTf)<sup>d</sup></i>	2	101,9
<i>Lieu de prélèvement</i>	2	102,1
<i>Moyenne des températures journalières maximales en juin</i>	2	102,2
<i>Longueur « tête + bec »</i>	2	102,2
<i>Sexe</i>	2	103,1
<i>Pourcentage de Sarcelles à ailes bleues</i>	2	103,1
<i>Province</i>	2	103,4
<i>Moyenne des précipitations totales journalières du 17 mai au jour de prélèvement</i>	2	103,4
<i>Précipitations cumulées du 1<sup>er</sup> mai au jour de prélèvement</i>	2	103,4
<i>Vitesse moyenne du vent par heure en juillet</i>	2	103,5
<i>Indice de condition corporelle</i>	2	103,5
<i>Précipitations cumulées du 1<sup>er</sup> janvier au jour de prélèvement</i>	2	103,6
<i>Rapport précipitations cumulées sur degré-jour cumulatif du 1<sup>er</sup> janvier au jour du prélèvement</i>	2	103,6
<i>Vitesse moyenne du vent par heure du 17 mai au jour de prélèvement</i>	2	103,7
<i>Vitesse moyenne du vent par heure en juin</i>	2	103,8
<i>Rapport précipitations cumulées sur degré-jour cumulatif du 1<sup>er</sup> mai au jour du prélèvement</i>	2	103,8
<i>Densité en étendues d'eau peu profondes</i>	2	103,8

<sup>a</sup> K= nombre de paramètre dans le modèle

<sup>b</sup> AIC<sub>c</sub> = Critère d'Information d'Akaike ajusté pour les échantillons de petite taille

<sup>c</sup> log(H/L) = rapport hétérophiles sur lymphocytes après transformation logarithmique

<sup>d</sup> log(CORTf) = niveaux de corticostérone dans les plumes après transformation logarithmique

Année \* = modèle ajusté à l'aide d'une approche bayésienne

Annexe 4.C : Comparaison de modèles linéaires généralisés avec réponse binomiale et lien « logit », pour expliquer les variations observées dans le portage de *Plasmodium* chez les Sarcelles à ailes bleues prélevées en Alberta et Saskatchewan, de 2008 à 2017, en excluant 2011, lors des rassemblements pré-migratoires (n=288).

<b>Modèle</b>	<b>K<sup>a</sup></b>	<b>AIC<sub>c</sub><sup>b</sup></b>
<i>Log(H/L)<sup>c</sup> + Degré-jour cumulatif du 1<sup>er</sup> mai au jour du prélèvement</i>	3	298,3
<i>Log(H/L)<sup>c</sup></i>	2	298,7
<i>Log(H/L)<sup>c</sup> + Âge</i>	3	299,2
<i>Âge</i>	2	300,3
<i>Degré-jour cumulatif du 1<sup>er</sup> mai au jour du prélèvement</i>	2	300,8
<i>Moyenne des précipitations totales journalières du 17 mai au jour de prélèvement</i>	2	301,3
<i>Degré-jour cumulatif du 1<sup>er</sup> janvier au jour de prélèvement</i>	2	301,6
<i>Moyenne des températures journalières moyennes en juin</i>	2	301,7
<i>Moyenne des températures journalières moyennes du 17 mai au jour de prélèvement</i>	2	301,8
<b>Modèle nul</b>	<b>1</b>	<b>302,0</b>
<i>Moyenne des températures journalières maximales du 17 mai au jour de prélèvement</i>	2	302,4
<i>Rapport précipitations cumulées sur degré-jour cumulatif du 1<sup>er</sup> mai au jour de prélèvement</i>	2	302,7
<i>Moyenne des températures journalières maximales en juin</i>	2	302,7
<i>Moyenne des températures journalières minimales en juin</i>	2	302,6
<i>Moyenne des températures journalières minimales du 17 mai au jour du prélèvement</i>	2	302,8
<i>Sexe</i>	2	302,9
<i>Densité de population de canards de surface</i>	2	303,0
<i>Densité de Sarcelles à ailes bleues</i>	2	303,0
<i>Résidus de densité de Sarcelles à ailes bleues</i>	2	303,0
<i>Rapport précipitations cumulées sur degré-jour cumulatif du 1<sup>er</sup> janvier au jour de prélèvement</i>	2	303,1
<i>Poids</i>	2	303,1
<i>Longueur « tête + bec »</i>	2	303,4
<i>Moyenne des températures journalières moyennes en juillet</i>	2	303,4
<i>Province</i>	2	303,5
<i>Moyenne des températures journalières minimales en juillet</i>	2	303,5
<i>Moyenne des températures journalières maximales en juillet</i>	2	303,6
<i>Précipitations cumulées du 1<sup>er</sup> mai au jour de prélèvement</i>	2	303,7
<i>Pourcentage de Sarcelles à ailes bleues</i>	2	303,7
<i>Moyenne des précipitations totales journalières du 17 mai au jour de prélèvement</i>	2	303,7
<i>Vitesse moyenne du vent par heure du 17 mai au jour de prélèvement</i>	2	303,8
<i>Moyenne des précipitations totales journalières en juillet</i>	2	303,8
<i>Moyenne des précipitations totales journalières en juin</i>	2	303,8

<i>Précipitations cumulées du 1<sup>er</sup> janvier au jour de prélèvement</i>	2	303,8
<i>Vitesse moyenne du vent par heure en juillet</i>	2	303,9
<i>Densité en étendues d'eau peu profondes</i>	2	303,9
<i>Indice de condition corporelle</i>	2	303,9
<i>Log(CORTf)<sup>d</sup></i>	2	303,9
<i>Vitesse moyenne du vent par heure en juin</i>	2	304,1
<i>Lieu de prélèvement</i>	4	306,6
<i>Année</i>	9	310,6

<sup>a</sup> K= nombre de paramètre dans le modèle

<sup>b</sup> AIC<sub>c</sub> = Critère d'Information d'Akaike ajusté pour les échantillons de petite taille

<sup>c</sup> log(H/L) = rapport hétérophiles sur lymphocytes après transformation logarithmique

<sup>d</sup> log(CORTf) = niveaux de corticostérone dans les plumes après transformation logarithmique

Annexe 4.D : Comparaison de modèles linéaires généralisés avec réponse binomiale et lien « logit », pour expliquer les variations observées dans le portage de *Leucocytozoon* chez les Sarcelle à ailes bleues prélevées en Alberta et Saskatchewan, de 2008 à 2017, en excluant 2011, lors des rassemblements pré-migratoires (n=288).

<b>Modèle</b>	<b>K<sup>a</sup></b>	<b>AIC<sub>c</sub><sup>b</sup></b>
<i>Âge + Vitesse moyenne du vent par heure du 17 mai au jour de prélèvement</i>	3	135,5
<i>Âge + Sexe</i>	3	136,2
<i>Âge + Vitesse moyenne du vent par heure en juin</i>	3	136,3
<i>Âge</i>	2	136,4
<i>Vitesse moyenne du vent par heure du 17 mai au jour de prélèvement</i>	2	139,1
<i>Poids</i>	2	139,3
<i>Sexe</i>	2	139,8
<i>Vitesse moyenne du vent par heure en juin</i>	2	140,1
<i>Longueur « tête + bec »</i>	2	141,7
<b>Modèle nul</b>	<b>1</b>	<b>142,0</b>
<i>Rapport précipitations cumulées sur degré-jour cumulatif du 1<sup>er</sup> mai au jour du prélèvement</i>	2	142,8
<i>Moyenne des précipitations totales journalières du 17 mai au jour de prélèvement</i>	2	143,5
<i>Précipitations cumulées du 1<sup>er</sup> mai au jour de prélèvement</i>	2	142,9
<i>Indice de condition corporelle</i>	2	143,0
<i>Vitesse de vent moyenne par heure en juillet</i>	2	143,1
<i>Degré-jour cumulatif du 1<sup>er</sup> mai au jour de prélèvement</i>	2	143,1
<i>Log(H/L)<sup>c</sup></i>	2	143,1
<i>Log(CORTf)<sup>d</sup></i>	2	143,1
<i>Moyenne des températures journalières maximales du 17 mai au jour de prélèvement</i>	2	143,2
<i>Précipitations cumulées du 1<sup>er</sup> janvier au jour de prélèvement</i>	2	143,3
<i>Année *</i>	9	143,3

<i>Degré-jour cumulatif du 1<sup>er</sup> janvier au jour de prélèvement</i>	2	143,4
<i>Moyenne des températures journalières moyennes du 17 mai au jour de prélèvement</i>	2	143,4
<i>Rapport précipitations cumulées sur degré-jour cumulatif du 1<sup>er</sup> janvier au jour du prélèvement</i>	2	143,5
<i>Moyenne des précipitations totales journalières en juillet</i>	2	143,5
<i>Moyenne des températures journalières minimales en juillet</i>	2	143,6
<i>Pourcentage de Sarcelles à ailes bleues</i>	2	143,9
<i>Moyenne des températures journalières minimales du 17 mai au jour de prélèvement</i>	2	144,0
<i>Province</i>	2	144,0
<i>Moyenne des températures journalières minimales en juin</i>	2	144,0
<i>Moyenne des températures journalières maximales en juin</i>	2	144,0
<i>Moyenne des températures journalières moyennes en juillet</i>	2	144,0
<i>Moyenne des températures journalières moyennes en juin</i>	2	144,0
<i>Moyenne des précipitations totales journalières en juin</i>	2	144,0
<i>Résidus de densité de Sarcelles à ailes bleues</i>	2	144,0
<i>Densité de population de canards de surface</i>	2	144,0
<i>Moyenne des températures journalières maximales en juillet</i>	2	144,1
<i>Densité de Sarcelles à ailes bleues</i>	2	144,1
<i>Densité en étendues d'eau peu profondes</i>	2	144,1
<i>Lieu de prélèvement</i>	4	145,0

<sup>a</sup> K= nombre de paramètre dans le modèle

<sup>b</sup> AIC<sub>c</sub> = Critère d'Information d'Akaike ajusté pour les échantillons de petite taille

<sup>c</sup> log(H/L) = rapport hétérophiles sur lymphocytes après transformation logarithmique

<sup>d</sup> log(CORTf) = niveaux de corticostérone dans les plumes après transformation logarithmique

Année \* = modèle ajusté à l'aide d'une approche bayésienne

Annexe 5 : Modèles linéaires généralisés construits pour étudier les facteurs de stress impliqués dans les élévations des niveaux de corticostérone dans les plumes (CORTf) chez la Sarcelle à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2008 à 2017 en excluant 2011, lors des rassemblements pré-migratoires. (n=288). Les niveaux de CORTf ont subi préalablement une transformation logarithmique.

Modèle	AIC <sub>c</sub> <sup>a</sup>
Année de prélèvement + Âge + Sexe + Densité de population + Province	547,0
Année de prélèvement + Âge + Sexe + Densité de population	550,4
Année de prélèvement + Âge + Sexe	551,8
Année de prélèvement + Âge + Sexe + Vitesse moyenne du vent par heure du 17 mai au jour de prélèvement	551,9
Lieu de prélèvement + Âge + Sexe	555,6
Année de prélèvement	556,7
Année de prélèvement + Infection par au moins un des genres d'hémosporidies	558,4
Lieu de prélèvement	561,3
Âge + Sexe + Vitesse moyenne du vent par heure du 17 mai au jour de prélèvement	571,0
Âge + Sexe + Moyenne des températures journalières moyennes du 17 mai au jour de prélèvement	579,2
Vitesse moyenne du vent par heure du 17 mai au jour de prélèvement	579,5
Âge + Sexe + Parasitémie	589,4
Âge + Sexe	590,6
Moyenne des températures journalières moyennes du 17 mai au jour de prélèvement	590,5
Âge	591,8
Moyenne des températures journalières maximales du 17 mai au jour de prélèvement	594,9
Moyenne des températures journalières minimales du 17 mai au jour de prélèvement	597,5
Parasitémie (« Parasitemia2 »)	600,9
Infection par au moins un des genres d'hémosporidies	602,7
Pourcentage de Sarcelles à ailes bleues	603,4
Infection par <i>Haemoproteus</i>	603,8
Modèle nul	603,9
Moyenne des précipitations totales journalières du 17 mai au jour de prélèvement	604,6
Poids	604,7
Infection par <i>Leucocytozoon</i>	604,9
Densité en étendues d'eau peu profondes	605,0
Sexe	605,3
Densité de Sarcelles à ailes bleues	605,7
Infection par <i>Plasmodium</i>	605,8
Résidus de la densité de Sarcelles à ailes bleues	605,8
Densité de population de canards de surface	605,8
Province	605,8
Indice de condition corporelle	605,9

<sup>a</sup> AIC<sub>c</sub> = Critère d'Information d'Akaike ajusté pour les petits échantillons

Annexe 6 : Modèles linéaires généralisés construits pour étudier les facteurs de stress impliqués dans les élévations du rapport hétérophiles sur lymphocytes (H/L) chez la Sarcelle à ailes bleues dans les prairies canadiennes, de 2008 à 2017 en excluant 2011, lors des rassemblements pré-migratoires (n=288). Les rapports H/L ont subi préalablement une transformation logarithmique.

Modèle	AIC <sub>c</sub> <sup>a</sup>
Année de prélèvement + Âge + Résidus de la densité en Sarcelles à ailes bleues + Infection par au moins un des genres d'hémosporidies + Indice de condition corporelle	687,5
Année de prélèvement + Âge + Résidus de la densité en Sarcelles à ailes bleues + Infection par au moins un des genres d'hémosporidies	702,8
Année de prélèvement + Âge + Résidus de la densité en Sarcelles à ailes bleues + Infection par <i>Plasmodium</i>	703,7
Année de prélèvement + Âge + Résidus de la densité en Sarcelles à ailes bleues	704,8
Année de prélèvement + Âge + Résidus de la densité en Sarcelles à ailes bleues + Moyenne des températures journalières maximales du 17 mai au jour de prélèvement	706,2
Année de prélèvement + Âge + Résidus de la densité en Sarcelles à ailes bleues + Parasitémie	707,0
Année de prélèvement + Âge + Moyenne des températures journalières maximales du 17 mai au jour de prélèvement	713,3
Année de prélèvement + Âge + Moyenne des températures journalières maximales du 17 mai au jour de prélèvement + Vitesse moyenne du vent par heure du 17 mai au jour de prélèvement	713,4
Année de prélèvement + Âge	718,8
Année de prélèvement + Âge + Sexe	720,9
Âge	748,7
Année de prélèvement	749,8
Âge + Sexe	750,4
Lieu de prélèvement	767,3
Moyenne des températures journalières maximales du 17 mai au jour de prélèvement	769,3
Vitesse moyenne du vent par heure du 17 mai au jour de prélèvement	771,9
Infection par au moins un des genres d'hémosporidies	772,8
Parasitémie (« Parasitemia2 »)	775,1
Moyenne des températures journalières moyennes du 17 mai au jour de prélèvement	775,7
Résidus de la densité de Sarcelles à ailes bleues	776,8
Infection par <i>Plasmodium</i>	776,9
Densité de Sarcelles à ailes bleues	777,7
Longueur « tête + bec »	777,7
Indice de condition corporelle	778,7
Sexe	778,7
Moyenne des précipitations totales journalières du 17 mai au jour de prélèvement	779,3
Infection par <i>Haemoproteus</i>	779,5

Modèle nul	780,1
<i>Densité de population de canards de surface</i>	780,2
<i>Province</i>	780,6
<i>Infection par Leucocytozoon</i>	781,2
<i>Densité en étendues d'eau peu profondes</i>	781,6
<i>Moyenne des températures journalières minimales du 17 mai au jour de prélèvement</i>	782,1
<i>Poids</i>	782,1

<sup>a</sup> AIC<sub>c</sub> = Critère d'Information d'Akaike ajusté pour les petits échantillons

**Annexe 7 : Etude comparative des prévalences apparentes de portage d'hémosporidies obtenues par microscopie selon la méthode décrite par Valkiūnas et son équipe (Valkiūnas et al., 2008), et par PCR (Ramey et al., 2016), chez la Sarcelle à ailes bleues en Saskatchewan et Alberta, en 2012 et 2013.**

Annexe 7.A : Prévalences apparentes obtenues dans le cadre de l'étude comparative. Les résultats sont présentés sous la forme « nombre d'individus positifs / nombre total d'individus testés » et le pourcentage est indiqué entre parenthèses.

Année	Province	Âge	Sexe	Microscopie optique				PCR *			
				<i>Leucocytozoon</i> (%)	<i>Haemoproteus</i> (%)	<i>Plasmodium</i> (%)	<i>Leucocytozoon</i> (%)	<i>Haemoproteus</i> (%)	<i>Plasmodium</i> (%)		
2012	AB	AHY	F	0/6 (0)	0/6 (0)	0/6 (0)	1/29 (3)	0/29 (0)	4/29 (14)		
			M	1/6 (16,7)	0/6 (0)	2/6 (33,3)	3/35 (9)	0/35 (0)	6/35 (17)		
	SK	AHY	F	0/1 (0)	0/1 (0)	0/1 (0)	0/6 (0)	0/6 (0)	0/6 (0)		
			M	0/8 (0)	0/8 (0)	1/8 (12,5)	2/29 (7)	0/29 (0)	1/29 (3)		
	SK	AHY	F	3/9 (33,3)	0/9 (0)	4/9 (44,4)	9/30 (30)	0/30 (0)	7/30 (23)		
			M	2/14 (14,3)	0/14 (0)	4/14 (28,6)	19/122 (16)	3/122 (0)	15/122 (12)		
2013	AB	AHY	F	0	0	0	1/24 (4)	1/24 (4)	3/24 (13)		
			M	0/2 (0)	0/2 (0)	0/2 (0)	1/21 (5)	0/21 (0)	1/21 (5)		
	SK	AHY	F	<b>6/46 (13)</b>	<b>0/46 (0)</b>	<b>10/46 (21,7)</b>	<b>36/296 (12,2)</b>	<b>4/296 (1,4)</b>	<b>37/296 (12,5)</b>		
			M	0/2 (0)	0/2 (0)	0/2 (0)	1/20 (5)	1/20 (5)	3/20 (15)		
	SK	AHY	F	1/11 (9,1)	0/11 (0)	3/11 (27,3)	5/70 (7)	2/70 (2,8)	6/70 (9)		
			M	0/3 (0)	0/3 (0)	0/3 (0)	1/53 (2)	1/53 (2)	0/53 (0)		
Total	AB	AHY	F	1/9 (11,1)	0/9 (0)	0/9 (0)	2/56 (4)	2/56 (4)	1/56 (2)		
			M	0/2 (0)	0/2 (0)	0/2 (0)	2/19 (11)	0/19 (0)	3/19 (16)		
			F	0/11 (0)	0/11 (0)	1/11 (9,1)	11/80 (14)	2/80 (3)	10/80 (13)		
			M	0/6 (0)	0/6 (0)	0/6 (0)	1/36 (3)	0/36 (0)	2/36 (6)		
Total	SK	AHY	F	0/6 (0)	0/6 (0)	0/6 (0)	0/48 (0)	2/48 (4)	2/48 (4)		
			M	<b>2/50 (4)</b>	<b>0/50 (0)</b>	<b>4/50 (8)</b>	<b>23/382 (6)</b>	<b>10/382 (2,6)</b>	<b>27/382 (7,1)</b>		

Abréviations : « AB » = Alberta ; « SK » = Saskatchewan ; « AHY » = adultes ; « HY » = juvéniles ; « F » = femelles ; « M » = mâles  
\* résultats issus de l'étude de Ramey et son équipe (Ramey et al., 2016)

Annexe 7.B : Comparaison des prévalences d'hémosporidies obtenues par microscopie selon la méthode décrite par Valkiunas et son équipe (Valkiūnas *et al.*, 2008), et par PCR (Ramey *et al.*, 2016), chez la Sarcelle à ailes bleues en Saskatchewan et Alberta, en 2012 et 2013. Les prévalences sont comparées avec un test du Khi-2, ou avec un test exact de Fisher si les conditions du test de Khi-2 ne sont pas respectées.

Genre d'hémosporidies et année de prélèvement	Prévalence obtenue par microscopie	Prévalence obtenue par PCR	Test statistique de comparaison et <i>p-value</i>
<i>Leucocytozoon</i> – 2012	(6/46) 13%	(36/296) 12,2%	Test du Khi-2 : <i>p-value</i> = 0,8655
<i>Leucocytozoon</i> – 2013	(2/50) 4%	(23/382) 6%	Test exact de Fisher : <i>p-value</i> = 0,7544
<i>Haemoproteus</i> – 2012	(0/46) 0%	(4/296) 1,4%	Test exact de Fisher : <i>p-value</i> = 1
<i>Haemoproteus</i> – 2013	(0/50) 0%	(10/382) 2,6%	Test exact de Fisher : <i>p-value</i> = 0,6136
<i>Plasmodium</i> – 2012	(10/46) 21,7%	(37/296) 12,5%	Test du Khi-2 : <i>p-value</i> = 0,09
<i>Plasmodium</i> – 2013	(4/50) 8%	(27/382) 7,1%	Test exact de Fisher : <i>p-value</i> = 0,7713



Vu : L'enseignant Rapporteur

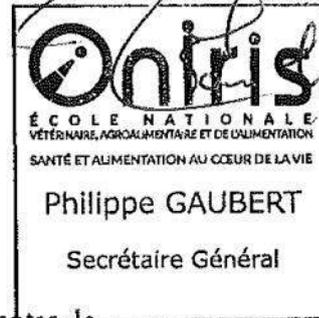
De l'Ecole Nationale Vétérinaire,  
Agroalimentaire et de l'Alimentation  
Oniris



**Pr François MEURENS**  
Vétérinaire - Immunologie  
**ONIRIS - Site de la Chantrerie**  
CS 40706 - 44307 NANTES  
francois.meurens@oniris-nantes.fr  
02.40.68.77.02 - N° ordre : 23649

Vu : Le Directeur Général

par interim  
De l'Ecole Nationale Vétérinaire,  
Agroalimentaire et de l'Alimentation  
Oniris  
Marc GOGNY

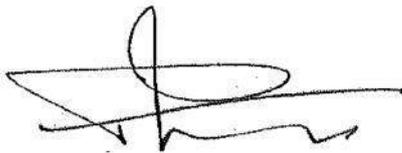


Nantes, le

Vu :

Le Président de la Thèse

Professeur P. LUSTENBERGER



Vu :

Le Doyen de la Faculté de  
Médecine de Nantes

Professeur Pascale JOLLIET

**Vu et permis d'imprimer**

NOM : LE GAC  
Prénom : Anne

# **RELATIONS ET IMPACTS DU CLIMAT, DU STRESS ET DES INFECTIONS PAR DES PARASITES SANGUINS SUR LES POPULATIONS DE SARCELLES À AILES BLEUES (*Anas discors*) DANS LES PRAIRIES CANADIENNES**

## **RÉSUMÉ**

Les Sarcelles à ailes bleues, petits canards migrateurs communs des prairies canadiennes, sont exposées à des parasites sanguins transmis par des arthropodes vecteurs. Les modifications climatiques actuelles, en plus d'altérer la dynamique des maladies parasitaires vectorielles, menacent l'homéostasie des individus par addition de facteurs de stress.

Cette étude a pour objectif l'acquisition de nouvelles connaissances sur l'épidémiologie des hémospories aviaires et sur les facteurs de risque impliqués dans le portage des genres *Plasmodium*, *Haemoproteus* et *Leucocytozoon* ; ainsi que l'étude des perturbations intrinsèques et environnementales responsables de stress chez la Sarcelle à ailes bleues. Le stress a été évalué en mesurant les niveaux de corticostérone dans les plumes et le rapport hétérophiles sur lymphocytes.

La réalisation de frottis sanguins a permis de déterminer les prévalences apparentes de portage de ces parasites à partir d'un échantillon de 351 sarcelles prélevées de 2007 à 2017 dans les prairies canadiennes. *Plasmodium spp.* est le genre le plus représenté dans cette étude.

Pour chacun des genres, les prévalences observées selon l'âge et le sexe, ainsi que la distribution spatio-temporelle sont présentées. L'analyse des facteurs de risque démographiques et écologiques a permis de révéler des différences selon le genre d'hémospories considéré.

Une association entre le stress et l'infection par les hémospories, ainsi qu'entre le stress et l'état corporel ont été mises en évidence. Les résultats montrent l'augmentation de la charge allostatique lors de stress chronique, avec un risque parasitaire alors majoré. Le climat n'avait pas d'influence majeure sur le portage.

L'étude souligne l'importance de considérer le contexte d'occurrence parasitaire, les effets observés pouvant ne pas s'exporter dans des populations d'oiseaux soumises à des modifications climatiques différentes et ainsi à d'autres compromis adaptatifs.

**MOTS-CLEFS :** Canada, Faune sauvage, Oiseau, Canard, Sarcelle à ailes bleues, *Haemosporida*, Parasite, Parasitologie, *Plasmodium*, *Haemoproteus*, *Leucocytozoon*, Maladie infectieuse, Relation hôte-parasite, Vecteur, Climat, changement climatique, Stress, Corticostérone, Allostasie

## **JURY**

Président : Monsieur Patrick LUSTENBERGER, Professeur émérite à la Faculté de Médecine de Nantes

Rapporteur : Monsieur François MEURENS, Professeur à Oniris

Assesseur : Monsieur Albert AGOULON, Maître de Conférences à Oniris

Anne LE GAC  
1 rue Jacques Prévert  
56890 PLESCOP

Imprimeur – COREP  
2 Place Sébastien Brant  
67000 STRASBOURG