

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

**DES OISEAUX QUI ONT DU PIF : RÉPONSE DES OISEAUX FORESTIERS
AUX ODEURS DE PRÉDATEURS DANS LEUR HABITAT DE
REPRODUCTION**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA
MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT**

**PAR
JOSYANE BROUILLARD**

DÉCEMBRE 2025

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire, de cette thèse ou de cet essai a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire, de sa thèse ou de son essai.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire, cette thèse ou cet essai. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire, de cette thèse et de son essai requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES
MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

Direction de recherche :

Raphaël Proulx

Prénom et nom

directeur de recherche

Jury d'évaluation :

Charles A. Martin

Membre des comités d'orientation et d'évaluation

Prénom et nom

Fonction du membre de jury

Anouk Simard

Membre du comité d'évaluation

Prénom et nom

Fonction du membre de jury

« L'odorat a mille fois plus de mémoire que tout autre sens,
et chacun de nous,
pour peu qu'il retrouve
la réplique exacte d'une senteur du passé,
revivra,
fulgurant,
un moment d'exception. »

Tonino Benacquista, *Nos gloires secrètes*

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout d'abord mon directeur de recherche Raphaël Proulx, pour sa passion, sa patience, sa générosité, son imagination débordante et ses réponses à tout. Je suis également reconnaissante envers Charles A. Martin, Olivier Mathieu et Anouk Simard d'avoir accepté de faire partie de mon comité d'orientation et d'évaluation : leurs commentaires m'ont été précieux. Je dis un gros merci à tous les membres de la CRIEbu pour leur présence et leur soutien : Elisa, Youri, Frédérick, Jessica, mais surtout Laurie, ma compagne de terrain, qui a eu plus que sa dose à vie d'odeurs désagréables. J'espère que tu me le pardonneras un jour! J'aimerais remercier tous mes collègues du Centre de recherche sur les interactions bassins versants–écosystèmes aquatiques (RIVE) et du Département des sciences de l'environnement en général, notamment pour nos interactions sociales plus que nécessaires en dehors du travail. Je souhaite également dire merci à Gregory Rand, gestionnaire de collections au campus du patrimoine naturel du Musée canadien de la nature, à Raphaël Bédard-Chartrand du Musée de la nature et des sciences de Sherbrooke, et à l'équipe de la conservation du Parc national de la Mauricie.

Un merci tout particulier doit être accordé à Vicky, qui m'a accompagnée, aidée, soutenue, conseillée et ramenée à l'ordre tout au long de la maîtrise. Merci à mes parents, à mes amis et à tous ceux et celles qui m'ont aidé de près ou de loin à l'écriture de mon manuscrit durant ces deux (et quelques) belles années. Enfin, je remercie du fond du cœur mon conjoint Alex pour sa patience, sa compréhension et ses encouragements durant les moments les plus occupés et difficiles, mais aussi dans les petites victoires du quotidien.

Ce projet a été rendu possible grâce au financement fourni par le laboratoire de Raphaël Proulx et la Fondation de l'UQTR.

AVANT-PROPOS

J'ai toujours rêvé de travailler dans un domaine en lien avec les oiseaux, mais cela m'a longtemps paru comme une chose impossible. Après une première série de diplômes en linguistique, l'appel de la nature s'est fait entendre. J'ai tenté ma chance et je suis retournée sur les bancs d'école pour réorienter ma carrière. Qui ne demande rien n'a rien, le hasard fait bien les choses, si l'on veut on peut... Une simple question posée de manière inopinée à Raphaël Proulx autour d'un verre durant mon baccalauréat en sciences biologiques et écologiques nous a menés à monter un projet de maîtrise en écologie sensorielle des oiseaux.

Le projet de maîtrise présenté dans ce mémoire a été réalisé dans le cadre du programme de maîtrise en sciences de l'environnement à l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR) de 2023 à 2025. La direction a été assurée par Raphaël Proulx. Le premier objectif visait à déterminer si les traits physiques de l'odorat chez les oiseaux (ratio de la distance entre l'œil et la narine) étaient corrélés à leur phylogénie et à leurs capacités olfactives. Le second objectif consistait à vérifier si ces traits d'olfaction jouaient un rôle dans la détection des odeurs de prédateurs et la sélection de l'habitat de reproduction à l'échelle de la communauté d'oiseaux. Pour mesurer la réponse acoustique aux stimuli olfactifs, de l'urine de prédateur a été appliquée à répétition pendant six semaines à des sites expérimentaux, chacun associé à un site témoin, et un inventaire acoustique d'oiseaux a été réalisé pour la durée de l'expérience.

Ce mémoire comporte trois chapitres : 1) une introduction générale issue d'une revue de littérature réalisée dans le cadre de mes séminaires I et II; 2) un article scientifique rédigé en français; 3) une conclusion générale.

RÉSUMÉ

La théorie de l'écologie sensorielle stipule que les sens comme la vision, l'audition et l'olfaction déterminent la sélection d'habitats et les adaptations comportementales des organismes. L'environnement peut être perçu comme une mosaïque de signaux (p. ex. structures physiques, sons, odeurs) qui interagissent avec le système sensoriel de ces organismes. Si les oiseaux sont connus pour utiliser principalement les indices visuels et auditifs lors de la sélection de leurs habitats de reproduction, leur recours aux indices olfactifs demeure peu documenté, surtout à l'échelle du paysage. Pour explorer le rôle de l'olfaction chez les oiseaux forestiers nicheurs dans leur réponse à un paysage olfactif manipulé, une étude de six semaines a été menée au Parc national de la Mauricie (Québec, Canada). De l'urine de lynx roux (*Lynx rufus*), un prédateur naturellement absent du parc, a été appliquée à répétition à cinq stations forestières, chacune associée à une station témoin similaire. Un inventaire acoustique de 45 espèces d'oiseaux forestiers a révélé une diminution de faible à modérée de l'activité acoustique aux sites traités; la probabilité qu'une espèce fasse preuve d'activité acoustique aux sites avec une odeur d'urine de lynx roux est 48 % plus faible, avec un logarithme du ratio d'incidence moyen pondéré de $-0,65 \pm 0,32$ (IC 95 %). La réponse des espèces ne semblait pas expliquée par le trait associé à l'olfaction des oiseaux ni par la strate de nidification. En contrepartie, la taille du territoire d'alimentation, fortement liée à la taille du corps et au risque de prédation, semblait expliquer la réponse des espèces au traitement. Les espèces dont la taille du territoire est plus petite présentent une activité acoustique plus faible en présence d'urine ($z = 2,86$, $p = 0,004$). Cette étude figure parmi les premières à explorer *in situ* la réponse acoustique de la communauté d'oiseaux aux modifications du paysage olfactif. Les résultats s'ajoutent aux données probantes selon lesquelles les oiseaux sont sensibles aux signatures olfactives de leur environnement.

Mots-clés : écologie sensorielle, paysage olfactif, oiseaux, traits d'olfaction, risque de prédation

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|-------------|
| REMERCIEMENTS | iii |
| AVANT-PROPOS | iv |
| RÉSUMÉ..... | v |
| TABLE DES MATIÈRES | vi |
| LISTE DES TABLEAUX..... | viii |
| LISTE DES FIGURES | ix |
| CHAPITRE I..... | 1 |
| INTRODUCTION..... | 1 |
| 1.1 Contexte..... | 1 |
| 1.2 L'écologie des paysages sensoriels..... | 2 |
| 1.3 Le paysage olfactif..... | 2 |
| 1.4 Le paysage de la peur | 3 |
| 1.5 Les sens des oiseaux | 4 |
| 1.6 La détection des odeurs de prédateurs | 6 |
| 1.7 Les syndromes et les compromis dans l'espace des traits sensoriels | 8 |
| 1.7.1 La vision et le diamètre des yeux | 9 |
| 1.7.2 L'ouïe et les plages de fréquences des chants..... | 11 |
| 1.7.3 L'odorat et les bulbes olfactifs | 13 |
| 1.8 Objectifs généraux | 15 |
| 1.8.1 Volet 1 : base de données sur les traits sensoriels des oiseaux nicheurs du Québec..... | 15 |
| 1.8.2 Volet 2 : modification du paysage olfactif à l'aide d'urine de prédateur | 15 |
| 1.9 Hypothèses..... | 16 |
| 1.10 Méthodes du volet 1..... | 16 |
| 1.10.1 Base de données..... | 16 |
| 1.10.2 Positionnement dans l'espace sensoriel multidimensionnel..... | 18 |
| 1.11 Méthodes du volet 2..... | 21 |
| 1.12 Méta-analyse..... | 21 |
| CHAPITRE II | 23 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2 | DES OISEAUX QUI ONT DU PIF : RÉPONSE DES OISEAUX FORESTIERS AUX ODEURS DE PRÉDATEURS DANS LEUR HABITAT DE REPRODUCTION | 23 |
| 2.1 | Résumé | 24 |
| 2.2 | Abstract..... | 25 |
| 2.3 | Introduction..... | 26 |
| 2.4 | Méthodes..... | 29 |
| | 2.4.1 Dispositif expérimental..... | 29 |
| | 2.4.2 Activité acoustique des espèces..... | 33 |
| | 2.4.3 Traits sensoriels et utilisation du territoire | 34 |
| 2.5 | Analyses statistiques..... | 35 |
| 2.6 | Résultats..... | 36 |
| | 2.6.1 Dispositif expérimental..... | 36 |
| | 2.6.2 Activité acoustique des espèces..... | 37 |
| | 2.6.3 Traits sensoriels et utilisation du territoire | 43 |
| 2.7 | Discussion..... | 45 |
| | 2.7.1 Investissement dans le système olfactif..... | 46 |
| | 2.7.2 Autres facteurs | 47 |
| 2.8 | Conclusion | 50 |
| 2.9 | Remerciements | 50 |
| 2.10 | Références bibliographiques..... | 51 |
| | CHAPITRE III..... | 58 |
| 3 | CONCLUSION GÉNÉRALE | 58 |
| 3.1 | Contextualisation | 58 |
| 3.2 | Traitement expérimental..... | 60 |
| 3.3 | Résultats principaux..... | 60 |
| | 3.3.1 Activité acoustique des espèces..... | 60 |
| | 3.3.2 Traits sensoriels et utilisation du territoire | 61 |
| | 3.3.3 Limitation | 63 |
| 3.4 | Conclusion | 64 |
| | RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES..... | 65 |
| | ANNEXE A..... | 72 |
| | ANNEXE B..... | 73 |
| | ANNEXE C..... | 76 |

LISTE DES TABLEAUX

| | | |
|------------------|--|----|
| Tableau 1 | Noms scientifiques, noms communs, codes à quatre lettres, phylogénie et mesures de traits physiques pour les 45 espèces de la communauté d'oiseaux étudiés. | 38 |
| Tableau 2 | Description de la structure et de la composition forestière des sites expérimentaux en matière de coefficient de verdoiment et de recouvrement foliaire, de fréquences d'observations des essences d'arbres et des espèces de mammifères détectées par les caméras. | 72 |
| Tableau 3 | Liste de toutes les espèces répertoriées sur les clips audios. | 73 |

LISTE DES FIGURES

| | | |
|-----------------|--|----|
| Figure 1 | À gauche : acuité visuelle en log 10 (cycles/degrés) par rapport au diamètre axial de l'œil en log10 (en mm) pour des espèces d'oiseaux et de mammifères. À droite : contrastes indépendants de l'acuité visuelle en log10 (cycles/degrés) par rapport au diamètre axial de l'œil (en mm) pour des espèces d'oiseaux et de mammifères..... | 10 |
| Figure 2 | Nuages de points et diagrammes à moustaches montrant la distribution des quartiles de plages de fréquences de chants (à gauche) ainsi que des plages affichant les fréquences maximales moins les fréquences minimales (MaxMin) pour les passereaux oscines et non oscines (à droite) respectivement. | 12 |
| Figure 3 | Morphologie générale des bulbes olfactifs chez les oiseaux. (A) Vue latérale de modèles en 3D de 12 espèces aviaires représentatives. Les bulbes olfactifs sont en bleu et classés du plus gros au plus petit (échelle = 3 mm). (B) Sections colorées des corps de Nissl montrant les bulbes olfactifs de 4 espèces aviaires représentatives et illustrant la variation de l'architecture cellulaire entre les espèces (échelle = 2 mm)..... | 14 |
| Figure 4 | Espace sensoriel multidimensionnel de la vision, de l'odorat et de l'ouïe pour 280 espèces (18 ordres) d'oiseaux nicheurs du Québec..... | 20 |
| Figure 5 | À gauche : vue schématique en plongée du dispositif expérimental d'un site montrant l'emplacement des cinq piquets (cercles bleus), de l'enregistreur audio (A) et du champ de vision approximatif de la caméra (C). À droite : un exemple de piquet du dispositif expérimental..... | 30 |
| Figure 6 | Nombre total d'événements acoustiques détectés pour chaque espèce d'oiseau forestier nicheur retenue (n = 45), par famille (n = 18), dans les clips audios (n = 1100) de 10 journées d'enregistrement au Parc national de la Mauricie (Québec, Canada) au printemps 2024 (n = 5 118; min = 4; max = 630)..... | 41 |
| Figure 7 | Taille d'effet associée à l'application d'urine de lynx roux sur l'activité acoustique (logOR ± ET) de 45 espèces d'oiseaux forestiers nicheurs enregistrés à 10 sites au Parc national de la Mauricie (Québec, Canada) au printemps 2024..... | 42 |

| | | |
|-----------------|--|----|
| Figure 8 | Répartition des espèces ($n = 45$) en réponse au traitement expérimental (logOR) en fonction du ratio de la distance œil-narine sur le diamètre de l'œil (graphique du haut) et de la superficie du territoire d'alimentation (ha) (graphique du bas)..... | 44 |
|-----------------|--|----|

CHAPITRE I

INTRODUCTION

1.1 Contexte

Tous les organismes vivants sont dotés d'au moins un sens qui leur permet d'obtenir de l'information sur le monde qui les entoure. Chaque individu perçoit son environnement de manière différente, selon les principaux sens qu'il utilise et les informations dont il a besoin pour réaliser ses activités, comme se nourrir, se déplacer et se reproduire (Stevens, 2013). La théorie de l'écologie sensorielle stipule que les sens comme la vision, l'audition et l'olfaction déterminent la sélection des ressources et les adaptations comportementales des organismes. L'environnement peut être perçu comme une mosaïque de signaux (p. ex. sons, structures physiques, odeurs) qui interagissent avec le système sensoriel des organismes (Dominoni et al., 2020). Ces signaux changent constamment dans le temps et l'espace : la luminosité au fil de la journée et des conditions météorologiques, les bruits ambiants, les déplacements des proies et des prédateurs, etc. (Endler, 1987). Cela a ouvert la porte à de nombreuses voies de spécialisation chez les organismes et a mené à l'évolution d'une myriade de systèmes sensoriels diversifiés (Safi & Siemers, 2010; Hrnčir et al., 2023; Stevens, 2013). Puisque la quantité d'énergie qu'un individu peut investir dans sa croissance est limitée, certains systèmes sensoriels sont favorisés plus que d'autres en fonction de l'environnement et de la taille d'un organisme (Caves, Brandley & Werner, 2018). Ce phénomène est appelé « syndrome d'adaptation » : par exemple, des yeux plus grands assurent une meilleure acuité visuelle (Caves, Brandley & Werner, 2018; Nummela et al., 2013), mais la plus grande quantité d'énergie attribuée aux yeux signifie qu'une quantité moindre d'énergie sera attribuée aux organes d'autres sens, comme l'appareil auditif. Afin de visualiser ces compromis, il est possible de positionner les organismes dans un espace multidimensionnel de la vision, de l'audition et de l'olfaction. Cela met en évidence, dans l'espace sensoriel, les syndromes d'adaptation des espèces ou des groupes d'espèces qui découlent de la synergie entre deux sens ou plus (p. ex. la vision

et l'équilibre [ouïe]) ou des compromis favorisant l'un ou l'autre des sens (Nummela et al., 2013; Kemp & Kirk, 2014).

1.2 L'écologie des paysages sensoriels

L'écologie des paysages est un domaine multidisciplinaire qui touche la structure, la fonction et les modifications du paysage (Liu & Taylor, 2002). Le concept de *Umwelt* désigne l'ensemble des stimuli du paysage sensoriel, qui évoluent au fil du temps et dans l'espace (Endler, 1987), permettant aux organismes d'en tirer différentes informations ponctuelles sur leur environnement afin de prendre des décisions essentielles à leur survie (Jurcak & Moore, 2014). Cela comprend autant les stimuli positifs, comme le chant d'un partenaire potentiel ou une odeur de nourriture, que les stimuli négatifs, comme le chant d'un compétiteur ou l'odeur d'un prédateur (Jurcak & Moore, 2014). Puisque les organismes détectent les odeurs, les sons et les images différemment, certains d'entre eux devraient être affectés dans une certaine mesure par une transformation du paysage, et d'autres non (Proulx, Waldinger & Koper, 2019). L'écologie des paysages sensoriels vise entre autres à comprendre la manière dont les gradients sensoriels dans l'environnement régissent la répartition des organismes sur un territoire (Frasnelli & Proulx, 2019). Par exemple, en 2013, McClure et al. ont simulé la présence d'une autoroute dans une forêt en installant des haut-parleurs diffusant des bruits routiers selon un horaire précis. Cette route fantôme a permis de tester les effets du bruit des véhicules sur une communauté entière de passereaux en migration automnale. Certaines espèces avaient tendance à éviter ou à fuir la zone lorsque le bruit était diffusé tandis que d'autres y restaient, ce qui se traduisait généralement par une diminution de leur capacité à emmagasiner les graisses, gage de survie à leur migration. Ainsi, la seule représentation sonore de cet élément anthropique dans le paysage était suffisante pour nuire à la survie d'une partie des oiseaux qui ont croisé le dispositif expérimental.

1.3 Le paysage olfactif

Le paysage olfactif peut être défini comme la somme des odeurs émises, volontairement ou non, par des éléments biotiques (carcasse, végétation, animal malade,

etc.) ou abiotiques (fèces, eau, fumée, etc.) (Finnerty et al., 2022). Ces odeurs sont entre autres dispersées au gré du vent, de la pluie et des animaux eux-mêmes et permettent aux individus qui les sentent de prendre des décisions comportementales (déplacements, vocalisation, quête de nourriture, etc.) en fonction des signaux détectés (Finnerty et al., 2022). Les différentes odeurs de ce paysage olfactif en constante évolution peuvent être récentes ou dater de plusieurs jours ou de plusieurs semaines, et elles informent les individus de ce qui se passe présentement ou se passait récemment à un lieu donné. Elles leur permettent aussi d'anticiper l'avenir d'une certaine façon, par exemple d'évaluer les risques qu'un prédateur revienne à un endroit précis pour marquer à nouveau son territoire (Finnerty et al., 2022). Ce concept est fortement lié à un autre concept, celui du paysage de la peur.

1.4 Le paysage de la peur

Le risque de prédation définit une grande partie des décisions comportementales des espèces, ce qui a des conséquences sur la physiologie de l'individu, la dynamique des populations et les interactions entre les communautés (Gaynor et al., 2019). Le concept de paysage de la peur est le « patron de comportement découlant des cascades trophiques vers le bas et qui touchent la sélection de l'habitat par l'ensemble des espèces faisant partie de cette chaîne » (Laundré, 2001) ou, encore, la « répartition spatiale explicite du risque de prédation perçu par une population » (Bleicher, 2017). En recherche, le concept de paysage de la peur donne un indice à court terme de la façon dont un organisme perçoit son environnement en fonction de l'analyse coûts-bénéfice du compromis entre quête de nourriture et sécurité à des endroits précis de son habitat (Bleicher, 2017). La prise de décisions de l'individu sera influencée par trois principaux facteurs, qui déterminent à quel point l'individu peut prédire la probabilité d'être attaqué : la diversité de la communauté de prédateurs, l'intensité de l'activité des prédateurs ainsi que l'information disponible sur les prédateurs (Bleicher, 2017). L'état de santé de l'animal joue aussi un rôle dans cette prise de décision. Un animal en bonne condition peut se contenter d'habitats de moins bonne qualité en évitant les zones jugées à risque, tandis qu'un animal en moins bonne condition doit oser malgré lui aller s'alimenter là où la nourriture est plus

abondante ou facile à trouver, même si les signes de présence de dangers ou de prédateurs y sont plus nombreux et intenses (Bleicher, 2017).

1.5 Les sens des oiseaux

Les oiseaux sont dotés des mêmes sens de base que l'humain (toucher, goût, vision, ouïe et odorat), la vision et l'ouïe étant les sens primordiaux pour la majorité d'entre eux. Certaines espèces présentent des capacités supplémentaires, par exemple en matière de magnétoréception, d'écholocation active et de spectres de vision élargis (Martin, 2017). La vision et l'ouïe des oiseaux ont déjà fait l'objet d'un grand nombre d'études (p. ex. McClure et al., 2013; Demery, Burns & Mason, 2021; Wiley, 1991). En ce qui concerne l'odorat, la question a longtemps été de déterminer si les oiseaux avaient un odorat ou non (p. ex. Strong, 1911; Hill, 1905), et les études approfondies sur leurs capacités olfactives sont plutôt récentes. Il peut s'avérer complexe d'évaluer les capacités olfactives d'un organisme en raison de la nature subjective de l'olfaction (Stager, 1964). En effet, un animal qui n'est jamais observé en train d'adopter un comportement de reniflage ou de pistage ne laisse pas présager qu'il se sert de son odorat ou que ce dernier est puissant (Wenzel, 1971). Comme à peu près aucun oiseau n'adopte ce type de comportement, il a longtemps été cru que les oiseaux avaient un faible odorat ou même qu'ils en étaient complètement dépourvus (Martin, 2017). Ce n'est que depuis le début voire le milieu du 20^e siècle que l'odorat est étudié en tant que sens fonctionnel et utile, et ce, pour un nombre croissant d'espèces d'oiseaux (p. ex. Bang, 1960; Cobb, 1968; Mason & Clark, 1993; Martin, 2017). Cet avis a toutefois longtemps été mitigé, certains chercheurs croyant encore au début des années 1970 que les oiseaux n'accordaient que peu ou pas d'importance aux odeurs dans leur environnement immédiat (p. ex. Kare, 1970; Wenzel, 1971).

À ce jour, presque toutes les espèces aviaires dont les capacités olfactives ont fait l'objet d'études ont démontré sentir les odeurs, même si les réponses étaient variables, et les résultats étaient majoritairement reliés à une fonction écologique (Abankwah, Deeming & Pike, 2020). Par exemple, un nombre croissant de recherches ont démontré

que les oiseaux utilisent leur odorat à toutes sortes de fins, notamment pour la quête de nourriture (Amo & Saavedra, 2021; Potier et al., 2019; Stager, 1964, Mahr, 2022), l'élevage de leurs petits (Whittaker et al, 2009; Petit et al., 2002) ainsi que l'orientation, la reconnaissance des pairs et le choix d'un partenaire sexuel (Grubb, 1979; Nevitt & Bonadonna, 2005; Bonadonna, Hesters & Jouventin, 2003; Whittaker et al., 2011). Voici quelques exemples d'oiseaux dont les capacités olfactives particulières ont été démontrées.

Pendant ses vols planés, l'urubu à tête rouge (*Cathartes aura*), un rapace charognard, est en mesure de trouver à bonne distance les carcasses dont il se nourrit, car il détecte les panaches d'éthanethiol produits lors de la décomposition de la chair (Stager, 1964). Des employés de compagnies de gaz naturel ont rapporté à Stager (1964) qu'ils suivaient parfois les urubus à tête rouge pour détecter les fuites dans les conduites, le composé odorant ajouté au gaz naturel étant de l'éthanethiol! Ce vautour a même le nez assez fin pour être capable de déterminer à distance la fraîcheur des carcasses afin d'éviter celles qui sont trop vieilles ou en état de décomposition avancé (Houston, 1986).

Les oiseaux marins, comme les pétrels, les puffins et les albatros, doivent trouver leur nourriture au-dessus de l'océan, qui constitue un vaste paysage uniforme sans indice visuel. Pour ce faire, ils recherchent des panaches de sulfure de diméthyle, un composé organosulfuré généré lors de la consommation du phytoplancton par le zooplancton (Nevitt & Bonadonna, 2005). Ces panaches créent une sorte de paysage olfactif et annoncent la présence de zones océaniques à forte productivité primaire, c'est-à-dire de potentielles sources de nourriture (Martin, 2017).

Les kiwis (*Apteryx* sp.) possèdent les plus gros bulbes olfactifs en proportion de leur corps (Castro et al., 2010; Corfield et al., 2015) et sont connus pour leurs capacités olfactives hors pair. Ils sont les seuls oiseaux à avoir les narines placées au bout du bec et, combiné avec un sens tactile particulièrement développé, leur sens de l'odorat très fin leur permet de détecter avec une grande précision leur nourriture sous la litière de la forêt (Wenzel, 1971; Castro et al., 2010). Ces oiseaux nocturnes ont une vision médiocre et sont

incapables de voler (Wenzel, 1971), ce qui suggère un compromis d'investissement important dans les organes sensoriels de l'olfaction et du toucher. Des chercheurs font état de sons de reniflement émis par ces animaux pendant leur quête de nourriture, démontrant leur comportement unique d'utilisation active et visible de l'odorat (Castro et al., 2010).

1.6 La détection des odeurs de prédateurs

En 1998, Kats & Dill ont réalisé un survol de la littérature scientifique portant sur la détection chimiosensorielle des prédateurs par les proies. Ils n'ont trouvé qu'un seul article portant sur les oiseaux, plus précisément sur la capacité de l'étourneau sansonnet (*Sturnus vulgaris*) à distinguer de la nourriture contaminée par une molécule odorante provenant de glandes anales de Mustelidae (Mason, Clark & Shah, 1991). Depuis, des chercheurs se sont penchés sur la question de la détection des odeurs de prédateurs par les oiseaux, mais la très grande majorité des études ne portaient que sur une seule espèce ou un seul type de molécule odorante à la fois.

La reconnaissance de l'odeur des prédateurs est très importante, surtout dans les habitats où la visibilité est réduite (Amo et al., 2008), ou si la survie d'un individu dépend de sa capacité à déterminer les probabilités de rencontrer un prédateur (Amo, Visser & van Oers, 2011). Cependant, l'individu doit aussi être en mesure de déterminer si l'indice odorant est récent ou non afin de ne pas éviter inutilement une zone où il n'y a plus de prédateurs (Kats & Dill, 1998). De manière générale, les oiseaux ont des réactions négatives face à des odeurs inconnues, qu'elles soient associées à un danger réel ou non (Jones, Facchin, & McCorquodale, 2002; Amo et al., 2008; Roth II, Cox & Lima, 2008; Ekner & Tryjanowski, 2008; Zidar & Løvlie, 2012). Il a été démontré que les oiseaux sont capables de détecter des signaux chimiques de prédateurs notamment durant la reproduction (Amo et al., 2008), leurs déplacements (Mahr et al., 2022) et la quête de nourriture (Roth II, Cox & Lima, 2008). La détection des odeurs de prédateurs serait innée chez les oiseaux, du moins chez la mésange charbonnière (*Parus major*) (Amo, Visser & van Oers, 2011) et le poulet domestique (*Gallus gallus domesticus*) (Zidar & Løvlie, 2012). Fluck et al. (1996) ont observé que des poussins de sept jours adoptaient un

comportement d'évitement significatif en présence d'un morceau de tissu sentant le chat par rapport à des odeurs neutres. Des études ont toutefois démontré une absence de changement comportemental significatif chez le merlebleu de l'Est (*Sialia sialis*) et le troglodyte familial (*Troglodytes aedon*) après l'application d'une odeur de prédateur dans leurs nichoirs (Godard et al., 2007; Johnson, Murphy & Parrish, 2011). En outre, les mésanges charbonnières ne seraient pas en mesure de détecter les odeurs de prédateurs pendant leur sommeil (Amo, Visser & van Oers, 2011). Cela laisse sous-entendre une variabilité des capacités olfactives en fonction de l'activité ou de la période ou, encore, de l'importance associée au risque présenté par les odeurs selon les espèces. Or, cette variabilité demeure inconnue, surtout à l'échelle de la communauté et en milieu naturel.

Quelles que soient les conditions environnementales, la probabilité qu'un organisme détecte une odeur de prédateur en milieu naturel dépend de trois principaux facteurs : les capacités olfactives de l'organisme, la distance entre ce dernier et la source odorante, ainsi que le type et l'intensité de l'odeur. Des études sur les liens entre un surinvestissement dans les capacités olfactives et l'écologie des espèces ont permis de mettre en évidence que les différences dans les tailles du cornet nasal et du bulbe olfactif étaient liées aux capacités olfactives des espèces (Wenzel, 1987). D'autres chercheurs ont démontré que la taille du cornet nasal était fortement corrélée à la superficie de l'épithélium olfactif ainsi qu'au volume du bulbe olfactif, trois structures essentielles au sens de l'olfaction (p. ex. Clark, Hagelin & Werner, 2014). Il est donc attendu que les espèces d'oiseaux qui surinvestissent dans la longueur du cornet nasal détectent les signaux olfactifs avec une plus grande acuité relative (Proulx et al., en préparation).

La prédation des nids constitue l'une des principales sources d'échec reproductif pour de nombreux organismes, dont plusieurs passereaux (Ricklefs, 1969). De manière générale, les nids situés directement au sol ou parmi de la végétation clairsemée sont plus vulnérables à la prédation que les nids se trouvant parmi de la végétation basse et dense ou ceux installés dans des cavités (Bandeira & Morante-Filho, 2024; DeGregorio et al., 2016; Ricklefs, 1969). Fontaine et Martin (2006) ont relevé qu'en réponse à la prédation ou au risque de prédation, les parents produisent parfois des couvées plus petites et le

nombre de visites au nid pour nourrir la femelle en couvaison ou les oisillons est souvent réduit. Les oiseaux tendent généralement à réagir aux risques de prédation perçus en choisissant des sites de nidification jugés moins vulnérables (Deeming & Reynolds, 2015). Enfin, la proximité d'un organisme à une source d'odeur dépend de son utilisation du territoire. Par exemple, les oiseaux de plus petite taille ont un territoire d'alimentation plus restreint (Ottaviani et al., 2006; Schoener, 1968), ce qui en oblige plusieurs à faire un plus grand nombre d'excursions de quête de nourriture au sein de leur territoire (Hixon, 1980) et, en retour, augmente leur probabilité d'entrer en contact avec l'odeur. Les petits oiseaux effectuent aussi un plus grand nombre d'excursions pour s'alimenter en raison de taux métaboliques spécifiques plus élevés que chez les grands oiseaux (McNab, 1988).

L'urine de félins est reconnue pour déclencher toutes sortes de réactions négatives chez les petits mammifères, comme une paralysie temporaire, un état de vigilance accrue et des avortements spontanés (Voznessenskaya, 2014). Cela serait dû en grande partie à la félinine, une protéine présente dans l'urine de plusieurs félins (Miyazaki et al., 2006), dont le chat domestique (*Felix domesticus*) et le lynx roux (*Lynx rufus*). L'urine des prédateurs contient des protéines odorantes associées à leur régime carnivore que les proies peuvent généralement reconnaître (Nolte et al., 1994). Mattina, Pignatello & Swihart (1990) ont déterminé que la marmotte commune (*Marmota monax*), le lièvre d'Amérique (*Lepus americanus*) et le cerf de Virginie (*Odocoileus virginianus*), des proies du lynx roux, montraient une diminution de leurs activités de marquage de territoire et de quête de nourriture en présence d'urine de ce prédateur. Une étude récente a évalué la réponse des oiseaux à l'odeur de l'urine du lynx roux dans un contexte de quête de nourriture en milieu naturel (Dotta, Yaman & Huynh, 2024). Les chercheurs ont observé à l'échelle de la communauté une activité d'alimentation plus faible, mais non significative statistiquement, aux dispositifs traités avec de l'urine par rapport aux dispositifs témoins. Ils suggèrent toutefois que l'ambiguïté des résultats découle de réponses contrastées entre les espèces au sein de la communauté (Dotta, Yaman & Huynh, 2024), ce qu'ils n'ont pas testé.

1.7 Les syndromes et les compromis dans l'espace des traits sensoriels

1.7.1 La vision et le diamètre des yeux

L'acuité est la précision à laquelle un système sensoriel perçoit et extrait l'information de son environnement (Caves, Brandley & Werner, 2018). L'acuité visuelle, c'est-à-dire la capacité de discriminer des détails statiques dans l'espace dans un environnement contrasté, permet de mesurer la qualité de la vision d'un organisme (Caves, Brandley & Werner, 2018). Les organismes dont le diamètre des yeux est plus grand ont par défaut une meilleure acuité visuelle (Kemp & Kirk, 2014; Caves, Brandley & Werner, 2018). En outre, les mammifères ayant les plus grands yeux et une meilleure acuité visuelle présentent généralement un canal semi-circulaire de l'oreille avec un plus grand rayon de courbure, ce qui leur permet de compenser les mouvements rapides de la tête et de stabiliser le regard (Kemp & Kirk, 2014). Kiltie (2000) démontre également une forte corrélation entre l'acuité visuelle de certaines espèces de mammifères et d'oiseaux et un plus grand diamètre axial de leurs yeux (Figure 1).

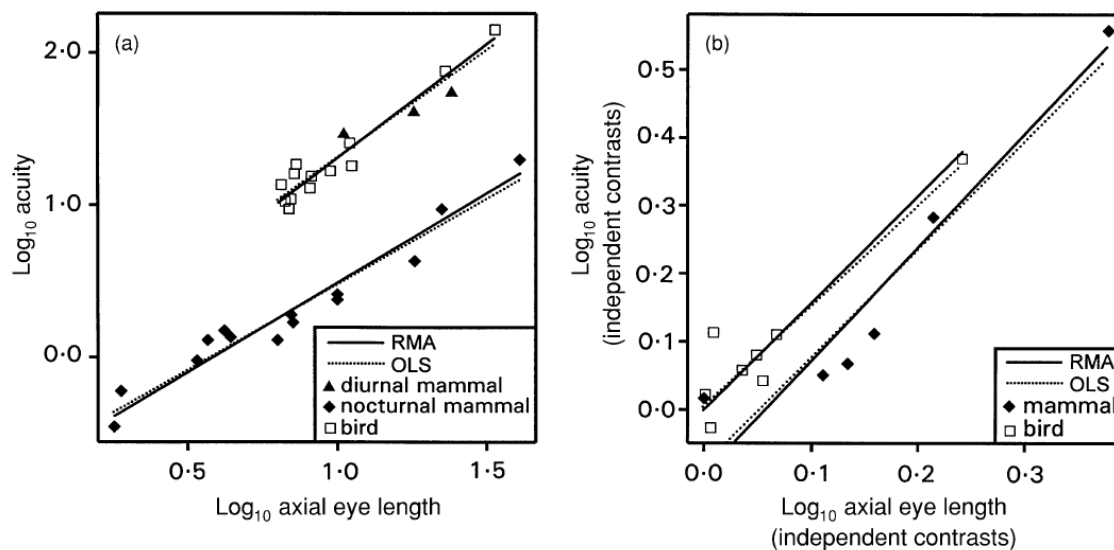


Figure 1 À gauche : acuité visuelle en log 10 (cycles/degrés) par rapport au diamètre axial de l'œil en log10 (en mm) pour des espèces d'oiseaux et de mammifères. À droite : acuité visuelle en log10 (cycles/degrés) par rapport au diamètre axial de l'œil (en mm) en contexte de contrastes indépendants pour des espèces d'oiseaux et de mammifères. Lignes pleines : RMA = régression par l'axe majeur réduit, OLS = méthode des moindres carrés ordinaires (Kiltie, 2000).

Sur le graphique de gauche de la Figure 1, les oiseaux (carrés blancs) affichent une acuité visuelle équivalente à celle des mammifères diurnes en fonction du diamètre axial de leurs yeux, tandis que le graphique de droite montre que les oiseaux ont une meilleure acuité visuelle que les mammifères en général dans un contexte de fort contraste (alternance de bandes foncées et de bandes pâles).

Selon Kiltie (2000), il y aurait une hypoallométrie entre la taille de l'œil et la masse corporelle, mais celle-ci serait compensée par une acuité visuelle proportionnelle (même légèrement hyperallométrique) à la longueur axiale de l'œil chez les oiseaux. Cela signifie qu'un petit organisme aura des yeux en moyenne proportionnellement plus grands qu'un organisme de plus grande taille, mais que ce dernier devrait avoir une meilleure acuité visuelle parce que ses yeux sont intrinsèquement plus grands. Un autre exemple est qu'un prédateur qui chasse à la vue, comme un faucon, doit investir davantage d'énergie dans des yeux au grand diamètre plutôt que dans d'autres organes sensoriels moins sollicités (De Graaf, Tilghman & Anderson, 1985; Caves, Brandley & Werner, 2018). Une

meilleure acuité visuelle est associée à des proies potentiellement plus petites, à des manœuvres en vol plus précises et à un territoire de nidification et d'alimentation assombri chez les oiseaux forestiers (Ausprey, 2021; Ausprey, Newell & Robinson, 2021).

1.7.2 L'ouïe et les plages de fréquences des chants

L'acuité auditive des oiseaux est généralement meilleure entre 1 kHz et 5 kHz, mais certaines espèces, notamment celles dont les chants atteignent des fréquences plus hautes, peuvent bien entendre au-delà de cette plage (Martin, 2017; Friis et al., 2021). L'acuité acoustique est habituellement réduite au-delà de 10 kHz (Friis et al., 2021), et certains groupes, comme les Columbidae, pourraient détecter les infrasons (Beason, 2004; Martin, 2017). Les oiseaux de grande taille produisent des sons plus graves et peuvent difficilement produire des sons aigus et complexes ou des trilles rapides en raison des contraintes physiques associées à leur bec plus gros (Demery, Burns & Mason, 2021; Friis et al., 2021). Les oiseaux chanteurs (oscines) sont dotés d'un syrinx élaboré qui leur permet de produire des chants plus variés, et leurs chants couvrent généralement une plage de fréquences plus large (Figure 2) (Friis et al., 2021).

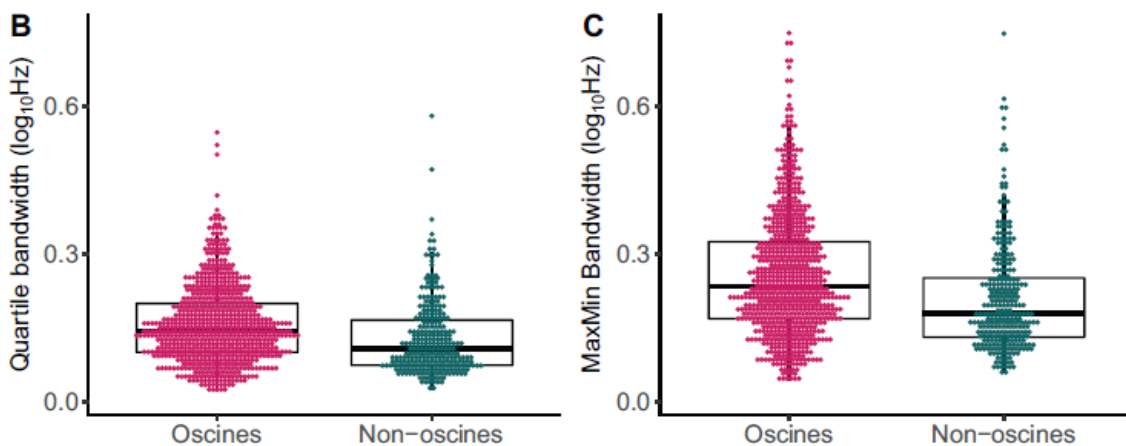


Figure 2 Nuages de points et diagrammes à moustaches montrant la distribution des quartiles de plages de fréquences de chants (à gauche) ainsi que des plages affichant les fréquences maximales moins les fréquences minimales (MaxMin) pour les passereaux oscines et non oscines (à droite) respectivement. Les plages de 0,0-0,3 et de 0,3-0,6 log₁₀ Hz correspondent environ à un et à deux octaves. Une octave est le double d'une fréquence ou correspond à une différence de 0,301 log₁₀ Hz (tiré de Friis et al., 2021).

Ces oiseaux tendent aussi à apprendre des chants plus complexes s'étalant sur toute la plage de fréquences qu'ils sont en mesure de produire (Friis et al., 2021). Selon Wiley (1991), l'habitat a une forte incidence sur la structure du chant des oscines, mais cela touche surtout la structure temporelle et moins la fréquence des chants. Il convient de noter que puisque les hautes fréquences s'atténuent plus rapidement durant la propagation du son, encore plus en présence de végétation, cela rend moins efficaces les signaux de communication aigus sur de longues distances, comme les chants de parade nuptiale (Friis et al., 2021). Les hautes fréquences de chant sont ainsi plus souvent retrouvées chez les espèces qui fréquentent des habitats ouverts plutôt que fermés (Boncoraglio & Saino, 2007; Krenhardt et al., 2025). Sur le plan évolutif, l'acuité auditive d'une espèce devrait surtout être adaptée aux fréquences produites par ses congénères afin de favoriser la communication intraspécifique et la sélection des partenaires sexuels (Schwartzkopff, 1955). Par exemple, un oiseau dont la plage de fréquence de chants s'étend majoritairement de 2 à 5 kHz devrait avoir plus de facilité à détecter les sons se situant

dans cette même plage. Cela ne veut pas dire qu'il ne peut pas entendre des sons plus graves ou plus aigus, mais plutôt que son acuité auditive serait meilleure dans cette plage.

1.7.3 L'odorat et les bulbes olfactifs

Sauf quelques exceptions, tous les oiseaux présentent une paire de narines qui leur permet de respirer, des cavités nasales internes tapissées d'épithélium olfactif, des récepteurs olfactifs fonctionnels ainsi qu'une connexion neuronale entre les bulbes olfactifs et le cerveau (Jones & Roper, 1997; Clark, Hagelin & Werner, 2014). Le cornet nasal est constitué de trois chambres et sert à filtrer les débris, à réchauffer et à humidifier l'air ainsi qu'à ralentir le débit de l'air entrant : c'est aussi à cet endroit que la présence de molécules odorantes est détectée par les récepteurs olfactifs (Martin, 2017). Une narine positionnée vers la partie distale du bec, c'est-à-dire plus loin du cerveau, est associée à un cornet nasal plus long et à un plus grand nombre de récepteurs auxquels les molécules odorantes peuvent se lier par diffusion (Clark, Hagelin & Werner, 2014).

L'importance fonctionnelle de la grande diversité de tailles relatives de l'appareil olfactif et des bulbes olfactifs entre les espèces demeure floue à ce jour, mais leur organisation interne confirme l'origine ancestrale et la nature fortement préservée de l'appareil olfactif chez les oiseaux (Martin, 2017). En effet, les espèces arborant les bulbes olfactifs les plus gros font généralement partie des taxons les plus anciens (p. ex. Aptyrygiformes, Struthioniformes, Ansériformes), et les espèces dont les bulbes olfactifs sont les plus petits en proportion font plutôt partie des taxons les plus récents (p. ex. Passériformes, Psittaciformes, Apodiformes [Trochiliformes]) (Khan et al., 2015; Corfield et al., 2015) (Figure 3).

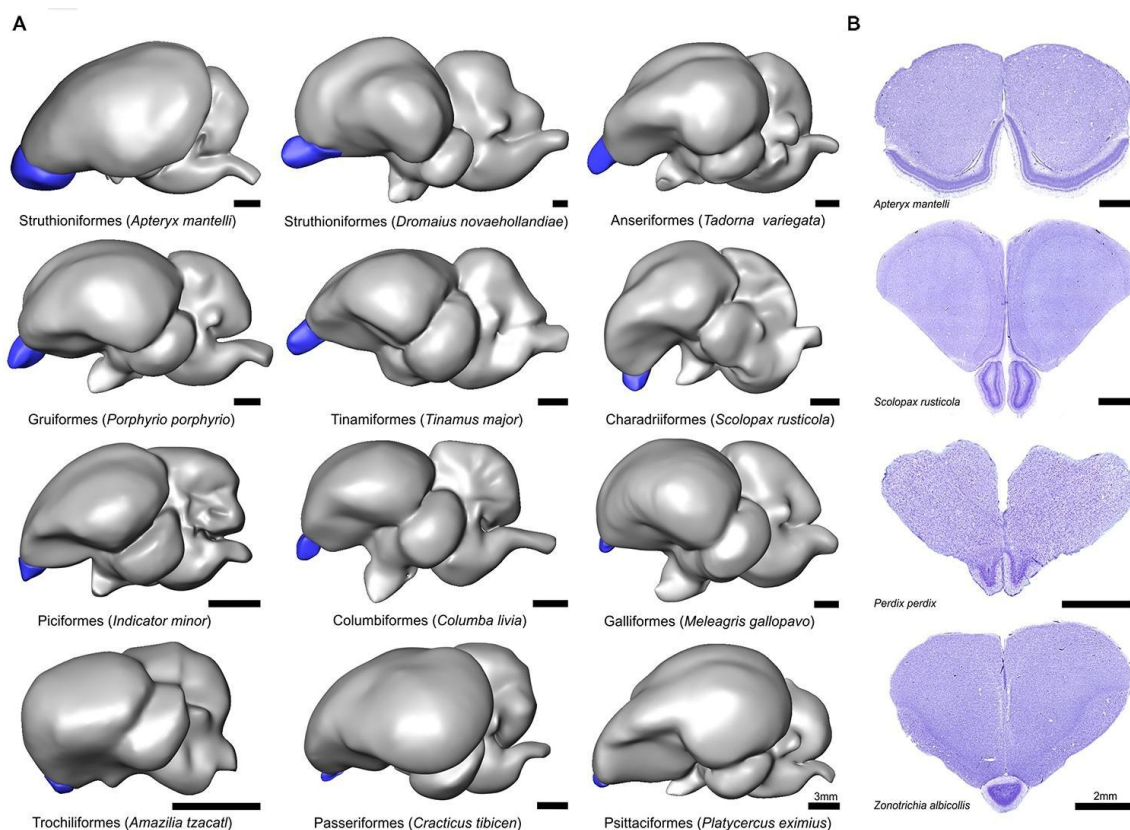


Figure 3 Morphologie générale des bulbes olfactifs chez les oiseaux. (A) Vue latérale de modèles en 3D de 12 espèces aviaires représentatives. Les bulbes olfactifs sont en bleu et classés du plus gros au plus petit (échelle = 3 mm). (B) Sections colorées des corps de Nissl montrant les bulbes olfactifs de 4 espèces aviaires représentatives et illustrant la variation de l'architecture cellulaire entre les espèces (échelle = 2 mm) (tiré de Corfield et al., 2015).

Cela signifie que les ancêtres des oiseaux modernes auraient eu un très bon odorat et que ce sens aurait été très important pour eux, mais qu'au fil de l'évolution, les oiseaux auraient investi davantage dans les appareils et les organes de la vision et de l'équilibre (Corfield et al., 2015). Toutefois, un oiseau avec de gros organes sensoriels associés à la vision ou à l'ouïe n'a pas nécessairement un mauvais odorat (Potier et al., 2019). De manière générale, les structures neuronales du cerveau croissent de façon proportionnelle à la taille d'un organisme, mais les bulbes olfactifs semblent échapper à cette règle en croissant plus rapidement (Corfield et al., 2015). Les oiseaux aquatiques et semi-aquatiques sont reconnus pour avoir un meilleur odorat que les oiseaux terrestres (Martin,

2017), contrairement à ce qui est observé chez les mammifères (Nummela et al., 2013). Les oiseaux avec des bulbes olfactifs plus gros sont capables de détecter certaines odeurs à de plus faibles concentrations, mais les données sur les seuils de détection demeurent rares (Clark, Avilova & Bean, 1993). Les oscines ont les bulbes olfactifs les plus petits en proportion, mais leur odorat serait tout de même comparable à celui des petits rongeurs, pour qui l'odorat est un sens très important (Clark, Avilova & Bean, 1993).

1.8 Objectifs généraux

Jusqu'à maintenant, très peu d'études ont tenté de comparer si la variabilité interspécifique des compromis sensoriels et plus particulièrement des capacités olfactives des oiseaux pouvait entraîner des réponses comportementales différentes en présence d'une odeur de prédateur, à l'échelle de la communauté et dans un milieu naturel. La présente étude a été divisée en deux volets : un volet pour établir une base de données sur les traits sensoriels des oiseaux, et un volet sur le terrain avec une manipulation du paysage olfactif afin d'obtenir des données acoustiques en vue de tester les hypothèses découlant du premier volet.

1.8.1 Volet 1 : base de données sur les traits sensoriels des oiseaux nicheurs du Québec

Le premier objectif consistait à créer une base de données sur les traits sensoriels des oiseaux nicheurs du Québec à l'aide d'études antérieures et de bases de données existantes, ainsi qu'à y ajouter des mesures externes des traits de l'olfaction et de la vision obtenus auprès de spécimens de musée en peau ou naturalisés. Ces mesures ont servi à évaluer les potentiels compromis sensoriels chez les oiseaux, notamment en ce qui a trait à la vision, à l'audition et à l'odorat.

1.8.2 Volet 2 : modification du paysage olfactif à l'aide d'urine de prédateur

Le second objectif consistait à manipuler l'environnement olfactif avec de l'urine de prédateur en s'inspirant des concepts de paysage sensoriel (Proulx, Wadinger & Koder, 2019), de paysage olfactif (Finnerty et al., 2022) et de paysage de la peur (Bleicher, 2017)

afin de déterminer le rôle des capacités olfactives des oiseaux forestiers nicheurs sur la perception du risque de prédation et l'activité acoustique à l'échelle de la communauté.

1.9 Hypothèses

Il est attendu que les espèces qui maximisent les traits d'olfaction (plus grand ratio de la distance œil-narine sur le diamètre transversal de l'œil) feront preuve d'une activité acoustique réduite dans les sites au paysage olfactif manipulé par l'application d'urine de lynx roux. En complément, nous prédisons que la réponse des espèces sera modulée par des traits qui influencent la probabilité d'entrer en contact avec l'odeur de prédateur, comme la taille du territoire d'alimentation (liée à la masse corporelle) en période de nidification et la position du nid dans les strates forestières. Un petit territoire d'alimentation et un nid près du sol devraient être associés à une plus faible activité acoustique en présence de l'odeur d'urine du prédateur.

1.10 Méthodes du volet 1

1.10.1 Base de données

1.10.1.1 Liste des espèces d'oiseaux nicheurs

Selon la liste du Regroupement QuébecOiseaux en date d'avril 2023, les oiseaux nicheurs du Québec comptaient 283 espèces, regroupées en 19 ordres et en 53 familles. Cette liste a été utilisée pour les étapes de la collecte de données morphologiques et de l'établissement de la base de données (Proulx et al., en préparation).

1.10.1.2 Collecte de données morphologiques

Les données morphologiques ont été recueillies sur 283 spécimens en peau ou naturalisés (283 espèces, 1 individu par espèce) de la collection d'oiseaux du Campus du patrimoine naturel du Musée canadien de la nature (Gatineau, Québec) en novembre 2023. Un individu mâle adulte a été sélectionné pour chaque espèce de la liste, sauf trois spécimens pour lesquels aucun mâle n'était disponible, soit une femelle (mouette pygmée,

Hydrocoleus minutus) et deux spécimens de sexe inconnu (tourterelle turque, *Streptopelia decaocto*; grande aigrette, *Ardea alba*) ainsi qu'un spécimen juvénile (pic à dos noir, *Picoides arcticus*). Parmi toutes les mesures prises au vernier (précision de 0,01 mm) sur les spécimens, le diamètre transversal interne de l'œil ainsi que la distance entre le coin interne proximal de la narine et la commissure interne de l'œil (distance entre l'œil et la narine) ont été retenus aux fins de la présente étude.

1.10.1.3 Collecte de données tirées de la littérature

À partir de divers ouvrages et bases de données accessibles en ligne, il a été possible de colliger des données pour un grand nombre d'espèces présentes au Québec sur des variables comme le diamètre axial du globe oculaire (Ritland, 1982), le poids moyen (Dunning Jr, 2007), le volume du bulbe olfactif (Corfield et al., 2015) ainsi que l'habitat, la strate de nidification (herbacées, arbustive, arborée et cavité) et la niche alimentaire des oiseaux (De Graaf, Tilghman & Anderson, 1985; Martin & Proulx, 2016; Birds of the World; 2025). Les principales données sur les traits des espèces retenues aux fins de l'étude sont présentées au tableau 1.

Ritland (1982) a mesuré sous tous les angles les globes oculaires de milliers d'organismes de différents taxons, dont 220 espèces d'oiseaux recensées au Québec. Les données de diamètre transversal de l'œil recueillies sur les spécimens en peau et naturalisés concordent avec un R^2 de 89,58 % ($p = < 2,2^{-16}$) avec les données du diamètre axial des yeux d'oiseaux obtenues par Ritland (1982) pour les mêmes espèces. Cette forte relation permet d'inférer avec une bonne confiance l'acuité visuelle des oiseaux étudiés à partir du diamètre transversal des yeux des spécimens en peau.

Parmi le jeu de données de Corfield (2015) sur le volume des bulbes olfactifs de différentes espèces d'oiseaux, un total de 46 espèces correspondent également à des espèces dont des mesures externes ont été prises sur des spécimens en peau ou naturalisés au Campus du patrimoine naturel du Musée canadien de la nature. Le volume des bulbes olfactifs est fortement corrélé à la distance entre l'œil et la narine des spécimens mesurés

($R^2 = 0,7606$, $p = 1,279^{-14}$). Par conséquent, la distance entre l'œil et la narine a été retenue comme indicateur de l'acuité olfactive dans les analyses subséquentes.

Enfin, une base de données sur la plage de fréquences des chants a été établie en mesurant manuellement sur des sonogrammes les fréquences maximales et minimales des chants des 283 espèces d'oiseaux nicheurs du Québec sur la librairie Macauley (Cornell University, 2023). Un minimum de trois chants par espèce a été analysé, selon les critères suivants, lorsque c'était possible : « adulte », « mâle » et « chant nuptial ». Ensuite, la moyenne des fréquences maximales et minimales de ces trois sonogrammes était retenue. La précision maximale visible à l'œil sur les sonogrammes était de 0,25 kHz; la valeur minimale attribuée pour indiquer une fréquence égale ou inférieure à cette valeur était donc de 0,25 kHz, car zéro n'est pas une valeur possible pour une fréquence de chant. Le même phénomène est survenu pour la fréquence maximale, qui était de 10 kHz sur le sonogramme alors que parfois le chant dépassait visiblement cette fréquence. Ainsi, une valeur maximale de 10 kHz était attribuée pour indiquer une fréquence égale ou supérieure à cette valeur. La plage de fréquences a été retenue comme indicateur de l'acuité auditive, car les oiseaux chanteurs utilisent surtout des chants relativement complexes lors des parades nuptiales, que le chant soit inné ou non (Friis et al., 2021). Ils doivent alors être en mesure de bien entendre les fréquences de chants de leurs congénères pour trouver le meilleur partenaire sexuel possible.

1.10.2 Positionnement dans l'espace sensoriel multidimensionnel

Afin de créer un espace sensoriel multidimensionnel des oiseaux nicheurs du Québec, un ratio entre le diamètre transversal de l'œil (indicateur de l'acuité visuelle) et la distance entre l'œil et la narine (indicateur de l'acuité olfactive) a été utilisé pour faire ressortir les espèces ayant investi plus d'énergie dans les organes du système olfactif que du système visuel (Figure 4). Le diamètre de l'œil est corrélé avec un $R^2 = 0,71$ ($p = < 2,2^{-16}$) à la masse (en log) des espèces, tandis que la distance entre l'œil et la narine y est corrélée avec un $R^2 = 0,70$ ($p = < 2,2^{-16}$). La plage de fréquences des chants (indicateur des capacités auditives) a été utilisée comme indicateur des espèces ayant

investi davantage dans l'audition, les espèces dont la plage est plus large étant considérées comme ayant une meilleure acuité auditive. La plage de fréquences des chants est faiblement corrélée à la masse (en log) des oiseaux, avec un $R^2 = 0,22$ ($p = < 2,2^{-16}$). La figure 4 illustre le positionnement de 280 espèces (18 ordres) d'oiseaux nicheurs du Québec dans un espace sensoriel multidimensionnel de la vision, de l'audition et de l'olfaction.

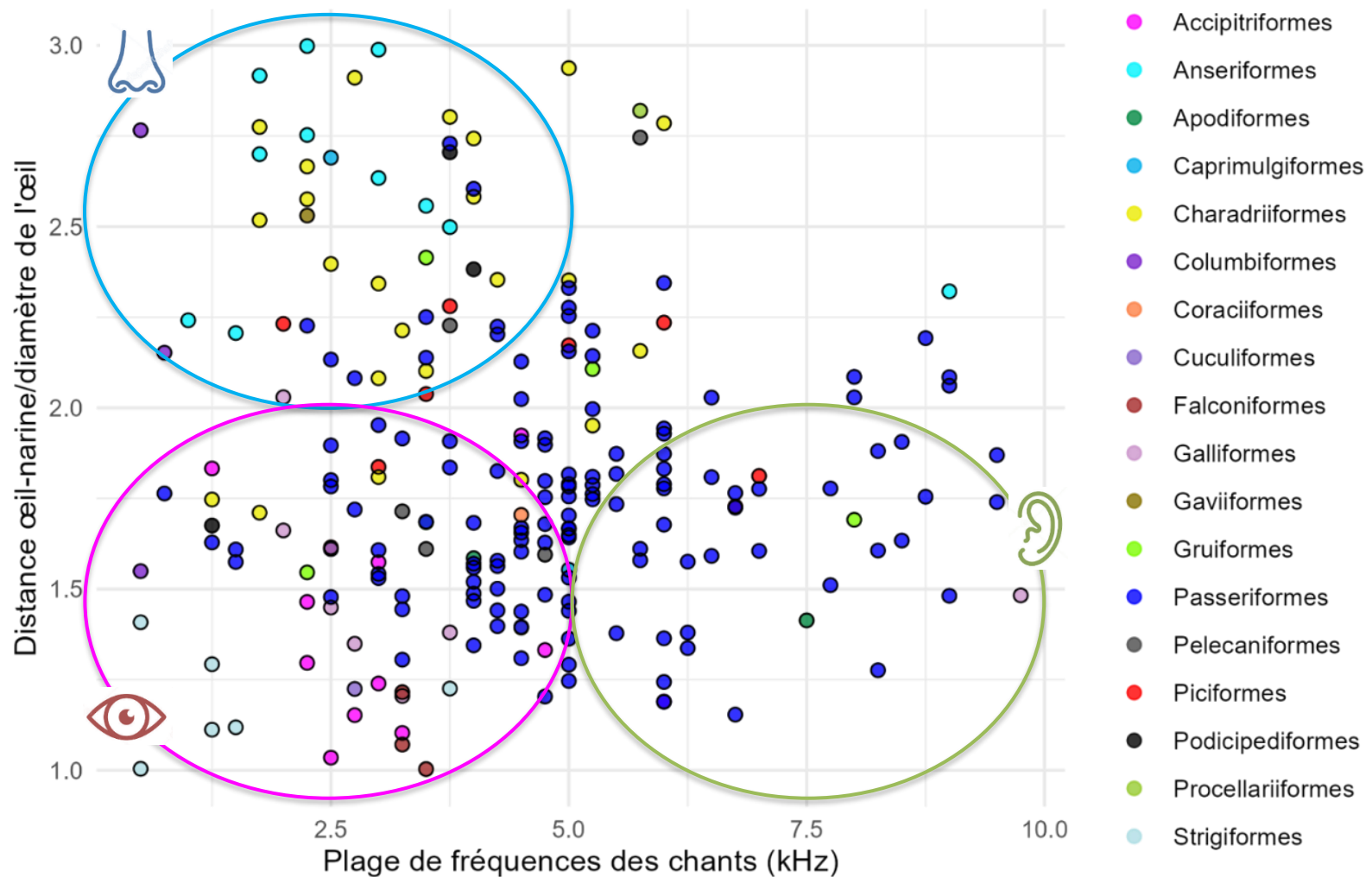


Figure 4 Espace sensoriel multidimensionnel de la vision, de l'odorat et de l'ouïe pour 280 espèces (18 ordres) d'oiseaux nicheurs du Québec. Chaque point coloré correspond à une espèce.

Dans la Figure 4, chaque point coloré correspond à une espèce, mais les trois espèces de Suliformes de la liste des oiseaux nicheurs du Québec ont été retirées en raison de l'absence de narines externes visibles chez les adultes. Plus une espèce est située vers le haut du graphique, plus son odorat serait développé; la majorité des espèces des Ansériformes (p. ex. canards) et des Charadriiformes (oiseaux limicoles) se trouvent dans le quadrant supérieur gauche (ovale bleu). Toutes les espèces de l'ordre des Accipitriformes et des Falconiformes (points roses), qui n'ont pas un chant complexe, se retrouvent dans le quadrant inférieur gauche (ovale rose). Plus une espèce est située vers la droite du graphique, plus son ouïe serait développée sur une large plage de fréquences. Les espèces plus au centre seraient moins spécialisées dans l'un ou l'autre de ces sens, ou présentent une synergie entre deux sens au détriment du troisième (p. ex. bonne vision et chant complexe, mais odorat peu développé). Parmi les espèces de l'ordre des Passériformes se trouvant dans le quadrant inférieur à droite (ovale vert) figurent l'Étourneau sansonnet, les moqueurs et les grives, tous connus pour leurs chants complexes. Enfin, le quadrant supérieur à droite ne comporte presque aucune espèce, ce qui suggère que l'investissement d'énergie à la fois dans les systèmes olfactif et auditif est plutôt rare, du moins parmi la communauté d'oiseaux étudiés.

1.11 Méthodes du volet 2

1.12 Méta-analyse

Une approche par méta-analyse à effets aléatoires avec modérateurs a été retenue afin d'évaluer les réponses au traitement à l'échelle de l'espèce et de la communauté. Une méta-analyse consiste en la comparaison des résultats d'un regroupement d'études individuelles similaires, par exemple le risque relatif de décès de différents groupes de personnes après la prise d'un même médicament (Borenstein et al., 2021).

Chaque étude obtient une taille d'effet indépendante, et la méta-analyse permet d'obtenir une taille d'effet globale pour le médicament en question. Dans le contexte du présent travail, chaque espèce d'oiseau représente une « étude », et la méta-analyse permet

de généraliser à l'ensemble de la communauté les résultats de chaque espèce face au dispositif expérimental.

Un groupe (ou une espèce) avec de faibles incidences a un poids relatif diminué et présente une erreur type (ET) plus grande et vice versa pour les groupes de fortes incidences. La taille d'effet correspond à l'intensité de la réponse positive ou négative de chaque groupe (ou espèce) face au traitement administré (risque relatif estimé). Si les mesures d'effet sont fondées sur le ratio des réponses au traitement expérimental, une taille d'effet inférieure à « 0 » signifie généralement une réponse négative face au traitement (Borenstein et al., 2021). À l'inverse, une taille d'effet supérieure à « 0 » correspond d'ordinaire à une réponse positive au traitement (Borenstein et al., 2021).

1.13 Sommaire de l'étude

Nous avons réalisé une étude pendant six semaines au Parc national de la Mauricie (PNLM; Québec, Canada). Le PNLM a été choisi en raison de ses vastes milieux naturels protégés mais faciles d'accès et de sa communauté d'oiseaux chanteurs bien diversifiée. L'étude consistait à manipuler l'environnement olfactif en s'inspirant des concepts de paysage sensoriel (Proulx, Wadinger & Koder, 2019), de paysage olfactif (Finnerty et al., 2022) et de paysage de la peur (Bleicher, 2017). Nous avons manipulé le paysage olfactif de cinq sites forestiers, chacun appairé avec un site similaire à proximité, par l'application répétée d'urine de lynx roux, un prédateur naturellement absent du parc. Nous avons ensuite effectué un inventaire d'oiseaux à l'aide d'enregistrements audios. Une méta-analyse à effets aléatoires avec modérateurs a permis d'explorer la variabilité interspécifique de la réponse acoustique des espèces d'oiseaux et les facteurs qui régissent cette réponse en présence d'une odeur d'urine de prédateur.

CHAPITRE II

DES OISEAUX QUI ONT DU PIF : RÉPONSE DES OISEAUX FORESTIERS AUX ODEURS DE PRÉDATEURS DANS LEUR HABITAT DE REPRODUCTION

Manuscrit et traduction en préparation pour la revue *Avian Research*

Josyane Brouillard*, Raphaël Proulx

Centre de recherche sur les interactions bassins versants – écosystèmes aquatiques (RIVE), Département des Sciences de l'environnement, Université du Québec à Trois-Rivières, 3351, boulevard des Forges, Trois-Rivières (Québec), G9A 5H7, Canada

*Auteure-ressource; adresse électronique : josyane.brouillard@uqtr.ca

2.1 Résumé

La théorie de l'écologie sensorielle stipule que les sens comme la vision, l'audition et l'olfaction déterminent la sélection d'habitats et les adaptations comportementales des organismes. L'environnement peut être perçu comme une mosaïque de signaux (p. ex. structures physiques, sons, odeurs) qui interagissent avec le système sensoriel de ces organismes. Si les oiseaux sont connus pour utiliser principalement les indices visuels et auditifs lors de la sélection de leurs habitats de reproduction, leur recours aux indices olfactifs demeure peu documenté, surtout à l'échelle du paysage. Pour explorer le rôle de l'olfaction chez les oiseaux forestiers nicheurs dans leur réponse à un paysage olfactif manipulé, une étude de six semaines a été menée au Parc national de la Mauricie (Québec, Canada). De l'urine de lynx roux (*Lynx rufus*), un prédateur naturellement absent du parc, a été appliquée à répétition à cinq stations forestières, chacune associée à une station témoin similaire. Un inventaire acoustique de 45 espèces d'oiseaux forestiers a révélé une diminution de faible à modérée de l'activité acoustique aux sites traités; la probabilité qu'une espèce fasse preuve d'activité acoustique aux sites avec une odeur d'urine de lynx roux est 48 % plus faible, avec un logarithme du ratio d'incidence moyen pondéré de $-0,65 \pm 0,32$ (IC 95 %). La réponse des espèces ne semblait pas expliquée par le trait associé à l'olfaction des oiseaux ni par la strate de nidification. En contrepartie, la taille du territoire d'alimentation, fortement liée à la taille du corps et au risque de prédation, semblait expliquer la réponse des espèces au traitement. Les espèces dont la taille du territoire est plus petite présentent une activité acoustique plus faible en présence d'urine ($z = 2,86, p = 0,004$). Cette étude figure parmi les premières à explorer *in situ* la réponse acoustique de la communauté d'oiseaux aux modifications du paysage olfactif. Les résultats s'ajoutent aux données probantes selon lesquelles les oiseaux sont sensibles aux signatures olfactives de leur environnement.

Mots-clés : écologie sensorielle, paysage olfactif, oiseaux, traits d'olfaction, risque de prédation

2.2 Abstract

Sensory ecology theory posits that senses such as vision, hearing, and olfaction shape habitat selection and behavioural adaptations in organisms. It frames the environment as a mosaic of signals—visual structures, sounds, and odours—that interact with the sensory systems of these organisms. Although birds are generally known to rely on visual and auditory cues when selecting breeding habitats, their use of olfactory cues remains poorly documented, especially at the landscape scale. To examine the role of olfaction in how breeding forest birds respond to an olfactory landscape of fear, we conducted a six-week field study in La Mauricie National Park (Québec, Canada). Bobcat (*Lynx rufus*) urine—a predator naturally absent from the park—was repeatedly applied at five forest stations, each paired with a comparable control station. An acoustic survey of 45 forest bird species revealed a low to moderate decrease in overall acoustic activity at treated sites; the probability of acoustically detecting any bird species at sites exposed to bobcat urine was 48% lower, with a mean weighted log incidence ratio of -0.65 ± 0.32 (95% CI). This response did not appear to be significantly associated with birds species' olfactory capability or with nesting stratum. Instead, territory size—a trait closely linked to body size and predation risk—was associated to how species responded to the treatment. Bird species with as smaller feeding territory size showed reduced acoustic activity in the presence of urine ($z = 2.86$, $p = 0.004$). This study is among the first to investigate *in situ* how an avian community responds to changes in the olfactory landscape. The results contribute to the growing body of evidence suggesting that birds are sensitive to the olfactory signatures of their environment.

Keywords: sensory ecology, olfactory landscape, birds, olfactory traits, predation risk

2.3 Introduction

La théorie de l'écologie sensorielle stipule que les sens comme la vision, l'audition et l'olfaction déterminent la sélection des ressources et les adaptations comportementales des organismes. Dans ce contexte, le paysage peut être décrit comme une mosaïque de signaux (p. ex. structures physiques, sons, odeurs) qui interagissent entre eux et avec le système sensoriel des organismes (Endler, 1987; Dominoni et al., 2020). Chez les oiseaux, il existe une diversité de systèmes sensoriels qui sont adaptés à la myriade de signaux présents dans l'environnement (Safi & Siemers, 2010; Hrcir et al., 2023; Stevens, 2013). Par exemple, l'acuité visuelle résiduelle, définie comme étant le diamètre de l'œil corrigé pour la taille du corps, est associée à des proies potentiellement plus petites, à des manœuvres en vol plus précises et à un territoire de nidification et d'alimentation assombri chez les oiseaux forestiers (Ausprey, 2021; Ausprey, Newell & Robinson, 2021). Les caractéristiques acoustiques des chants sont également associées à l'écologie des oiseaux, les hautes fréquences de chant étant plus souvent retrouvées chez les espèces qui fréquentent des habitats ouverts plutôt que fermés (Boncoraglio & Saino, 2007; Krenhardt et al., 2025). Sur le plan olfactif, à partir d'un jeu de données de 135 espèces, Corfield et al. (2015) ont montré que la taille du bulbe cérébral associé à l'olfaction (le bulbe olfactif), corrigée pour la taille du corps, était positivement associée aux taxons plus anciens, comme les Ansériformes et les Aptérygiformes, ainsi qu'à un mode de vie aquatique ou semi-aquatique (cf. Martin, 2017). À ce jour, peu d'études ont tenté d'évaluer en milieu naturel si une manipulation du paysage sensoriel, plus particulièrement de sa dimension olfactive, modifiait le comportement des oiseaux.

Presque toutes les espèces aviaires dont les capacités olfactives ont fait l'objet d'études semblent capables de sentir les odeurs, même si les réponses étaient variables et majoritairement reliées à une fonction écologique (Abankwah, Deeming & Pike, 2020). Par exemple, il a été établi que les oiseaux utilisent leur odorat pour la quête de nourriture (Amo & Saavedra, 2021; Potier et al., 2019; Stager, 1964, Mahr, 2022), l'orientation (Nevitt & Bonadonna, 2005; Grubb, 1979), l'élevage des petits (Whittaker et al., 2009; Petit et al., 2002), ainsi que la reconnaissance des pairs et le choix d'un partenaire sexuel (Whittaker et al., 2011). La réponse comportementale des oiseaux aux odeurs de

prédateurs a fait l'objet d'un nombre croissant d'études au cours des dernières décennies. Il a été démontré que les oiseaux sont capables de détecter des signaux chimiques de prédateurs durant la reproduction (Amo et al., 2008), leurs déplacements (Mahr et al., 2022) et la quête de nourriture (Roth II, Cox & Lima, 2008). De manière générale, les oiseaux ont des réactions négatives face à des odeurs inconnues, qu'elles soient associées à un danger réel ou non (Jones, Facchin, & McCorquodale, 2002; Amo et al., 2008; Roth II, Cox & Lima, 2008; Ekner & Tryjanowski, 2008; Zidar & Løvlie, 2012). En outre, la détection des odeurs de prédateurs serait innée chez les oiseaux, du moins chez la mésange charbonnière (*Parus major*; Amo et al., 2011), et le poulet domestique (*Gallus gallus domesticus*; Fluck et al., 1996; Zidar & Løvlie, 2012). D'autres études ont toutefois noté une absence de réponse comportementale en présence d'une odeur de prédateur. Par exemple, le merlebleu de l'Est (*Sialia sialis*; Godard et al., 2007) et le troglodyte familier (*Troglodytes aedon*; Johnson, Murphy & Parrish, 2011) n'ont pas modifié leurs activités après l'application d'une odeur de prédateur dans leurs nichoirs. Une étude récente a évalué la réponse des oiseaux en présence d'urine de lynx roux (*Lynx rufus*), dans un contexte de quête alimentaire en milieu semi-naturel (Dotta, Yaman & Huynh, 2024). Les chercheurs ont observé à l'échelle de la communauté une activité d'alimentation plus faible, mais non significative statistiquement, aux dispositifs traités avec de l'urine par rapport aux dispositifs témoins. Puisqu'ils n'ont pas identifié les différentes espèces ayant réagi à leurs dispositifs, la nature et l'ampleur des réponses interspécifiques demeurent inconnues (Dotta, Yaman & Huynh, 2024).

La probabilité qu'un oiseau détecte une odeur de prédateur en milieu naturel, sans égard aux conditions environnementales, dépendra de trois principaux facteurs : les capacités olfactives, la distance avec la source odorante, ainsi que le type et l'intensité de l'odeur. Quelques travaux se sont par ailleurs intéressés aux liens entre un surinvestissement dans les capacités olfactives et l'écologie des espèces d'oiseaux. Wenzel (1987) a publié l'un des premiers articles soulignant que les différences dans la taille du cornet nasal dans le bec et la taille du bulbe olfactif dans le cerveau étaient liées aux capacités olfactives des espèces. D'autres travaux ont montré que la taille du cornet nasal était fortement corrélée à la superficie de l'épithélium olfactif ainsi qu'au volume

du bulbe olfactif, trois structures essentielles au sens de l'olfaction (p. ex. Clark, Hagelin & Werner, 2014). Il est donc attendu que les espèces d'oiseaux qui surinvestissent dans la longueur du cornet nasal détectent les signaux olfactifs avec une plus grande acuité relative (Proulx et al., en préparation). La proximité d'un organisme à une source d'odeur dépend de son utilisation du territoire. Par exemple, les oiseaux de plus petite taille ont un territoire d'alimentation plus restreint (Ottaviani et al., 2006, Schoener, 1968) et y effectuent un plus grand nombre d'excursions de quête alimentaire en raison de leur taux métabolique spécifique plus élevé (McNab, 1988), ce qui les rend d'autant plus vulnérables à la prédation (DeGregorio et al., 2016). Enfin, la prédation des nids constitue l'une des principales sources d'échec reproductif pour de nombreux organismes, dont plusieurs passereaux (Ricklefs, 1969). De manière générale, les nids situés directement au sol sont plus vulnérables à la prédation que les nids se trouvant parmi de la végétation dense, ou que les nids installés dans des cavités (Bandeira & Morante-Filho, 2024; DeGregorio et al., 2016; Ricklefs, 1969). Avant la construction de leur nid, les oiseaux peuvent évaluer l'abondance des prédateurs soit par l'écoute et l'observation pour les prédateurs aviaires, soit par la détection visuelle ou olfactive de fèces et d'urine pour les mammifères prédateurs (Deeming & Reynolds, 2015). Les oiseaux tendent généralement à réagir aux risques de prédation perçus en choisissant des sites de nidification jugés moins vulnérables (Deeming & Reynolds, 2015). Fontaine et Martin (2006) ont observé qu'en réponse à la prédation ou au risque de prédation, les parents produisent parfois des couvées plus petites et le nombre de visites au nid pour nourrir la femelle en couvaison ou les oisillons est souvent restreint. L'ensemble de ces facteurs est susceptible de moduler la réponse des oiseaux face aux odeurs de prédateurs.

Nous avons réalisé une expérience *in situ* d'application répétée d'urine de lynx roux pendant la période de nidification des oiseaux au Parc national de la Mauricie (PNLM), un milieu naturel protégé où la communauté d'oiseaux chanteurs est diversifiée. L'activité acoustique de 45 espèces d'oiseaux a été analysée au cours de cette période dans des sites avec application d'urine appariés à des sites sans application. L'objectif était d'évaluer si : 1) l'activité acoustique des oiseaux nicheurs forestiers est modifiée par une manipulation du paysage olfactif; 2) l'amplitude de la réponse des espèces face au paysage

olfactif manipulé s'explique par des traits associés aux capacités olfactives et à l'utilisation du territoire.

Nous posons l'hypothèse que l'activité acoustique en présence d'urine sera plus faible chez les espèces dont les capacités olfactives sont surreprésentées en comparaison avec leurs capacités visuelles (c.-à-d. fort ratio de la distance œil-narine sur le diamètre de l'œil). En complément, nous prédisons que la réponse des espèces sera modulée par des caractéristiques qui influencent la probabilité d'entrer en contact avec l'odeur de prédateur, telles que la taille du territoire d'alimentation en période de nidification et la position du nid dans les strates forestières. Un petit territoire d'alimentation et un nid près du sol devraient être associés à une plus faible activité acoustique en présence de l'odeur d'urine de prédateur.

2.4 Méthodes

2.4.1 Dispositif expérimental

L'expérience a été menée au PNLM, une aire protégée créée en 1970 et située à environ 50 km au nord de Trois-Rivières (Québec, Canada). Le parc est recouvert à 93 % d'une forêt mixte composée de conifères et de feuillus et s'étend sur une superficie de 536 km² (Parcs Canada, 2023). Le PNLM présente un climat continental humide sans saison sèche et est classé comme tempéré (Parcs Canada, 2010). La température moyenne en mai et en juin s'étend de 11,9 °C à 17 °C et les précipitations annuelles totales avoisinent les 1 000 mm (MELCCFP, 2025). Le PNLM compte 150 lacs et accueille chaque année environ 200 000 visiteurs (Parcs Canada, 2023).

Dans la portion sud-est du parc (46.65255, -72.84689), à proximité du lac à la Pêche, nous avons établi un total de cinq paires de sites forestiers, chacune située dans un peuplement forestier homogène (Annexe A). Chaque paire de sites comprend un site expérimental (1A-5A) au paysage olfactif modifié et un site témoin (1B-5B). La distance entre les sites appariés au sein d'un peuplement était de 110-160 m pour maximiser leurs similitudes tout en minimisant les détections croisées. Cette plage de distance est

acceptable puisque 95 % des individus sont détectés dans un rayon de 125 m autour d'un point d'écoute (Ralph, Droege & Sauer, 1995).

Le dispositif expérimental était constitué de cinq piquets de bois de pin de 5 cm de largeur et de 92 cm de hauteur enfoncés d'environ 20 cm dans le sol. Un piquet se trouvait au centre et les quatre autres se situaient à 20 m du centre en direction des quatre points cardinaux (nord, sud, est, ouest) (Figure 5). Une bande de coton blanc de 30 cm sur 60 cm était nouée à chaque piquet, à environ 30 cm au-dessus du sol. Une assiette en plastique transparent de 30 cm de diamètre était fixée sur le dessus du piquet afin de protéger le coton des intempéries. Des dispositifs identiques ont été installés dans les sites témoins pour éviter un effet visuel confondant.

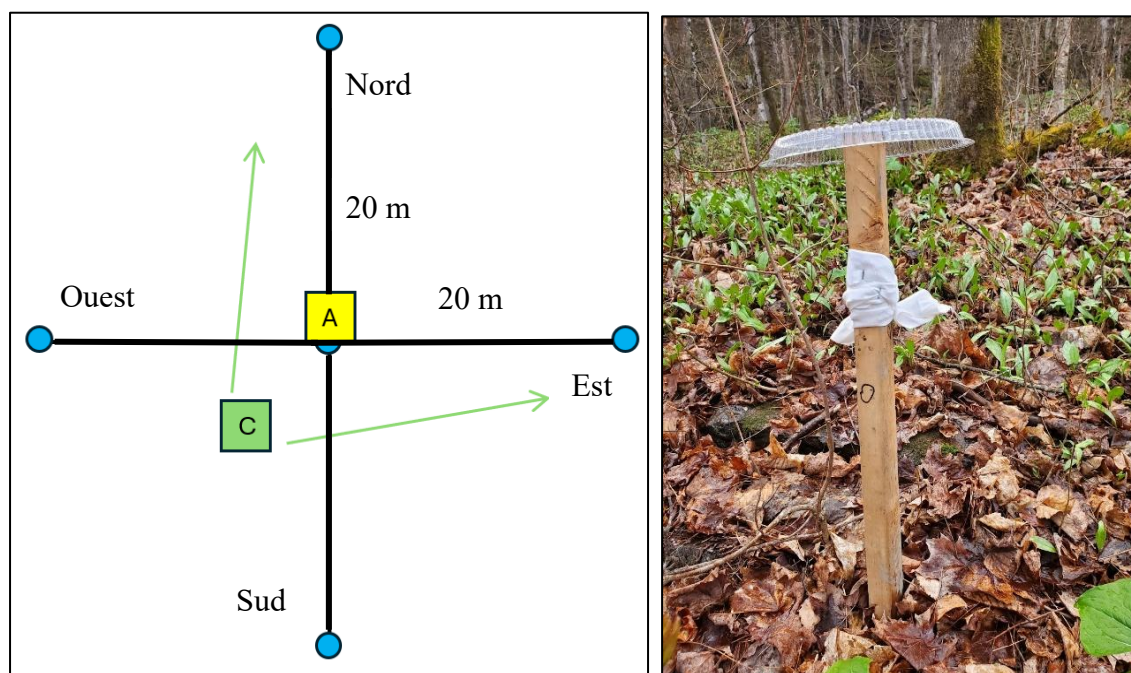


Figure 5 À gauche : vue schématique en plongée du dispositif expérimental d'un site montrant l'emplacement des cinq piquets (cercles bleus), de l'enregistreur audio (A) et du champ de vision approximatif de la caméra (C). À droite : un exemple de piquet du dispositif expérimental.

Nous avons modifié le paysage olfactif des sites 1A à 5A en appliquant de l'urine de lynx roux pour simuler la présence d'un prédateur de la sous-famille des Felinae et dont l'urine contient de la félinine. L'urine de félins en particulier est reconnue pour

déclencher des réactions négatives chez les petits mammifères, comme une paralysie temporaire, un état de vigilance accrue et des avortements spontanés (Voznessenskaya, 2014). Les sites 1B à 5B ont servi de stations témoins. Le lynx roux est naturellement absent du PNLM (MFFP, 2017), ce qui a permis de réduire les phénomènes d'habituation et le risque d'attirer des représentants de l'espèce prédatrice. Nous avons installé les dispositifs expérimentaux le 1^{er} mai 2024, c'est-à-dire dès que le terrain a été praticable après la fonte de la neige. L'application d'urine a commencé le 10 mai et s'est terminée le 18 juin. Cette période couvre l'arrivée des oiseaux nicheurs dans la zone d'étude ainsi que le début de la nidification pour la majorité des espèces d'oiseaux forestiers. Les visites d'application d'urine duraient moins de 15 minutes par site et ont eu lieu en dehors des heures d'enregistrement pour ne pas interférer avec les écoutes. Nous avons effectué un total de treize visites d'application d'urine sur six semaines, pour une moyenne de 2,16 visites/semaine, en évitant les journées de fortes précipitations. Sur la bande de coton de chacun des cinq piquets d'un site manipulé, nous avons appliqué 25 mL d'urine au moyen d'une seringue, pour un total de 125 mL par visite, par site. La quantité d'urine appliquée à un site a été déterminée à partir de la distance quotidienne de déplacement du lynx roux (Bailey, 1974; Kamler & Gipson, 2000; ICWDM, 2024) ainsi que de sa biologie et sa production quotidienne d'urine (Yang et al., 2014) (Annexe C). Cette espèce marque son territoire principalement en urinant et est connue pour revenir aux mêmes sites (IELC, 2024; MacDonald, 1980). L'odeur d'urine était modérément perceptible sur place par l'humain après l'application.

Un enregistreur audio BAR-LT (Frontier Labs, Brisbane, Australie) doté d'un microphone omnidirectionnel 20 dB de classe A (de 80 Hz à 20 KHz) orienté vers le bas a été installé à hauteur de poitrine sur l'arbre le plus près du centre du dispositif expérimental. Les enregistreurs ont été programmés afin d'enregistrer 3 minutes toutes les 30 minutes, de 5 h à 10 h inclusivement, pour une durée cumulée de 33 minutes réparties sur 11 clips audios par jour et par site. L'expérience s'est déroulée sur 42 jours d'enregistrement (du 10 mai au 20 juin inclusivement), ce qui a produit un total de 4 620 clips audios. Seules les journées d'enregistrements obtenues sous des conditions météorologiques favorables (c.-à-d. absence de bruits de pluie et de vents forts qui

masquent les chants) ont été conservées aux fins d'identification des oiseaux. Finalement, les enregistrements de 10 journées (1 100 clips audios) réparties sur les 6 semaines de l'expérience ont été analysés. Les journées suivant les visites d'application d'urine ont été retenues en priorité lorsque les critères de conditions météorologiques étaient respectés.

Une caméra FLEX G-36 (SpyPoint, Victoriaville, Canada), en mode de déclenchement automatique 24 h/24, 7 j/7, a été installée sur un arbre face au piquet central afin de documenter la fréquentation du site par les animaux sauvages, incluant des prédateurs potentiels. Les paramètres de la caméra étaient les suivants : déclenchement activé au mouvement, délai minimal de 10 s entre les photographies, et sensibilité du capteur réglée à « moyenne ». Le nombre de photographies de différentes espèces de mammifères a été consigné pour chaque site sur l'ensemble de la période d'étude (du 10 mai au 20 juin).

Le 22 juillet 2024, nous avons caractérisé la structure et la composition forestière des sites. En suivant le protocole proposé par Martin & Proulx (2016) à l'aide d'une caméra numérique EOS Digital Rebel XS (Canon Inc., Tokyo, Japon), nous avons pris des photographies à chaque site depuis le centre vers les quatre points cardinaux à l'horizontale et à 45° d'inclinaison vers la canopée. Les paramètres de la caméra étaient définis comme suit : distance focale de 15 mm, ouverture f/6.3, ISO 800, mise au point automatique, évaluation multizone de l'exposition (Martin & Proulx, 2016). Un coefficient de verdoisement (photographies à l'horizontale) et un indice de recouvrement foliaire (photographies à 45°) ont été calculés sur les images à partir de fonctions R développées par Martin & Proulx (2016) (github.com/cmartin/ImageAnalysisPrimer). La dominance du peuplement forestier à chaque site a également été inventoriée en consignant les essences d'arbres d'un diamètre supérieur à 9 cm par la méthode des quadrants centrés sur un point (Cottam & Curtis, 1956). Les quadrants nord-est, nord-ouest, sud-ouest et sud-est étaient délimités par la projection des tiges d'une croix centrée sur un piquet du dispositif expérimental. Nous avons identifié l'essence de l'arbre le plus près du piquet dans chaque quadrant, pour un total de 20 arbres par site (4 quadrants x

5 piquets). La fréquence de détection des différentes essences à chaque site a permis d'évaluer la similitude en composition des peuplements entre les sites appariés.

2.4.2 Activité acoustique des espèces

Pour estimer l'activité acoustique, toutes les espèces d'oiseaux entendues (chants, cris, battement d'ailes caractéristiques, tambourinage) dans chaque clip audio de trois minutes ont été identifiées. Les clips audios ont été visualisés dans Audacity 3.6.4 à l'aide de la fonction « spectrogram » (Audacity Team, 2024). Pour identifier les espèces, nous avons utilisé les sonogrammes et les chants de référence du *Peterson guide to bird songs* (Pieplow, 2017) et de la MaCaulay Library (Cornell University, 2023) sur le portail du Cornell Lab of Ornithology (<https://academy.allaboutbirds.org>) ainsi que des applications Merlin Bird ID v3.5.2 (The Cornell Lab of Ornithology, 2023) et Sibley Birds v2 (2019). Les clips audios ont été écoutés et visualisés au laboratoire par la première auteure de cet article (J.B.). Une cote de distance a été attribuée à chaque espèce selon le chant entendu le plus près du microphone dans chaque clip : 1) présence estimée à l'intérieur d'un rayon de 50 m du microphone; 2) présence estimée dans un rayon de 100 m du microphone; 3) présence estimée au-delà d'un rayon de 100 m du microphone. Les détections avec une cote de distance de « 3 » ont été retirées des analyses subséquentes afin de réduire les risques de détections croisées avec le site apparié.

Un total de 71 espèces ont été identifiées au cours des dix journées d'enregistrement sélectionnées (Annexe B). Les occurrences acoustiques de chacune de ces espèces sur les clips audios ont été additionnées à travers l'ensemble des journées et des sites pour obtenir une mesure d'activité acoustique par niveau de traitement (avec ou sans application d'urine). Nous avons calculé la probabilité d'activité acoustique en divisant le total des occurrences par la valeur théorique maximale de 550 (c.-à-d. 10 journées x 11 clips audios x 5 sites = 550).

Les espèces retenues pour nos analyses devaient être susceptibles de nicher dans la zone d'étude. Cette information a été vérifiée à l'aide du *Deuxième Atlas des oiseaux nicheurs du Québec méridional* (Robert, Hachey, Lepage & Couturier, 2019). Les espèces

ne présentant pas de potentiel de nidification dans la zone d'étude, les oiseaux de proie, les espèces non reconnues pour exercer la majorité de leurs activités en forêt, les espèces ne pouvant pas facilement être identifiées à l'espèce au chant et les espèces avec moins de quatre occurrences acoustiques totales sur l'ensemble de la période d'étude ont été retirées de la liste. Enfin, le moucherolle tchébec (*Empidonax minimus*) a été éliminé parce qu'une majorité des événements acoustiques recensés pour cette espèce étaient fort probablement des cris répétés associés à son caractère très territorial (Davis, 1959; Sheard et al., 2020). En effet, les moucherolles tchébecs mâles défendent agressivement de petits territoires de reproduction qui se chevauchent en partie (Davis, 1959).

2.4.3 Traits sensoriels et utilisation du territoire

Nous avons mesuré la distance œil-narine (mm) et le diamètre transversal de l'œil (mm) d'un spécimen en peau ou naturalisé de chacune des 283 espèces nicheuses du Québec au vernier électronique à partir de la collection d'oiseaux du Campus du patrimoine naturel du Musée canadien de la nature, à Gatineau (Canada) (Proulx et al., en préparation). La distance œil-narine réfère à la mesure en ligne droite entre la commissure interne de l'œil et le coin interne proximal de la narine du même côté. Cette distance permet d'estimer la longueur du cornet nasal et est fortement corrélée à la taille du bulbe olfactif chez les oiseaux (Proulx et al., en préparation). Le diamètre transversal de l'œil des oiseaux est un trait utilisé dans la littérature comme indicateur de l'acuité visuelle (Caves, Brandley & Johnsen, 2018; Kiltie, 2000). Comme ces deux traits covarient positivement avec la taille corporelle, le ratio de la distance œil-narine sur le diamètre transversal de l'œil a été calculé afin de générer une variable représentant, d'un côté, le surinvestissement relatif dans un trait associé à l'olfaction (ratios élevés), et de l'autre, le surinvestissement relatif dans un trait associé à la vision (ratios faibles).

Nous avons déterminé la masse moyenne des espèces à partir d'une base de données en libre accès (Dunning Jr, 2007). Ces valeurs de masse corporelle (M ; g) ont été transformées en superficie du territoire d'alimentation en période de nidification (T ; ha) à l'aide d'une équation empirique développée pour les oiseaux forestiers d'Amérique du Nord (Schoener, 1968) : $T = 0,03 M^{1,2}$ ($n = 0$; $R^2 = 0,8$). Une position du nid dans la strate

forestière, soit herbacée, arbustive, arborée ou cavité, a été assignée à chaque espèce à partir de De Graaf, Tilghman & Anderson (1985) et de la plateforme Birds of the World (2025) du Cornell Laboratory of Ornithology.

2.5 Analyses statistiques

Nous avons évalué si les paires de sites au sein d'un même peuplement forestier étaient similaires en composition et en structure forestière entre les traitements (avec ou sans application d'urine). Un modèle mixte avec effet aléatoire sur l'identifiant du peuplement (identifiants n^{os} 1 à 5 comme variables d'appariement) a été appliqué séparément aux données de verdoiment et de recouvrement foliaire, ainsi qu'à la fréquence d'arbres pour chacune des trois essences dominantes : l'érable à sucre (*Acer saccharum*), le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis*) et le hêtre à grandes feuilles (*Fagus grandifolia*). Nous avons également appliqué ce test au nombre de détections de mammifères par les caméras. Les modèles ont été évalués à l'aide de la fonction « lmer » de la librairie R *lme4* (Bates et al., 2015). Les statistiques z et les valeurs probabilistes p associées ont été obtenues à l'aide de la librairie *lmerTest* (Kuznetsova et al., 2017).

Une approche méta-analytique a été mobilisée afin d'évaluer l'effet de l'application d'urine sur la probabilité d'activité acoustique des espèces forestières nicheuses, à l'échelle de l'espèce et de la communauté. Cette approche considère que chaque espèce contribue à une réalisation de l'expérience après ajustement d'un modèle avec correction phylogénétique et variables modératrices. Les valeurs d'activité acoustique pour chaque espèce et chaque niveau de traitement ont servi à calculer le logarithme du ratio d'incidence (logOR), ainsi que l'erreur associée, avec la fonction « escalc » de la librairie R *metafor* (Viechtbauer, 2010) : $\log\text{OR} = \log(p/(1-p))$, où p est la probabilité de détecter un événement acoustique. Comme l'erreur du ratio d'incidence est inversement proportionnelle à la valeur théorique maximale d'activité acoustique (550), nous avons dû l'ajuster afin de considérer la dépendance statistique entre les clips audios. La dépendance spatiale a été prise en considération dans le dispositif expérimental par l'appariement des sites avec et sans application d'urine. La méthode du seuil latent (*latent threshold*) a été utilisée pour tenir compte de la dépendance temporelle des clips à l'intérieur d'une même

journée. Un coefficient de corrélation intraclasse (ICC) a été calculé pour les valeurs d'activité acoustique (Devine et al., 2024) correspondant au ratio de la variance associée au terme « journée » dans un modèle de régression avec effets aléatoires sur la variance totale (Zhang, Bujkiewicz & Jackson, 2024).

Afin de vérifier si la communauté d'oiseaux était globalement affectée par la manipulation du paysage olfactif, nous avons ajusté un modèle de méta-analyse à effets aléatoires avec modérateurs aux ratios d'incidence (logOR) des espèces à l'aide de la fonction *rma.mv* de la librairie R *metafor* (Viechtbauer, 2010). Nous avons ajouté les trois variables modératrices suivantes au modèle afin d'évaluer leur influence sur les logOR des espèces : le ratio de la distance œil-narine sur le diamètre de l'œil (mm/mm), la taille du territoire d'alimentation en période de nidification (ha) et la position du nid dans la strate forestière (herbacée, arbustive, arborée ou cavité). La variable de la taille du territoire a été transformée en log et recentrée afin que le point d'interception du modèle soit estimé à une valeur réaliste de 0,1 ha : $\log(\text{taille_ha}) = \log(\text{taille_ha} - 0,1)$. Un codage de type contraste somme-à-zéro a été appliqué à la variable « position du nid » afin que l'intercepte du modèle soit à la moyenne des catégories, et son influence a été testée à l'aide de la fonction *anova.rma* (test de Wald; statistique Q_{WT}). Enfin, un effet aléatoire de la famille imbriquée sous l'ordre ($\sim 1 \mid \text{ordre/famille}$) a été inséré afin de modéliser la variance associée à la proximité phylogénétique.

2.6 Résultats

2.6.1 Dispositif expérimental

La principale essence d'arbres identifiée aux sites d'étude est l'érable à sucre ($n = 137$), suivie par le hêtre à grandes feuilles ($n = 25$) et le bouleau jaune ($n = 17$) (Annexe A). Les variables de structure du peuplement ne présentent pas de différences notables entre les traitements au sein d'une même paire de sites, tant pour le coefficient de verdoisement ($n = 40$, $t = 1,93$, $p = 0,07$) que pour l'indice de recouvrement foliaire ($n = 40$, $t = 0,35$, $p = 0,73$). De même, les variables associées à la composition forestière ne montrent pas de différence entre les traitements appariés : érable rouge ($n = 50$,

$t = -0,25$, $p = 0,79$), hêtre à grandes feuilles ($n = 50$, $t = 1,41$, $p = 0,16$), bouleau jaune ($n = 50$, $t = 0,72$, $p = 0,47$). Les autres espèces retrouvées dans une moindre mesure ou dans un nombre restreint de sites sont la pruche du Canada (*Tsuga canadensis*; $n = 7$), le tilleul d'Amérique (*Tilia americana*; $n = 6$), le bouleau blanc (*Betula papyrifera*; $n = 4$), l'ostryer de Virginie (*Ostrya virginiana*; $n = 1$), l'érable noir (*Acer nigrum*; $n = 1$), le frêne noir (*Fraxinus nigra*; $n = 1$) et le peuplier à grandes dents (*Populus grandidentata*; $n = 1$).

L'utilisation de pièges photographiques nous a permis de recenser sept espèces de mammifères sur la totalité de l'expérience (Annexe A). Le modèle linéaire à effet mixte ne relevait aucune différence dans la fréquence d'observation des mammifères entre les traitements d'une même paire de sites ($n = 10$, $t = -0,28$, $p = 0,79$). Le cerf de Virginie (*Odocoileus virginianus*) et le raton laveur (*Procyon lotor*) ont été observés régulièrement aux deux types de sites. Les autres espèces observées de manière anecdotique sont l'orignal (*Alces alces*), l'ours noir (*Ursus americanus*), le renard roux (*Vulpes vulpes*), la martre d'Amérique (*Martes americana*) et l'écureuil roux (*Tamiasciurus hudsonicus*).

2.6.2 Activité acoustique des espèces

Nous avons évalué l'effet de l'application d'urine de lynx roux sur l'activité acoustique des espèces d'oiseaux en période de nidification. Nous avons identifié un total de 71 espèces d'oiseaux sur les enregistrements acoustiques (Annexe B). Sur un total de 5118 événements acoustiques détectés, nous avons identifié 45 espèces d'oiseaux qui répondaient à l'ensemble des critères de sélection identifiés précédemment (Tableau 1).

Tableau 1 Noms scientifiques, noms communs, codes à quatre lettres, phylogénie et mesures de traits physiques pour les 45 espèces de la communauté d'oiseaux étudiés.

| Nom latin | Espèce | Code | Famille | Ordre | Masse (g) | Diamètre de l'œil (mm) | Distance œil-narine (mm) | Ratio |
|----------------------------------|----------------------------|------|---------------|-----------------|-----------|------------------------|--------------------------|---------|
| <i>Aegolius acadicus</i> | Petite Nyctale | PENY | Strigidae | Strigiformes | 77,40 | 9,87 | 9,83 | 1,00407 |
| <i>Agelaius phoeniceus</i> | Carouge à épaulettes | CAEP | Icteridae | Passériformes | 65,30 | 7,17 | 5,13 | 1,39766 |
| <i>Archilochus colubris</i> | Colibri à gorge rubis | COGR | Trochilidae | Apodiformes | 2,90 | 5,58 | 3,52 | 1,58523 |
| <i>Bombycilla cedrorum</i> | Jaseur d'Amérique | JAAM | Bombycillidae | Passériformes | 30,60 | 9,86 | 5,05 | 1,95248 |
| <i>Bonasa umbellus</i> | Gélinotte huppée | GEHU | Phasianidae | Galliformes | 566,00 | 14,07 | 9,49 | 1,48261 |
| <i>Branta canadensis</i> | Bernache du Canada | BECA | Anatidae | Anseriformes | 3814,00 | 44,24 | 14,01 | 3,15774 |
| <i>Bubo virginianus</i> | Grand-duc d'Amérique | GRDA | Strigidae | Strigiformes | 1154,00 | 24,14 | 17,14 | 1,40840 |
| <i>Buteo lineatus</i> | Buse à épaulettes | BUEP | Accipitridae | Accipitriformes | 544,00 | 17,94 | 15,08 | 1,18966 |
| <i>Buteo platypterus</i> | Petite Buse | PEBU | Accipitridae | Accipitriformes | 420,00 | 19,86 | 13,56 | 1,46460 |
| <i>Cardellina canadensis</i> | Paruline du Canada | PACA | Parulidae | Passériformes | 10,30 | 8,26 | 4,65 | 1,77634 |
| <i>Catharus fuscescens</i> | Grive fauve | GRFA | Turdidae | Passériformes | 31,90 | 9,91 | 5,94 | 1,66835 |
| <i>Catharus guttatus</i> | Grive solitaire | GRSO | Turdidae | Passériformes | 30,10 | 11,10 | 6,91 | 1,60637 |
| <i>Catharus ustulatus</i> | Grive à dos olive | GRDO | Turdidae | Passériformes | 30,30 | 12,79 | 6,71 | 1,90611 |
| <i>Certhia americana</i> | Grimpereau brun | GRBR | Certhiidae | Passériformes | 8,10 | 5,96 | 3,14 | 1,89809 |
| <i>Coccyzus erythrophthalmus</i> | Coulicou à bec noir | COBN | Cuculidae | Cuculiformes | 50,90 | 10,69 | 8,73 | 1,22451 |
| <i>Colaptes auratus</i> | Pic flamboyant | PIFL | Picidae | Piciformes | 128,00 | 15,57 | 7,64 | 2,03796 |
| <i>Contopus virens</i> | Pioui de l'Est | PIES | Tyrannidae | Passériformes | 13,90 | 11,05 | 5,18 | 2,13320 |
| <i>Corthylio calendula</i> | Roitelet à couronne rubis | ROCR | Regulidae | Passériformes | 6,50 | 7,16 | 3,53 | 2,02833 |
| <i>Corvus brachyrhynchos</i> | Corneille d'Amérique | COAM | Corvidae | Passériformes | 538,00 | 22,00 | 9,88 | 2,22672 |
| <i>Corvus corax</i> | Grand Corbeau | GRCB | Corvidae | Passériformes | 785,00 | 34,66 | 12,70 | 2,72913 |
| <i>Cyanocitta cristata</i> | Geai bleu | GEBL | Corvidae | Passériformes | 273,00 | 15,62 | 8,76 | 1,78311 |
| <i>Dryobates pubescens</i> | Pic mineur | PIMI | Picidae | Piciformes | 27,50 | 7,81 | 4,31 | 1,81206 |
| <i>Dryobates villosus</i> | Pic chevelu | PICH | Picidae | Piciformes | 70,00 | 10,03 | 5,46 | 1,83700 |
| <i>Dryocopus pileatus</i> | Grand Pic | GRPI | Picidae | Piciformes | 308,00 | 23,01 | 10,31 | 2,23181 |
| <i>Empidonax flaviventris</i> | Moucherolle à ventre jaune | MOVJ | Tyrannidae | Passériformes | 11,80 | 9,96 | 5,22 | 1,90805 |
| <i>Empidonax minimus</i> | Moucherolle tchébec | MOTC | Tyrannidae | Passériformes | 10,00 | 8,32 | 4,65 | 1,78925 |
| <i>Geothlypis philadelphia</i> | Paruline triste | PATR | Parulidae | Passériformes | 12,00 | 8,49 | 3,99 | 2,12782 |
| <i>Haemorhous purpureus</i> | Roselin pourpré | ROPO | Fringillidae | Passériformes | 23,30 | 7,35 | 5,10 | 1,44118 |
| <i>Leiostyris peregriina</i> | Paruline obscure | PAOB | Parulidae | Passériformes | 8,90 | 6,64 | 3,85 | 1,72468 |
| <i>Leiostyris ruficapilla</i> | Paruline à joues grises | PAJG | Parulidae | Passériformes | 8,30 | 5,94 | 3,77 | 1,57560 |
| <i>Megascops asio</i> | Petit-duc maculé | PEDM | Strigidae | Strigiformes | 167,00 | 15,85 | 14,17 | 1,11856 |
| <i>Melospiza melodia</i> | Bruant chanteur | BRCH | Passerellidae | Passériformes | 20,50 | 6,78 | 4,26 | 1,59155 |

| Nom latin | Espèce | Code | Famille | Ordre | Masse (g) | Diamètre de l'œil (mm) | Distance œil-narine (mm) | Ratio |
|---------------------------------|-----------------------------|------|---------------|---------------|-----------|------------------------|--------------------------|---------|
| <i>Mniotilta varia</i> | Paruline noir et blanc | PANB | Parulidae | Passériformes | 10,90 | 8,23 | 3,84 | 2,14323 |
| <i>Parkesia noveboracensis</i> | Paruline des ruisseaux | PARU | Parulidae | Passériformes | 16,30 | 8,37 | 4,57 | 1,83151 |
| <i>Pheucticus ludovicianus</i> | Cardinal à poitrine rose | CAPR | Cardinalidae | Passériformes | 42,00 | 10,42 | 7,05 | 1,47801 |
| <i>Piranga olivacea</i> | Piranga écarlate | PIEC | Cardinalidae | Passériformes | 28,20 | 9,64 | 6,30 | 1,53016 |
| <i>Poecile atricapillus</i> | Mésange à tête noire | METN | Paridae | Passériformes | 10,80 | 5,02 | 3,68 | 1,36413 |
| <i>Quiscalus quiscula</i> | Quiscale bronzé | QUBR | Icteridae | Passériformes | 120,00 | 14,11 | 8,00 | 1,76375 |
| <i>Regulus satrapa</i> | Roitelet à couronne dorée | ROCD | Regulidae | Passériformes | 6,30 | 6,33 | 3,12 | 2,02885 |
| <i>Sayornis phoebe</i> | Moucherolle phébi | MOPH | Tyrannidae | Passériformes | 19,70 | 12,04 | 5,35 | 2,25047 |
| <i>Seiurus aurocapilla</i> | Paruline couronnée | PACO | Parulidae | Passériformes | 18,80 | 8,99 | 4,97 | 1,80885 |
| <i>Setophaga americana</i> | Paruline à collier | PACL | Parulidae | Passériformes | 7,70 | 5,26 | 4,22 | 1,24645 |
| <i>Setophaga caerulescens</i> | Paruline bleue | PABL | Parulidae | Passériformes | 10,50 | 7,30 | 4,38 | 1,66667 |
| <i>Setophaga castanea</i> | Paruline à poitrine baie | PAPB | Parulidae | Passériformes | 11,80 | 7,29 | 5,07 | 1,43787 |
| <i>Setophaga coronata</i> | Paruline à croupion jaune | PACJ | Parulidae | Passériformes | 12,20 | 9,06 | 3,98 | 2,27638 |
| <i>Setophaga fusca</i> | Paruline à gorge orangée | PAGO | Parulidae | Passériformes | 10,00 | 7,23 | 4,44 | 1,62838 |
| <i>Setophaga magnolia</i> | Paruline à tête cendrée | PATC | Parulidae | Passériformes | 8,40 | 7,93 | 4,41 | 1,79819 |
| <i>Setophaga pensylvanica</i> | Paruline à flancs marron | PAFM | Parulidae | Passériformes | 9,50 | 6,69 | 3,79 | 1,76517 |
| <i>Setophaga ruticilla</i> | Paruline flamboyante | PAFL | Parulidae | Passériformes | 8,40 | 7,04 | 3,89 | 1,80977 |
| <i>Setophaga virens</i> | Paruline à gorge noire | PAGN | Parulidae | Passériformes | 8,90 | 7,46 | 4,38 | 1,70320 |
| <i>Sitta canadensis</i> | Sittelle à poitrine rousse | SIPR | Sittidae | Passériformes | 9,80 | 8,15 | 3,70 | 2,20270 |
| <i>Sitta carolinensis</i> | Sittelle à poitrine blanche | SIPB | Sittidae | Passériformes | 21,00 | 8,39 | 5,52 | 1,51993 |
| <i>Sphyrapicus varius</i> | Pic maculé | PIMA | Picidae | Piciformes | 52,00 | 10,34 | 4,76 | 2,17227 |
| <i>Spinus pinus</i> | Tarin des pins | TAPI | Fringillidae | Passériformes | 12,70 | 4,13 | 3,03 | 1,36304 |
| <i>Spinus tristis</i> | Chardonneret jaune | CHJA | Fringillidae | Passériformes | 13,10 | 6,30 | 3,52 | 1,78977 |
| <i>Strix varia</i> | Chouette rayée | CHRA | Strigidae | Strigiformes | 632,00 | 22,52 | 20,25 | 1,11210 |
| <i>Sturnus vulgaris</i> | Étourneau sansonnet | ETSA | Sturnidae | Passériformes | 87,60 | 11,76 | 6,29 | 1,86963 |
| <i>Tachycineta bicolor</i> | Hirondelle bicolore | HIBI | Hirundinidae | Passériformes | 21,20 | 7,38 | 3,94 | 1,87310 |
| <i>Thryothorus ludovicianus</i> | Troglodyte de Caroline | TRCA | Troglodytidae | Passériformes | 17,20 | 8,64 | 4,86 | 1,77778 |
| <i>Troglodytes hiemalis</i> | Troglodyte des forêts | TRFO | Troglodytidae | Passériformes | 8,90 | 7,53 | 4,02 | 1,87313 |
| <i>Turdus migratorius</i> | Merle d'Amérique | MEAM | Turdidae | Passériformes | 78,50 | 13,66 | 6,55 | 2,08550 |
| <i>Vireo gilvus</i> | Viréo mélodieux | VIME | Vireonidae | Passériformes | 13,50 | 7,80 | 4,73 | 1,64905 |
| <i>Vireo olivaceus</i> | Viréo aux yeux rouges | VIYR | Vireonidae | Passériformes | 16,80 | 10,34 | 5,42 | 1,90775 |
| <i>Vireo solitarius</i> | Viréo à tête bleue | VITB | Vireonidae | Passériformes | 15,30 | 8,55 | 5,76 | 1,48438 |
| <i>Zenaida macroura</i> | Tourterelle triste | TOTR | Columbidae | Passériformes | 123,00 | 15,84 | 7,36 | 2,15217 |

La méthode du seuil latent a été utilisée pour tenir compte de la dépendance temporelle des clips audios à l'intérieur d'une même journée. Le nombre maximal de détections d'événements acoustiques pour chaque espèce était de 550. L'ICC obtenu par la méthode du seuil latent était de 0,013, ce qui abaisse la valeur maximale d'activité acoustique pour les dix jours d'enregistrements à 485. En conséquence, toutes les valeurs d'activité acoustique ont été ajustées relativement à ce seuil. Les valeurs de logOR des espèces demeurent inchangées à la suite de cette procédure, mais les erreurs types augmentent.

Les six espèces que nous avons entendues le plus fréquemment représentent à elles seules près de la moitié de ces événements acoustiques ($n = 2\ 608$) : paruline couronnée (*Seiurus aurocapilla*; PACO), viréo aux yeux rouges (*Vireo olivaceus*; VIYR), paruline bleue (*Setophaga caerulescens*; PABL), paruline à gorge noire (*Setophaga virens*; PAGN), grive fauve (*Catharus fuscescens*; GRFA) et gélinotte huppée (*Bonasa umbellus*; GEHU) (Figure 6).

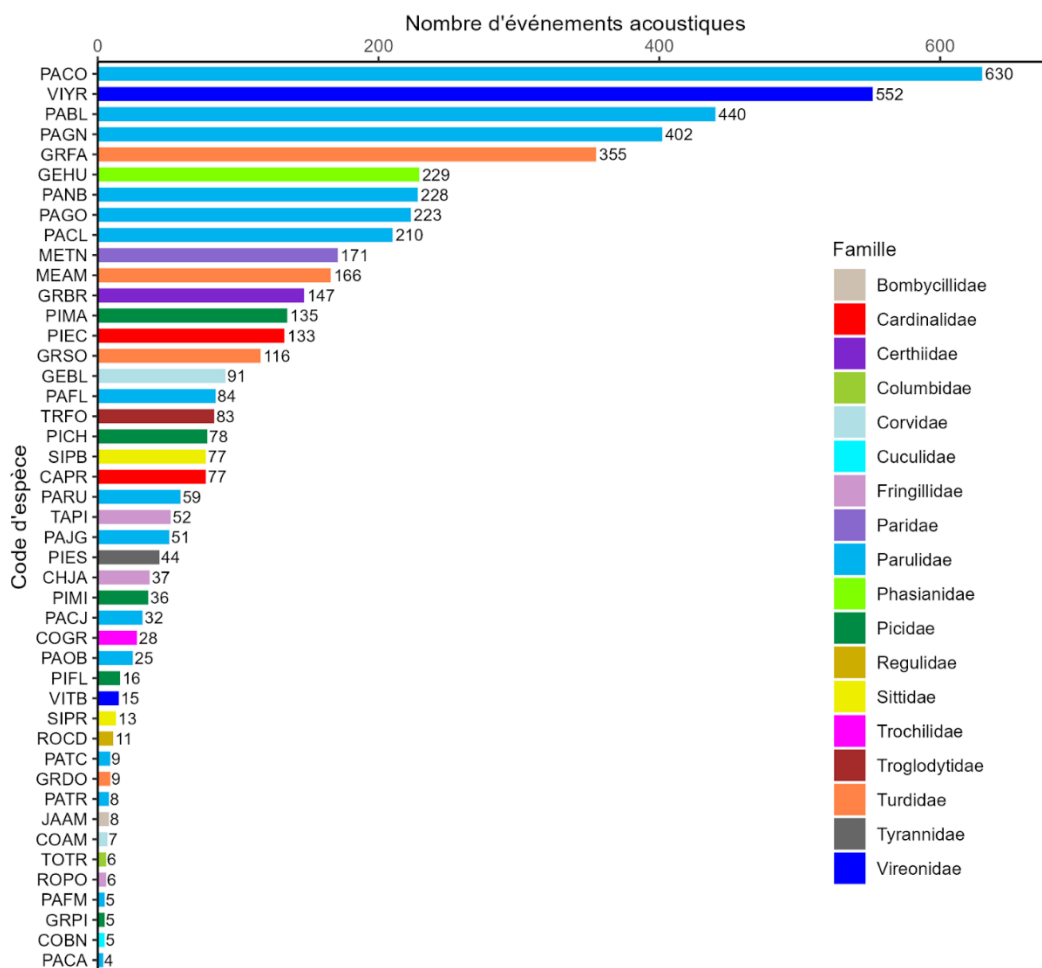


Figure 6 Nombre total d'événements acoustiques détectés pour chaque espèce d'oiseau forestier nicheur retenue ($n = 45$), par famille ($n = 18$), dans les clips audios ($n = 1100$) de 10 journées d'enregistrement au Parc national de la Mauricie (Québec, Canada) au printemps 2024 ($n = 5\,118$; min = 4; max = 630; moyenne = 114). Les codes de couleur correspondent aux familles et la légende des codes d'espèces se trouve au Tableau 1.

Une méta-analyse à effets aléatoires avec modérateurs nous a permis de départager quelles espèces ont réagi au dispositif expérimental et dans quelle direction. L'analyse révèle que 24 espèces affichent une baisse de leur activité acoustique en présence d'urine. Les erreurs types ne chevauchent pas « 0 » pour 17 de celles-ci. Le viréo à tête bleue (*Vireo solitarius*; VITB) est l'espèce avec le logOR le plus faible ($-1,402 \pm 0,648$) (Figure 7).

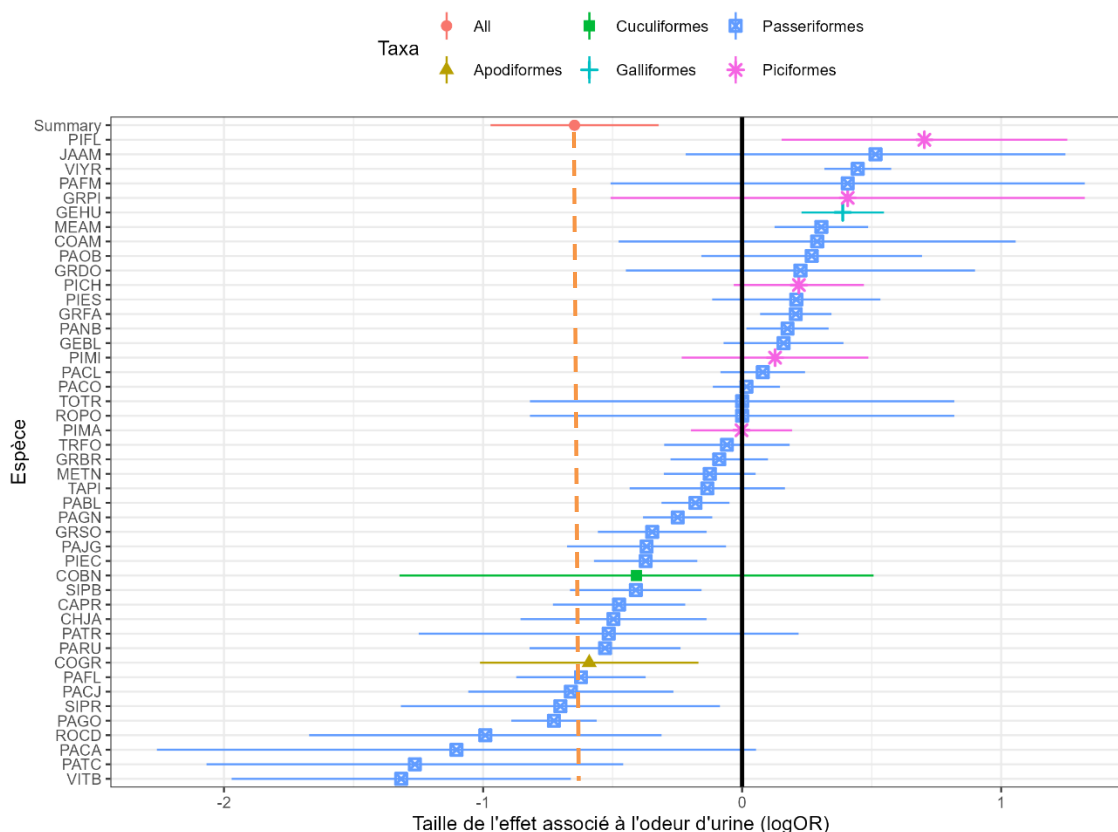


Figure 7 Taille d'effet associée à l'application d'urine de lynx roux sur l'activité acoustique ($\log\text{OR} \pm \text{ET}$) de 45 espèces d'oiseaux forestiers nicheurs enregistrés à 10 sites au Parc national de la Mauricie (Québec, Canada) au printemps 2024. Les espèces à gauche de la ligne verticale ($\log\text{OR} < 0$) affichent une plus faible activité acoustique dans les sites avec application d'urine, tandis que c'est l'inverse pour les espèces à droite de celle-ci ($\log\text{OR} > 0$). Le point *Summary* et le trait pointillé (en orange) correspondent à la taille d'effet moyenne pondérée ($\pm 1 \text{ ET}$) du modèle de méta-analyse ($\log\text{OR} = -0,65 \pm 0,32$) après l'ajout des modérateurs. Les formes correspondent aux ordres taxonomiques et la légende des codes d'espèces se trouve au Tableau 1.

En contrepartie, 18 espèces affichent une hausse de leur activité acoustique en présence d'urine, dont 6 avec sont associées à des erreurs types qui ne chevauchent pas « 0 ». L'espèce qui a connu la hausse d'activité acoustique la plus marquée en présence d'urine est le pic flamboyant (*Colaptes auratus*; PIFL) ($\log\text{OR} = 0,800 \pm 0,543$). Trois espèces sont centrées sur « 0 », soit la tourterelle triste (*Zenaida macroura*; TOTR), le roselin pourpré (*Haemorhous purpureus*; ROPO) et le pic maculé (*Sphyrapicus varius*; PIMA).

2.6.3 Traits sensoriels et utilisation du territoire

La corrélation entre la distance œil-narine et le diamètre de l'œil des 45 espèces retenues dans notre jeu de données était de 0,89 (R^2 de Pearson = 0,80). Selon les résultats de la méta-analyse, le trait olfactif du ratio de la distance œil-narine sur le diamètre transversal de l'œil, une mesure du surinvestissement dans un trait associé à l'olfaction, n'explique pas la réponse des différentes espèces à l'application d'urine de lynx roux (coefficient du modèle $0,18 \pm 0,16$, $z = 1,09$, $p = 0,27$) (Figure 8, graphique du haut). La strate de nidification des oiseaux n'a pas non plus révélé de résultat probant ($Q_{WT} = 1,85$, $p = 0,61$).

La taille du territoire d'alimentation, une mesure dérivée à partir de la masse corporelle, semble expliquer en partie les réponses des espèces au traitement expérimental; les espèces de petite masse dont la taille du territoire est petite font preuve d'une activité acoustique réduite en présence d'urine (coefficient du modèle $5,30 \pm 2,31$, $z = 2,28$, $p = 0,02$). La réponse des espèces dont la masse corporelle et le territoire sont grands semble atteindre un plateau à partir d'un territoire d'environ 1 ha (Figure 8).

La méta-analyse révèle que l'effet moyen du traitement expérimental d'ajout d'urine se traduit par un logOR de $-0,65 \pm 0,32$ chez les espèces avec un petit territoire d'alimentation, ce qui correspond à une diminution de 48 % du ratio d'incidence.

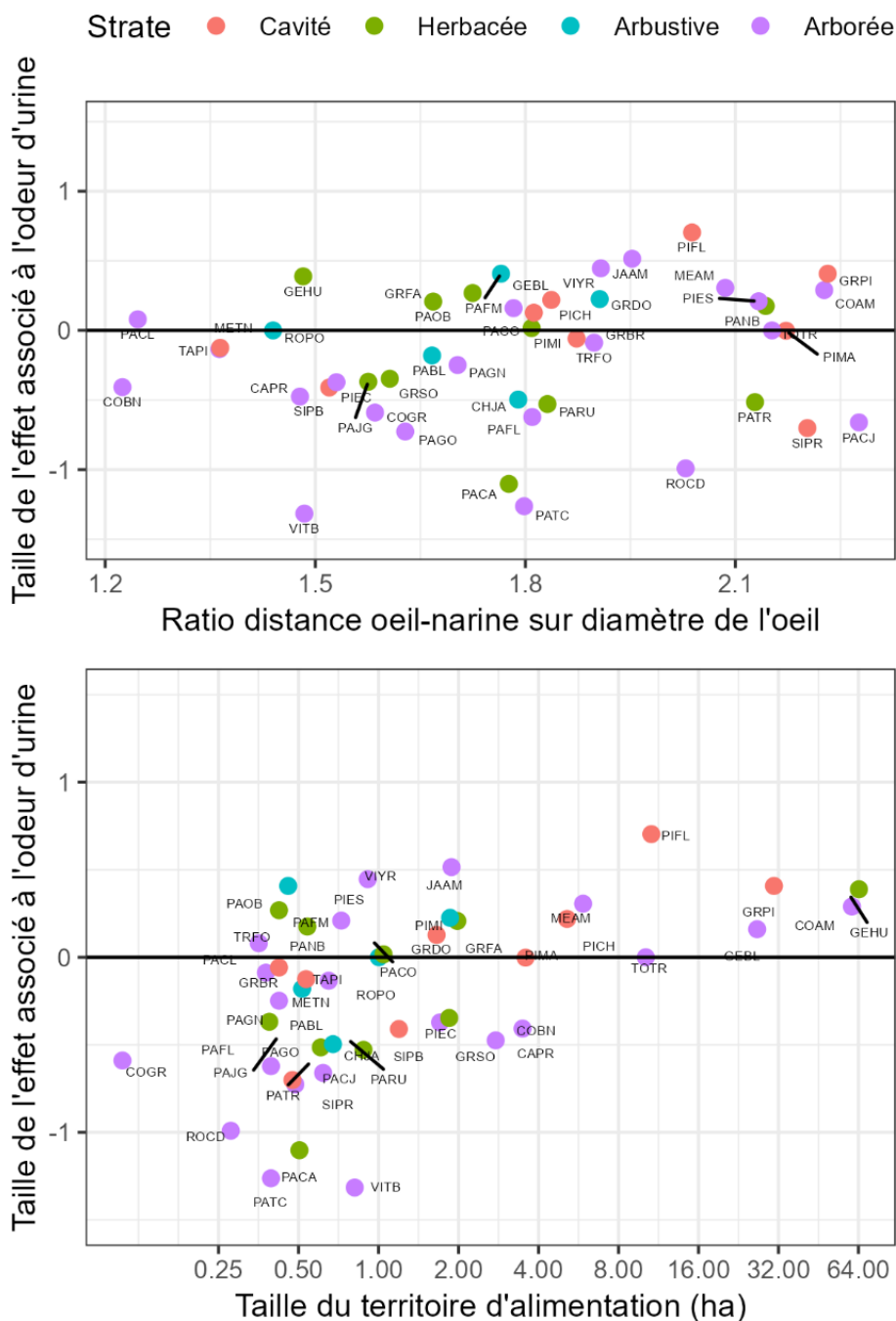


Figure 8 Répartition des espèces ($n = 45$) en réponse au traitement expérimental (logOR) en fonction du ratio de la distance œil-narine sur le diamètre de l'œil (graphique du haut) et de la superficie du territoire d'alimentation (ha) (graphique du bas). Les codes de couleurs correspondent à la position du nid dans la strate forestière. L'axe de la taille du territoire d'alimentation est sur une échelle logarithmique.

2.7 Discussion

Notre expérience explorait si l'activité acoustique de la communauté d'oiseaux forestiers nicheurs est modifiée par une manipulation du paysage olfactif et si l'amplitude de la réponse des espèces face à ce paysage modifié s'explique par des traits associés aux capacités olfactives et à l'utilisation du territoire. Dans la présente expérience, l'application d'urine de manière répétée afin de préserver l'intensité de l'odeur à la source était fondée sur des conditions réalistes de marquage du territoire par le lynx roux. Nous supposons que les espèces d'oiseaux forestiers nicheurs qui maximisent le trait d'olfaction (ratio élevé de la distance œil-narine sur le diamètre de l'œil) afficheraient une différence d'activité acoustique en présence de l'urine de lynx roux, mais nos résultats n'ont pas confirmé cette prédiction. En effet, les espèces d'oiseaux forestiers qui maximisent la taille relative du cornet nasal n'affichent pas, en moyenne, des différences d'activité acoustique aux sites avec ou sans application d'urine de lynx roux.

Nous avons également testé l'effet de deux variables associées à l'utilisation du territoire par les oiseaux forestiers en période de nidification, soit la position du nid dans la strate forestière et la taille du territoire d'alimentation. Nous supposons que les espèces qui nichent au sol ou près du sol et que les espèces avec un plus petit territoire d'alimentation afficheraient une baisse d'activité acoustique en présence de l'urine de prédateur.

Nos résultats à l'échelle de la communauté suggèrent néanmoins une baisse générale de l'activité acoustique dans les sites avec application d'urine de lynx roux, en particulier chez les espèces associées à un petit territoire d'alimentation. Ces réponses pourraient être attribuables à la félinine, une protéine présente dans l'urine de plusieurs félins, dont le chat domestique (*Felix domesticus*) et le lynx roux (Miyazaki et al., 2006; Mattina, Pignatello & Swihart, 1991).

L'absence de relation entre l'investissement dans le système olfactif et la réponse à l'odeur d'urine peut être interprétée sous deux principaux angles : 1) aucune espèce

connue pour être spécialiste de l'olfaction n'a été incluse dans le cadre de l'expérience; 2) la capacité des espèces à détecter l'odeur était régie par d'autres facteurs que les capacités olfactives.

2.7.1 Investissement dans le système olfactif

Il est connu que les espèces d'oiseaux spécialistes de l'olfaction sont majoritairement associées aux milieux aquatiques, comme les canards (Anseriformes), les râles et les grues (Gruiformes) ainsi que les limicoles (Charadriiformes) (Corfield et al., 2015). Ces taxons n'ont pas été inclus dans nos analyses, notamment en raison du défi méthodologique représenté par des contraintes liées à leur territoire d'alimentation plus vaste, plus hétérogène et, par conséquent, moins bien circonscrit spatialement que les espèces forestières. À l'échelle de la communauté d'oiseaux forestiers étudiés, les pics (Piciformes) figurent parmi les espèces avec les capacités olfactives les mieux développées (Corfield et al., 2015). Dans le cadre de la présente étude, le pic flamboyant (PIFL), le pic chevelu (*Dryocopus pileatus*; GRPI) et le pic maculé (PIMA) se classent parmi les dix espèces avec les ratios de la distance œil-narines sur le diamètre de l'œil les plus élevés. Néanmoins, les cinq espèces de pics retenues dans nos analyses ont plutôt montré une hausse de leur activité acoustique en présence de l'odeur d'urine. En contrepartie, les espèces du groupe des parulines (Passeriformes) sont celles avec les capacités olfactives les moins développées (Corfield et al., 2015). Or, plusieurs espèces de ce groupe, comme la paruline à tête cendrée (*Setophaga magnolia*; PATC) et la paruline à gorge orangée (*Setophaga fusca*; PAGO), ont montré une forte baisse de leur activité acoustique en présence de l'odeur d'urine. Ces résultats sont en contradiction avec l'hypothèse de départ voulant que les oiseaux spécialistes de l'olfaction modifient à la baisse leur activité acoustique en présence d'une odeur de prédateur et vice versa. L'hypothèse devrait toutefois être réévaluée sur des espèces associées aux milieux aquatiques, même si cela représente un défi méthodologique de taille.

2.7.2 Autres facteurs

Un deuxième angle d'analyse de nos résultats propose que la réponse des espèces à l'application d'une odeur de prédateur soit déterminée par d'autres facteurs, comme la strate de nidification et la taille du territoire d'alimentation. En contradiction avec nos prédictions, la strate de nidification n'était aucunement associée à une réponse au traitement expérimental. Des espèces qui nichent et s'alimentent au sol, comme la gélinotte huppée (*Bonasa umbellus*) et la grive fauve (*Catharus guttatus*), montraient même de légères hausses d'activité acoustique aux sites avec application d'urine. À l'inverse, parmi les cinq espèces avec les plus fortes diminutions d'activité acoustique, quatre nichent en hauteur et s'alimentent dans les strates arbustives ou arborées. Ces résultats suggèrent que la position du nid et la strate d'alimentation ne sont pas des facteurs déterminants d'une diminution de l'activité acoustique des oiseaux forestiers face à une odeur de prédateur laissée au sol.

L'autre variable de proximité à la source d'odeur évaluée, soit la taille du territoire d'alimentation, expliquait en partie le gradient de réponses des espèces au traitement expérimental. Cette diminution d'activité observée en présence d'une odeur de prédateur est du même ordre de grandeur que la réponse observée chez une communauté d'oiseaux exposés à des cris de prédateurs (Hua et al., 2013). Les espèces avec de petits territoires ont diminué leur activité acoustique par un facteur de 48 % ($\log\text{OR} = -0,65$) alors que l'activité a augmenté par un facteur marginal de 23 % chez les espèces avec de plus grands territoires ($> 1\text{ha}$; $\log\text{OR} = 0,21$). Comme la taille du territoire d'alimentation dans notre étude a été prédite à partir de la masse corporelle des espèces, il est dans les faits impossible de départager les deux effets. D'autres variables associées à la taille corporelle des oiseaux telles que la vitesse de fuite en vol (Alerstam et al., 2007) ou la probabilité d'être la proie d'un prédateur (Gravel et al., 2013) pourraient aussi expliquer cette relation. Il est envisageable que les oiseaux de petite taille évitent davantage les sites avec une odeur de prédateur parce que leur risque intrinsèque d'être capturés est plus élevé, comme c'est le cas chez les petits mammifères (Apfelbach et al., 2005). Un plus petit territoire d'alimentation signifie également que ces petits oiseaux ont plus de chances d'entrer en

contact avec la source odorante (Hixon, 1980). Notre étude ne permet pas de départager ces deux hypothèses.

Les oiseaux exposés à l'odeur de prédateur dans notre expérience faisaient face à trois possibilités comportementales en matière d'activité acoustique. Ils pouvaient décider de 1) quitter les lieux, 2) d'ignorer la source d'odeur et de ne pas modifier leur comportement, ou 3) de rester et de modifier leur activité acoustique (l'augmenter ou la diminuer). Dans un contexte de paysage de la peur, définie comme la perception de la répartition spatiale explicite du risque de prédation par un organisme (Bleicher, 2017), la capacité d'un oiseau à déterminer si un indice odorant est récent ou non lui permet de ne pas éviter inutilement une zone où il n'y a plus de prédateurs (Kats & Dill, 1998; Finnerty et al., 2022). En effet, la décision de rester à un lieu ou de le quitter en réponse à une odeur de prédateur n'est pas sans coût : un oiseau qui décide de rester sur son territoire malgré la présence potentielle d'un prédateur est plus à risque de se faire attaquer par celui-ci, surtout si la majorité de son cycle de vie se déroule près du sol (Beauchamp, 2023). Par exemple, en milieu forestier, les habitats plus ouverts sont considérés comme plus à risque, notamment pour les oiseaux granivores (Abdulwahab, Osinubi & Abalaka, 2019). Le gradient de risque de prédation est toutefois extrêmement variable entre autres selon l'endroit, la période du jour et le moment de l'année. Thomson et al. (2006a; 2006b) rapportent que, pour deux espèces d'oiseaux, les nichées étaient plus grandes et en meilleure condition lorsque les nids se trouvaient loin de sites connus par les parents pour être occupés par un prédateur.

Nous avons évalué *a posteriori* d'autres variables susceptibles d'expliquer le gradient de réponses chez nos 45 espèces, dont le régime alimentaire et le mode d'alimentation (De Graaf, Tilghman & Anderson, 1985; Birds of the World, 2025), sans obtenir de résultats concluants. À la suite de nos écoutes, la territorialité des espèces en période de nidification s'est néanmoins imposée comme une variable clé, puisqu'elle est associée autant au comportement de chant qu'à la décision de rester ou de quitter le territoire. Plus particulièrement, le moucheur tchébec (*Empidonax minimus*) a dû être retiré de la liste d'espèces en raison de son activité acoustique surreprésentée découlant

d'un comportement territorial (Davis, 1959). Cependant, nous n'avons pas trouvé de sources fiables nous permettant d'assigner les espèces de notre communauté à des niveaux fins de territorialité. Par exemple, Sheard et al. (2020) ont compilé des données de territorialité dans le contexte d'une étude sur la migration des oiseaux. Leur variable de territorialité comprend deux niveaux (défense territoriale absente/faible, ou défense territoriale toute l'année continue/forte). Parmi nos espèces initialement retenues, seules trois se retrouvent dans la catégorie de territorialité continue/forte : le pic mineur (*Dryobates pubescens*; PIMI), le pic chevelu (PICH) et le moucherolle tchébec. Idéalement, une variable plus précise nous permettrait de positionner les espèces de l'ordre des Passériformes sur un gradient de territorialité afin de tester ce trait en lien avec les réponses obtenues.

2.8 Limitations

Il importe de souligner les limitations de la présente étude. Puisqu'il est complexe d'évaluer la portée odorante du dispositif expérimental, il est possible que le traitement odorant n'ait pas été appliqué à une échelle spatiale suffisante pour avoir un effet significatif sur les espèces avec un grand territoire. En outre, la réponse des oiseaux au dispositif expérimental s'appuie sur une mesure de l'activité acoustique, de sorte que l'abondance des espèces qui sont moins vocales le matin ou surtout actives en dehors des périodes d'enregistrement a pu être sous-estimée. Dans le cadre de notre expérience de manipulation du paysage olfactif, l'activité acoustique pourrait diminuer en présence d'une odeur de prédateur afin de minimiser le risque de détection, mais elle pourrait aussi augmenter afin d'accroître la vigilance et la défense territoriale, comme c'était possiblement le cas pour le moucherolle tchébec et les pics. Il se peut également que les différentes réponses rencontrées sur le plan de l'activité acoustique s'expliquent par une augmentation de l'état de vigilance attribuable au fait que les oiseaux associent une odeur d'urine de mammifère directement à un danger, ou simplement parce que l'odeur était nouvelle pour ces individus (Roth II, Cox & Lima, 2008; Amo et al., 2008). Enfin, malgré nos précautions, le fait que les sites expérimentaux (13 visites) ont été visités plus souvent

par les chercheurs que les sites témoins (3 visites) peut avoir eu une incidence sur l'activité de chant des oiseaux.

2.9 Conclusion

L'écologie sensorielle est un champ d'études extrêmement vaste, mais encore relativement peu exploré. Chez les oiseaux, les sens les plus étudiés sont sans aucun doute la vision et l'ouïe, tandis que les sens comme l'odorat et la magnétoréception sont moins souvent abordés. La présente étude est l'une des premières à évaluer *in situ* par l'activité acoustique la réponse des oiseaux forestiers à un paysage olfactif manipulé par l'ajout d'une odeur de prédateur durant la période de reproduction. Les résultats indiquent que les capacités olfactives des oiseaux ne constituent pas le principal facteur expliquant la variabilité dans les réponses à l'échelle de la communauté. Une combinaison de variables, comme l'utilisation du territoire, le risque de prédation et la territorialité, semble déterminer cette réponse comportementale, mais leurs contributions relatives restent à déterminer. Des études portant sur l'effet des odeurs de prédateurs sur la taille de la couvée ainsi que la condition et la survie des petits dans un contexte de paysage olfactif manipulé permettraient de mieux comprendre les patrons d'utilisation de l'habitat et la variabilité comportementale interspécifique des oiseaux forestiers nicheurs associés à la perception du risque de prédation. Dans l'ensemble, nos résultats contribuent au nombre grandissant de données probantes montrant que les oiseaux sont sensibles à la signature olfactive de leur environnement.

2.10 Remerciements

Nous remercions Laurie Provençal, Frédérick Girard, Youri Simard et Elisa Walfish pour leur aide sur le terrain. Nous remercions également l'équipe de la conservation du Parc national de la Mauricie pour leur collaboration et la Macaulay Library du Cornell Lab of Ornithology pour toutes les précieuses données accessibles au public. Le projet a été financé grâce à une subvention du Conseil de recherche en sciences naturelles et génie du Canada accordée à R. Proulx (RGPIN-2022-04014).

2.11 Références bibliographiques

- Abankwah, V., Deeming, D. C., & Pike, T. W. (2020). Avian olfaction: A review of the recent literature. *Comparative Cognition & Behavior Reviews*, 15.
- Abdulwahab, U. A., Osinubi, S. T., & Abalaka, J. (2019). Risk of predation: a critical force driving habitat quality perception and foraging behavior of granivorous birds in a Nigerian forest reserve. *Avian Research*, 10, 1-9.
- Alerstam, T., Rosén, M., Bäckman, J., Ericson, P. G. P., & Hellgren, O. (2007). Flight speeds among bird species: allometric and phylogenetic effects. *PLoS biology*, 5(8), e197.
- Amo, L., Galván, I., Tomás, G., & Sanz, J. J. (2008). Predator odour recognition and avoidance in a songbird. *Functional Ecology*, 22(2), 289-293.
- Amo, L., & Saavedra, I. (2021). Attraction to smelly food in birds: Insectivorous birds discriminate between the pheromones of their prey and those of non-prey insects. *Biology*, 10(10), 1010.
- Apfelbach, R., Blanchard, C. D., Blanchard, R. J., Hayes, R. A., & McGregor, I. S. (2005). The effects of predator odors in mammalian prey species: a review of field and laboratory studies. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 29(8), 1123-1144.
- Atlas des oiseaux nicheurs de l'Ontario. (2021). Instructions – Points d'écoute. <https://www.birdsontario.org/wp-content/uploads/Atlas-3-instructions-Points-decoute-mai-2021.pdf>.
- Audacity Team. (2023). *Audacity* (Version 3.3.3) [Computer software]. <https://sourceforge.net/projects/audacity/>.
- Ausprey, I.J. (2021). Adaptations to light contribute to the ecological niches and evolution of the terrestrial avifauna. *Proceedings of the Royal Society B*, 288(1950), p.20210853.
- Ausprey, I.J., Newell, F.L. & Robinson, S.K. (2021). Adaptations to light predict the foraging.
- Bandeira, E. C., & Morante-Filho, J. C. (2024). Landscape contexts shape the effects of local factors on the predation of artificial bird nests in cocoa agroforests. *Landscape Ecology*, 39(12), 205.
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of statistical software*, 67, 1-48.
- Beauchamp, G. (2023). Susceptibility to predation varies with body mass, foraging niche, and anti-predator responses among bird species. *Birds*, 4(1), 73-84.

- Birds of the World (2025). Edited by S. M. Billerman, B. K. Keeney, G. M. Kirwan, F. Medrano, N. D. Sly, & M. G. Smith. Cornell Laboratory of Ornithology, Ithaca, NY, USA. <https://birdsoftheworld.org/bow/>
- Bleicher, S. S. (2017). The landscape of fear conceptual framework: definition and review of current applications and misuses. *PeerJ*, 5, e3772.
- Boncoraglio, G. & Saino, N. (2007). Habitat structure and the evolution of bird song: a meta-analysis of the evidence for the acoustic adaptation hypothesis. *Functional Ecology*, 134-142.
- Caves, E. M., Brandley, N. C., & Johnsen, S. (2018). Visual acuity and the evolution of signals. *Trends in ecology & evolution*, 33(5), 358-372.
- Clark, L., Hagelin, J., & Werner, S. (2015). The chemical senses in birds. *Sturkie's avian physiology*, 89-111.
- Corfield, J. R., Price, K., Iwaniuk, A. N., Gutiérrez-Ibáñez, C., Birkhead, T., & Wylie, D. R. (2015). Diversity in olfactory bulb size in birds reflects allometry, ecology, and phylogeny. *Frontiers in Neuroanatomy*, 9, 102.
- Cornell University. (2023). Macaulay Library. Cornell Lab of Ornithology. <https://www.macaulaylibrary.org/>
- Cottam, G., & Curtis, J. T. (1956). The use of distance measures in phytosociological sampling. *Ecology*, 37(3), 451-460.
- Davis, D. E. (1959). Observations on territorial behavior of Least Flycatchers. *The Wilson Bulletin*, 73-85.
- Deeming, D. C., & Reynolds, S. J. (Eds.). (2015). *Nests, eggs, and incubation: new ideas about avian reproduction*. Oxford University Press.
- De Graaf, R. M., Tilghman, N. G., & Anderson, S. H. (1985). Foraging guilds of North American birds. *Environmental Management*, 9, 493-536.
- DeGregorio, B. A., Chiavacci, S. J., Benson, T. J., Sperry, J. H., & Weatherhead, P. J. (2016). Nest predators of North American birds: continental patterns and implications. *BioScience*, 66(8), 655-665.
- Devine, S., Uanhoro, J. O., Otto, A. R., & Flake, J. K. (2024). Approaches for quantifying the ICC in multilevel logistic models: A didactic demonstration. *Collabra: Psychology*, 10(1).
- Dominoni, D. M., Halfwerk, W., Baird, E., Buxton, R. T., Fernández-Juricic, E., Fristrup, K. M., ... & Barber, J. R. (2020). Why conservation biology can benefit from sensory ecology. *Nature Ecology & Evolution*, 4(4), 502-511.

- Dotta, A., Yaman, B., & Van Huynh, A. (2024). No evidence of predator odor avoidance in a North American bird community. *Avian Research*, *15*, 100155.
- Dunning Jr, J. B. (2007). *CRC handbook of avian body masses*. CRC press.
- Ekner, A., & Tryjanowski, P. (2008). Do small hole nesting passerines detect cues left by a predator? A test on winter roosting sites. *Acta ornithologica*, *43*(1), 107-111.
- Endler, J. A. (1987). Predation, light intensity and courtship behaviour in *Poecilia reticulata* (Pisces: Poeciliidae). *Animal Behaviour*, *35*(5), 1376-1385.
- Finnerty, P. B., McArthur, C., Banks, P., Price, C., & Shrader, A. M. (2022). The olfactory landscape concept: a key source of past, present, and future information driving animal movement and decision-making. *BioScience*, *72*(8), 745-752.
- Fluck, E., Hogg, S., Mabbutt, P. S., & File, S. E. (1996). Behavioural and neurochemical responses of male and female chicks to cat odour. *Pharmacology Biochemistry and Behavior*, *54*(1), 85-91.
- Fontaine, J. J., & Martin, T. E. (2006). Parent birds assess nest predation risk and adjust their reproductive strategies. *Ecology letters*, *9*(4), 428-434.
- Godard, R. D., Bowers, B. B., & Morgan Wilson, C. (2007). Eastern bluebirds *Sialia sialis* do not avoid nest boxes with chemical cues from two common nest predators. *Journal of Avian Biology*, *38*(1), 128-131.
- Gravel, D., Poisot, T., Albouy, C., Velez, L., & Mouillot, D. (2013). Inferring food web structure from predator-prey body size relationships. *Methods in Ecology and Evolution*, *4*(11), 1083-1090.
- Grubb, T. C. (1979). Olfactory guidance of Leach's storm petrel to the breeding island. *Wilson Bulletin*, *91*, 141e143.
- Hixon, M. A. (1980). Food production and competitor density as the determinants of feeding territory size. *The American Naturalist*, *115*(4), 510-530.
- Hrncir, M., Gawryszewski, F. M., de Moraes, P. Z., & Pessoa, D. M. A. (2023). What sensory ecology might learn from landscape ecology?. *Frontiers in Ecology and Evolution*, *11*, 1198035.
- Hua, F., Fletcher Jr, R. J., Sieving, K. E., & Dorazio, R. M. (2013). Too risky to settle: avian community structure changes in response to perceived predation risk on adults and offspring. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, *280*(1764), 20130762.
- International Environment Library Consortium (IELC). (2024). Bobcat (*Lynx rufus*) Fact Sheet: Summary. <https://ielc.libguides.com/sdzg/factsheets/bobcat/summary>. (Accessed 6 March 2024).

- Internet Center for Wildlife Damage Management (ICWDM). (2024). <https://icwdm.org/species/carnivores/bobcats/bobcat-biology/>. (Accessed 1 April 2024).
- Jones, R. B., Facchin, L., & McCorquodale, C. (2002). Social dispersal by domestic chicks in a novel environment: reassuring properties of a familiar odourant. *Animal Behaviour*, *63*(4), 659-666.
- Johnson, L. S., Murphy, S. M., & Parrish, G. W. (2011). Lack of predator-odor detection and avoidance by a songbird, the House Wren. *Journal of Field Ornithology*, *82*(2), 150-157.
- Kamler, J. F., & Gipson, P. S. (2000). Home range, habitat selection, and survival of bobcats, *Lynx rufus*, in a prairie ecosystem in Kansas. *Canadian Field-Naturalist*, *114*(3), 388-394.
- Kats, L. B., & Dill, L. M. (1998). The scent of death: chemosensory assessment of predation risk by prey animals. *Ecoscience*, *5*(3), 361-394.
- Krenhardt, K., Jablonszky, M., Barta, K.A., Laczi, M., Nagy, G., Zsebök, S. & Garamszegi, L.Z. (2025). Birdsong as an Indicator of Habitat Structure and Quality. *Ecology and Evolution*, *15*(6), p.e71510.
- Kiltie, R. A. (2000). Scaling of visual acuity with body size in mammals and birds. *Functional Ecology*, *14*(2), 226-234.
- Kuznetsova, A., Brockhoff, P.B., Christensen, R.H.B. (2017). lmerTest Package: Tests in Linear Mixed Effects Models. *Journal of Statistical Software*, *82*(13), 1–26.
- MacDonald, D. W. (1980). Patterns of scent marking with urine and faeces amongst carnivore communities. In *Symposia of the Zoological Society of London* (Vol. 45, No. 107, p. e139).
- Mahr, K., Nowack, L., Knauer, F., & Hoi, H. (2022). Songbirds use scent cues to relocate to feeding sites after displacement: An experiment in great tits (*Parus major*). *Frontiers in Ecology and Evolution*, *10*, 858981.
- Martin, C. A., & Proulx, R. (2016). Habitat geometry, a step toward general bird community assembly rules in mature forests. *Forest Ecology and Management*, *361*, 163-169.
- Martin, G. R. (2017). *The Sensory Ecology of Birds*. Oxford University Press.
- Mattina, M. J. I., Pignatello, J. J., & Swihart, R. K. (1991). Identification of volatile components of bobcat (*Lynx rufus*) urine. *Journal of chemical ecology*, *17*, 451-462.

- McNab, B. K. (1988). Food habits and the basal rate of metabolism in birds. *Oecologia*, 77(3), 343-349.
- Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP). (2025). Normales climatiques du Québec 1981-2010. Gouvernement du Québec. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/normales/index.asp>.
- Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). (2017). Bilan de l'exploitation du lynx roux 2008-2017. Gouvernement du Québec. https://mffp.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/pre_lynxroux.pdf. (Accessed: 6 March 2024).
- Miyazaki, M., Yamashita, T., Suzuki, Y., Saito, Y., Soeta, S., Taira, H., & Suzuki, A. (2006). A major urinary protein of the domestic cat regulates the production of felinine, a putative pheromone precursor. *Chemistry & biology*, 13(10), 1071-1079.
- Nevitt, G. A., & Bonadonna, F. (2005). Sensitivity to dimethyl sulphide suggests a mechanism for olfactory navigation by seabirds. *Biology Letters*, 1(3), 303-305.
- Ottaviani, D., Cairns, S. C., Oliverio, M., & Boitani, L. (2006). Body mass as a predictive variable of home-range size among Italian mammals and birds. *Journal of Zoology*, 269(3), 317-330.
- Parcs Canada. (2010). Parc national de la Mauricie. Gouvernement du Canada. <http://parkscanadahistory.com/publications/fact-sheets/fra/lamauricie.pdf>.
- Parcs Canada. (2023). Nature et sciences. Parc national de la Mauricie. Gouvernement du Canada. <https://parcs.canada.ca/pn-np/qc/mauricie/nature>.
- Petit, C., Hossaert-McKey, M., Perret, P., Blondel, J., & Lambrechts, M. M. (2002). Blue tits use selected plants and olfaction to maintain an aromatic environment for nestlings. *Ecology letters*, 5(4), 585-589.
- Pieplow, N. (2019). Peterson field guide to bird sounds of western North America. Mariner Books.
- Potier, S., Duriez, O., Célérier, A., Liegeois, J.-L., & Bonadonna, F. (2019). Sight or smell: which senses do scavenging raptors use to find food? *Animal Cognition*, 22(1), 49-59.
- Proulx, R., Brouillard, J., Mazzei, R., Provençal, L., Simard, Y., Bertolacci, J., & Girard, F. (2025). Understanding the sensory ecology of birds, fishes and rodents using vision, audition and olfaction traits. Article en préparation.
- Ralph, C. J., Droege, S., & Sauer, J. R. (1995). Managing and Monitoring Birds Using Point Counts: Standards and Applications¹, 3. *Monitoring bird populations by point counts*, 161.

- Ricklefs, R. E. (1969). An analysis of nesting mortality in birds.
- Robert, M., Hachey, M. H., Lepage, D., & Couturier, A. R. (2019). *Deuxième atlas des oiseaux nicheurs du Québec méridional*. Regroupement QuébecOiseaux, Service canadien de la faune (Environnement et Changement climatique Canada) et Études d'Oiseaux Canada, Montréal, xxv + 694 p. Téléchargé le 5 février 2025 https://www.atlas-oiseaux.qc.ca/telechargement_fr.jsp.
- Roth II, T. C., Cox, J. G., & Lima, S. L. (2008). Can foraging birds assess predation risk by scent?. *Animal Behaviour*, 76(6), 2021-2027.
- Safi, K., & Siemers, B. M. (2010). Implications of sensory ecology for species coexistence: biased perception links predator diversity to prey size distribution. *Evolutionary Ecology*, 24, 703-713.
- Sheard, C., Neate-Clegg, M. H., Alioravainen, N., Jones, S. E., Vincent, C., MacGregor, H. E., ... & Tobias, J. A. (2020). Ecological drivers of global gradients in avian dispersal inferred from wing morphology. *Nature communications*, 11(1), 2463.
- Schoener, T. W. (1968). Sizes of feeding territories among birds. *Ecology*, 49(1), 123-141.
- Sibley, D. (2019). Sibley Bird ID (v2). [Mobile application software]. Google store.
- Stager, K. E. (1964). The role of olfaction in food location by the turkey vulture (*Cathartes aura*). University of Southern California.
- Stevens, M. (2013). *Sensory Ecology, Behaviour, and Evolution*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199601776.001.0001>.
- The Cornell Lab of Ornithology. (2023). Merlin Bird ID (3.5.2 (936)) [Mobile application software]. Google Play.
- Thomson, R. L., Forsman, J. T., Mönkkönen, M., Hukkanen, M., Koivula, K., Rytönen, S., & Orell, M. (2006a). Predation risk effects on fitness related measures in a resident bird. *Oikos*, 113(2), 325-333.
- Thomson, R. L., Forsman, J. T., Sardà-Palomera, F., & Mönkkönen, M. (2006b). Fear factor: prey habitat selection and its consequences in a predation risk landscape. *Ecography*, 29(4), 507-514.
- Viechtbauer, W. (2010). Conducting meta-analyses in R with the metafor package. *Journal of Statistical Software*, 36(3), 1-48. <https://doi.org/10.18637/jss.v036.i03>
- Voznessenskaya, V. V. (2014). Influence of cat odor on reproductive behavior and physiology in the house mouse (*Mus musculus*). *Neurobiology of chemical communication*, 389-406.

- Whittaker, D. J., Reichard, D. G., Dapper, A. L., & Ketterson, E. D. (2009). Behavioral responses of nesting female dark-eyed juncos *Junco hyemalis* to hetero- and conspecific passerine preen oils. *Journal of Avian Biology*, *40*(6), 579-583.
- Whittaker, D. J., Richmond, K. M., Miller, A. K., Kiley, R., Bergeon Burns, C., Atwell, J. W., & Ketterson, E. D. (2011). Intraspecific preen oil odor preferences in Dark-eyed juncos (*Junco hyemalis*). *Behavioral Ecology*, *22*(6), 1256-1263.
- Yang, P. J., Pham, J., Choo, J., & Hu, D. L. (2014). Duration of urination does not change with body size. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *111*(33), 11932-11937.
- Zhang, L., Bujkiewicz, S., & Jackson, D. (2024). Three new methodologies for calculating the effective sample size when performing population adjustment. *BMC Medical Research Methodology*, *24*(1), 287.
- Zidar, J., & Løvlie, H. (2012). Scent of the enemy: behavioural responses to predator faecal odour in the fowl. *Animal Behaviour*, *84*(3), 547-554.

CHAPITRE III

CONCLUSION GÉNÉRALE

3.1 Contextualisation

Dans le domaine de l'écologie sensorielle, il est soutenu que les sens comme la vision, l'audition et l'olfaction régissent la sélection des ressources et les adaptations comportementales des organismes. L'environnement peut être perçu comme un assemblage de signaux (p. ex. sons, odeurs, structures physiques) qui interagissent avec les systèmes sensoriels de ces organismes (Dominoni et al., 2020). Puisque ces signaux varient constamment dans le temps et l'espace, les organismes ont développé de nombreuses voies de spécialisation, ce qui a mené à l'évolution d'une myriade de systèmes sensoriels diversifiés (Endler, 1987; Safi & Siemers, 2010; Hrcir et al., 2023; Stevens, 2013). Durant sa croissance, un organisme a une quantité finie d'énergie qu'il peut investir dans la croissance de ses organes sensoriels, de sorte que certains systèmes sensoriels sont favorisés plus que d'autres (Caves, Brandley & Werner, 2018). Dans un contexte de paysage olfactif, les signaux olfactifs sont utilisés par un très grand nombre d'organismes à diverses fins telles que la communication, la reconnaissance des pairs et l'orientation. La durée, l'ampleur du déplacement et la nature (phéromones de papillons, carcasse en décomposition, marquage d'urine sur un tronc, etc.) de ces signaux sont également très variables.

La vision et l'ouïe des oiseaux ont déjà fait l'objet de nombreuses études (p. ex. McClure et al., 2013; Demery, Burns & Mason, 2021; Wiley, 1991). En ce qui concerne leur odorat, ce n'est que vers le milieu du 20^e siècle qu'il a été reconnu et démontré que les oiseaux ont un sens de l'odorat fonctionnel et qu'ils utilisent leurs capacités olfactives dans le cadre de la majorité de leurs activités. Il est maintenant reconnu que les oiseaux sont capables de détecter des odeurs de prédateurs, auxquelles certaines espèces réagissent négativement, et que la majorité des oiseaux ont des réactions négatives lorsqu'ils sont

exposés à de nouvelles odeurs (p. ex. Jones, Facchin & McCorquodale, 2002; Amo et al., 2008; Roth II, Cox & Lima, 2008; Ekner & Tryjanowski, 2008; Zidar & Løvlie, 2012). Les oiseaux n'ont toutefois pas tous des capacités olfactives équivalentes, car la taille des bulbes olfactifs, et par conséquent leur acuité olfactive, varie beaucoup en fonction de la phylogénie et du milieu de vie des différentes espèces (Corfield et al., 2015; Martin, 2017).

La plupart des études portant sur l'odorat des oiseaux ne visent qu'une seule espèce ou une seule molécule odorante à la fois. Les études à l'échelle de la communauté dans un contexte d'écologie sensorielle sont plutôt rares et récentes, comme celle de McClure (2013), qui examine la réponse des oiseaux migrateurs face aux bruits d'une fausse autoroute en milieu forestier, et celle de Dotta, Yaman & Van Huynh (2024), qui évalue la réponse de la communauté d'oiseaux en présence d'une odeur de prédateur, mais sans identifier les espèces d'oiseaux qui interagissent avec leur dispositif expérimental ni la variabilité interspécifique des réponses. Ainsi, la nature et l'ampleur des réponses interspécifiques au sein d'une communauté d'oiseaux forestiers face à une odeur de prédateur demeuraient inconnues.

La présente étude visait à déterminer le rôle des capacités olfactives des oiseaux forestiers sur la perception du risque de prédation et leur activité acoustique à l'échelle de la communauté. Pour ce faire, nous avons 1) établi une base de données des traits sensoriels des oiseaux nicheurs du Québec pour trouver et évaluer les potentiels compromis sensoriels (vision, audition et odorat); 2) manipulé durant six semaines le paysage olfactif à cinq sites forestiers avec de l'urine de lynx roux, chacun appairé avec un site témoin; et 3) déterminé si la réponse acoustique des oiseaux forestiers nicheurs à l'odeur de prédateur variait à l'échelle de la communauté en fonction de leurs capacités olfactives, de la taille de leur territoire d'alimentation ou de leur strate de nidification. Plus précisément, nous avons évalué la probabilité qu'un oiseau en période de nidification modifie son activité acoustique dans un habitat où il y a des indices odorants de la présence d'un prédateur.

3.2 Traitement expérimental

L'expérience s'est déroulée pendant six semaines dans la portion sud-est du Parc national de la Mauricie, dominée par la forêt mixte et influencée par la proximité du lac à la Pêche. Il y avait un total de dix sites en paires similaires : cinq sites avec application d'urine et cinq sites témoins. Nous avons modifié l'environnement olfactif en installant des piquets dotés d'une bande de coton imbibée à répétition d'urine de lynx roux, une espèce naturellement absente du Parc national de la Mauricie. Le choix de l'espèce de prédateur découle de la volonté des chercheurs de ne pas augmenter réellement le risque de prédation sur la communauté d'oiseaux en place et s'appuie sur le fait que les oiseaux réagissent généralement aux odeurs nouvelles (Roth II, Cox & Lima, 2008; Amo et al., 2008). À chaque site manipulé, il y avait un dispositif odorant central et quatre dispositifs odorants disposés à 20 m du centre selon les points cardinaux. Des dispositifs identiques ont été installés aux sites sans application d'urine pour éviter tout effet visuel confondant. Le tout avait pour le but d'imiter la présence olfactive d'un lynx roux et le risque de prédation qu'il représenterait pour la communauté d'oiseaux forestiers.

3.3 Résultats principaux

3.3.1 Activité acoustique des espèces

L'objectif général de l'étude était de déterminer si le trait olfactif du ratio de la distance entre la narine et l'œil et du diamètre transversal de l'œil jouait un rôle dans la réponse des oiseaux forestiers en présence d'une odeur de prédateur durant la période de sélection de l'habitat de reproduction. Pour les dix jours d'enregistrement retenus, qui représentent 1100 clips audios, 5118 événements acoustiques ont été détectés. Un total de 71 espèces ont été identifiées sur les clips audios (Annexe B), mais seulement 45 d'entre elles ont été retenues aux fins de l'analyse (Tableau 1). Les critères de sélection étaient les suivants : espèce forestière connue pour nicher dans la zone d'étude, sauf les rapaces, et minimum de 4 occurrences. Les valeurs d'activité acoustique pour chaque espèce ont servi à calculer le logarithme du ratio d'incidence (logOR) à l'aide d'une méta-analyse à effets aléatoires avec modérateurs. Celle-ci révèle qu'un total de 24 espèces, dont 17 de

manière significative, montrent une diminution de leur activité acoustique en présence d'urine, tandis que 18 espèces, dont 6 de manière significative, affichent plutôt une hausse de leur activité acoustique aux sites manipulés, mais de façon moins marquée en général. Enfin, 3 espèces ne montrent aucun changement comportemental face au traitement odorant. La probabilité qu'un oiseau montre une activité acoustique dans les sites avec une odeur d'urine est 48 % plus faible que dans les sites témoins, avec un logOR moyen pondéré de $-0,65 \pm 0,32$ (IC 95 %) pour la communauté d'espèces étudiées, ce qui signifie que les oiseaux forestiers nicheurs sont environ deux fois moins actifs sur le plan acoustique en présence d'urine.

3.3.2 Traits sensoriels et utilisation du territoire

La réponse des oiseaux au dispositif odorant ne serait pas associée au trait olfactif étudié ni à la position du nid dans les strates végétales. En effet, contrairement à notre première hypothèse, les espèces qui maximisent les traits d'olfaction (ratio élevé de la distance entre l'œil et la narine sur le diamètre transversal de l'œil) n'affichent généralement pas une activité de chant plus faible dans les sites expérimentaux que dans les sites témoins. Le comportement observé n'a donc pas été régi majoritairement par le trait d'olfaction.

La taille du territoire des oiseaux est corrélée à leur masse (Schoener, 1968; Ottaviani et al., 2006) et cette variable explique en partie le gradient de réponses des espèces au traitement expérimental. En effet, un oiseau plus gros, qui occupe un grand territoire, peut privilégier différentes parties de son territoire s'il juge qu'il doit en éviter une partie. Un oiseau de plus petite taille, qui occupe un plus petit territoire, mais ne souhaite pas changer de place, a aussi plus de possibilités de rencontrer un prédateur qui fréquente régulièrement le même territoire à des fins de marquage. Ce petit oiseau est également plus susceptible de rencontrer de la compétition intraspécifique dans les alentours s'il tente de changer de territoire, surtout s'il s'agit d'une espèce commune ou présente en forte densité. Par ailleurs, un oiseau plus petit est généralement plus vulnérable face à une plus grande diversité de prédateurs qu'un oiseau plus gros (Ricklefs, 1969).

L'hypothèse liée à la strate de nidification des oiseaux n'a pas non plus obtenu de résultats probants. Cependant, la taille du territoire d'alimentation, fortement corrélée à la masse corporelle, pourrait expliquer en partie la variation dans les réponses observées : les espèces dont la taille du territoire est plus petite font généralement preuve d'une activité acoustique plus faible en présence d'urine ($5,30 \pm 2,31$, $z = 2,28$, $p = 0,02$). Les petits oiseaux sont à la base plus vulnérables à la prédation (DeGregorio et al., 2016), et il serait intéressant de mener une étude plus poussée sur l'effet de la taille. Quelques autres variables modératrices ont aussi été testées *a posteriori*, mais sans obtenir de résultats significatifs, comme le régime alimentaire et le mode d'alimentation (De Graaf, Tilghman & Anderson, 1985; Birds of the World, 2025). Les nids installés au sol, le comportement de quête de nourriture sur le sol ou près du sol et le type de nourriture recherchée ne semblent pas jouer de rôle prépondérant dans l'activité acoustique des oiseaux en présence d'une odeur de prédateur. Cependant, il est possible que la perception du risque de prédation ait un effet sur la taille de la couvée ainsi que sur la condition et la survie des petits (Fontaine & Martin, 2006; Ricklefs, 1969).

La capacité de déterminer si un indice odorant est récent ou non permet à un oiseau de ne pas éviter inutilement une zone où il n'y a plus de prédateurs (Kats & Dill, 1998). En effet, la décision de rester ou de partir face à un indice de présence d'un prédateur n'est pas sans coût, peu importe le choix final. Un oiseau qui décide de rester sur son territoire malgré la présence d'une odeur de prédateur court un plus grand risque d'être la proie d'un prédateur, surtout si la majorité de son cycle de vie se déroule près du sol (Beauchamp, 2023), mais il s'assure de conserver un habitat potentiellement de meilleure qualité que ses congénères en ce qui concerne d'autres facteurs environnementaux. Au contraire, un oiseau qui choisit de moins fréquenter ou d'éviter un site où il y a des indices de présence de prédateurs est ainsi moins susceptible d'être attaqué (Beauchamp, 2023), mais cela le contraint à trouver un autre territoire, dans un habitat de qualité potentiellement inférieure. Le gradient de risque de prédation est extrêmement variable entre autres selon l'endroit, la période du jour et le moment de l'année. Thomson et al. (2006a; 2006b) rapportent que les nichées pour deux espèces d'oiseaux étaient plus grandes et de meilleure qualité lorsque les nids se trouvaient loin de sites connus par les

oiseaux pour être occupés par un prédateur que les nichées se trouvant plus près du territoire de ce prédateur. La qualité de l'habitat de nidification et de l'habitat d'alimentation en ce qui concerne le risque de prédation serait donc cruciale pour maximiser le succès reproducteur des oiseaux forestiers, et les indices de présence laissés par les prédateurs semblent constituer l'un des facteurs importants dans la sélection des sites de nidification.

Les espèces d'oiseaux spécialistes de l'olfaction sont majoritairement associées aux milieux aquatiques et semi-aquatiques, comme les oiseaux marins (Procellariiformes), les râles et les grues (Gruiformes) ainsi que les limicoles (Charadriiformes) (Corfield et al., 2015) de même qu'aux taxons plus anciens, comme les canards (Anseriformes) et les ratites (Apterygiformes) (cf. Martin, 2017). Dans le cadre de la présente étude, nous avons écarté ces taxons, car nous voulions départager les capacités olfactives et la réponse connexe surtout des espèces forestières, plus faciles à étudier par l'activité acoustique. Parmi les espèces retenues, les pics (Piciformes) figurent parmi les espèces avec les capacités olfactives les mieux développées (Corfield et al., 2015). En contrepartie, les espèces de l'ordre des Passériformes sont celles avec les capacités olfactives les moins développées (Corfield et al., 2015). Les cinq espèces de pics retenues dans nos analyses ont augmenté leur activité acoustique en présence de l'odeur d'urine, tandis que plusieurs Passériformes, dont des parulines, ont montré une forte baisse de leur activité acoustique aux sites manipulés. Or, nous pensions que les oiseaux présentant de meilleures capacités olfactives diminueraient davantage leur activité acoustique. Cette hypothèse pourrait être testée autrement sur une communauté d'espèces de milieux aquatiques, malgré les difficultés potentielles posées par la méthodologie.

3.3.3 Limitation

Il est important de tenir compte des limitations de la présente étude au moment d'interpréter les résultats. Puisqu'il est complexe d'évaluer la portée odorante du dispositif expérimental, il est possible que le traitement odorant n'ait pas été appliqué à une échelle suffisante pour avoir un impact significatif sur les espèces à grand territoire. Il est

également possible que l'odeur choisie ne représente pas une source de danger suffisante pour faire réagir certaines espèces d'oiseaux. En outre, le design expérimental utilisé dépend du chant des oiseaux pour détecter leur présence, de sorte que les espèces actives en dehors des périodes d'enregistrement n'ont pas été étudiées et que l'activité des espèces qui sont moins vocales durant les heures d'enregistrement a pu être sous-estimée.

3.4 Conclusion

L'écologie sensorielle est un champ d'études extrêmement vaste, mais encore relativement peu exploré. Chez les oiseaux, les sens les plus étudiés sont sans aucun doute la vision et l'ouïe, tandis que les sens comme l'odorat et la magnétoréception sont moins souvent abordés. Notre étude évalue la réponse des oiseaux forestiers à la modification du paysage olfactif durant la période de reproduction. Les résultats indiquent que les capacités olfactives des oiseaux ne constituent pas le principal facteur expliquant la variabilité dans les réponses à l'échelle de la communauté.

La présente étude est l'une des premières à être réalisées directement en milieu naturel à l'échelle de la communauté d'oiseaux forestiers nicheurs et visant à évaluer la réponse interspécifique aux modifications du paysage olfactif au sein de cette communauté. Nos résultats contribuent à démontrer que les oiseaux sont sensibles à la signature olfactive de leur environnement. D'autres traits physiques ou comportementaux non testés pourraient aussi expliquer la réponse négative ou positive de certaines espèces aux indices de présence de prédateurs au moment de choisir leur habitat de reproduction, comme le niveau de compétition intraspécifique, la territorialité, la date d'arrivée après la migration printanière ou la fidélité au site de nidification. Il serait aussi pertinent d'étudier l'effet des odeurs de prédateurs sur la taille de la couvée ainsi que la condition et la survie des oisillons dans le but de mieux comprendre la variabilité comportementale interspécifique de la communauté d'oiseaux associée à la perception du risque de prédation, qu'il soit réel ou non.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abankwah, V., Deeming, D. C., & Pike, T. W. (2020). Avian olfaction: A review of the recent literature. *Comparative Cognition & Behavior Reviews*, 15.
- Abdulwahab, U. A., Osinubi, S. T., & Abalaka, J. (2019). Risk of predation: a critical force driving habitat quality perception and foraging behavior of granivorous birds in a Nigerian forest reserve. *Avian Research*, 10, 1-9.
- Alerstam, T., Rosén, M., Bäckman, J., Ericson, P. G. P., & Hellgren, O. (2007). Flight speeds among bird species: allometric and phylogenetic effects. *PLoS biology*, 5(8), e197.
- Amo, L., Galván, I., Tomás, G., & Sanz, J. J. (2008). Predator odour recognition and avoidance in a songbird. *Functional Ecology*, 22(2), 289-293.
- Amo, L., Visser, M. E., & van Oers, K. (2011). Smelling out predators is innate in birds. *Ardea*, 99(2), 177-184.
- Amo, L., & Saavedra, I. (2021). Attraction to smelly food in birds: Insectivorous birds discriminate between the pheromones of their prey and those of non-prey insects. *Biology*, 10(10), 1010.
- Ausprey, I.J. (2021). Adaptations to light contribute to the ecological niches and evolution of the terrestrial avifauna. *Proceedings of the Royal Society B*, 288(1950), p.20210853.
- Ausprey, I.J., Newell, F.L. & Robinson, S.K. (2021). Adaptations to light predict the foraging.
- Bailey, T. N. (1974). Social organization in a bobcat population. *The Journal of Wildlife Management*, 435-446.
- Bandeira, E. C., & Morante-Filho, J. C. (2024). Landscape contexts shape the effects of local factors on the predation of artificial bird nests in cocoa agroforests. *Landscape Ecology*, 39(12), 205.
- Bang, B. G. (1960). Anatomical evidence for olfactory function in some species of birds. *Nature*, 188(4750), 547-549.
- Beason, R. C. (2004). What can birds hear?. In *Proceedings of the Vertebrate Pest Conference* (Vol. 21, No. 21).
- Beauchamp, G. (2023). Susceptibility to predation varies with body mass, foraging niche, and anti-predator responses among bird species. *Birds*, 4(1), 73-84.

- Bleicher, S. S. (2017). The landscape of fear conceptual framework: definition and review of current applications and misuses. *PeerJ*, 5, e3772.
- Bonadonna, F., Hesters, F., & Jouventin, P. (2003). Scent of a nest: discrimination of own-nest odours in Antarctic prions, *Pachyptila desolata*. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 54, 174-178.
- Boncoraglio, G., & Saino, N. (2007). Habitat structure and the evolution of bird song: a meta-analysis of the evidence for the acoustic adaptation hypothesis. *Functional Ecology*, 134-142.
- Borenstein, M., Hedges, L. V., Higgins, J. P., & Rothstein, H. R. (2021). *Introduction to meta-analysis*. John Wiley & Sons.
- Castro, I., Cunningham, S. J., Gsell, A. C., Jaffe, K., Cabrera, A., & Liendo, C. (2010). Olfaction in birds: a closer look at the kiwi (Apterygidae). *Journal of Avian Biology*, 41(3), 213-218.
- Caves, E. M., Brandley, N. C., & Johnsen, S. (2018). Visual acuity and the evolution of signals. *Trends in ecology & evolution*, 33(5), 358-372.
- Clark, L., Avilova, K. V., & Bean, N. J. (1993). Odor thresholds in passerines. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*, 104(2), 305-312.
- Clark, L., Hagelin, J., & Werner, S. (2015). The chemical senses in birds. *Sturkie's avian physiology*, 89-111.
- Cobb, S. (1968). The size of the olfactory bulb in 108 species of birds. *The auk*, 85(1), 55-61.
- Corfield, J. R., Price, K., Iwaniuk, A. N., Gutiérrez-Ibáñez, C., Birkhead, T., & Wylie, D. R. (2015). Diversity in olfactory bulb size in birds reflects allometry, ecology, and phylogeny. *Frontiers in Neuroanatomy*, 9, 102.
- Cornell University. (2023). Macaulay Library. Cornell Lab of Ornithology. <https://www.macaulaylibrary.org/>
- Deeming, D. C., & Reynolds, S. J. (Eds.). (2015). *Nests, eggs, and incubation: new ideas about avian reproduction*. Oxford University Press.
- De Graaf, R. M., Tilghman, N. G., & Anderson, S. H. (1985). Foraging guilds of North American birds. *Environmental Management*, 9, 493-536.
- DeGregorio, B. A., Chiavacci, S. J., Benson, T. J., Sperry, J. H., & Weatherhead, P. J. (2016). Nest predators of North American birds: continental patterns and implications. *BioScience*, 66(8), 655-665.

- Demery, A. J. C., Burns, K. J., & Mason, N. A. (2021). Bill size, bill shape, and body size constrain bird song evolution on a macroevolutionary scale. *The Auk*, *138*(2), ukab011.
- Dominoni, D. M., Halfwerk, W., Baird, E., Buxton, R. T., Fernández-Juricic, E., Fristrup, K. M., ... & Barber, J. R. (2020). Why conservation biology can benefit from sensory ecology. *Nature Ecology & Evolution*, *4*(4), 502-511.
- Dotta, A., Yaman, B., & Van Huynh, A. (2024). No evidence of predator odor avoidance in a North American bird community. *Avian Research*, *15*, 100155.
- Dunning Jr, J. B. (2007). *CRC handbook of avian body masses*. CRC press.
- Ekner, A., & Tryjanowski, P. (2008). Do small hole nesting passerines detect cues left by a predator? A test on winter roosting sites. *Acta ornithologica*, *43*(1), 107-111.
- Endler, J. A. (1987). Predation, light intensity and courtship behaviour in *Poecilia reticulata* (Pisces: Poeciliidae). *Animal Behaviour*, *35*(5), 1376-1385.
- Finnerty, P. B., McArthur, C., Banks, P., Price, C., & Shrader, A. M. (2022). The olfactory landscape concept: a key source of past, present, and future information driving animal movement and decision-making. *BioScience*, *72*(8), 745-752.
- Fluck, E., Hogg, S., Mabbutt, P. S., & File, S. E. (1996). Behavioural and neurochemical responses of male and female chicks to cat odour. *Pharmacology Biochemistry and Behavior*, *54*(1), 85-91.
- Fontaine, J. J., & Martin, T. E. (2006). Parent birds assess nest predation risk and adjust their reproductive strategies. *Ecology letters*, *9*(4), 428-434.
- Frasnelli, J., & Proulx, R. (2019). Smellscapes: A Neurobiological and Ecological Perspective. In *Spatial Senses* (pp. 125-147). Routledge.
- Friis, J. I., Sabino, J., Santos, P., Dabelsteen, T., & Cardoso, G. C. (2021). The allometry of sound frequency bandwidth in songbirds. *The American Naturalist*, *197*(5), 607-614.
- Gaynor, K. M., Brown, J. S., Middleton, A. D., Power, M. E., & Brashares, J. S. (2019). Landscapes of fear: spatial patterns of risk perception and response. *Trends in ecology & evolution*, *34*(4), 355-368.
- Godard, R. D., Bowers, B. B., & Morgan Wilson, C. (2007). Eastern bluebirds *Sialia sialis* do not avoid nest boxes with chemical cues from two common nest predators. *Journal of Avian Biology*, *38*(1), 128-131.
- Gravel, D., Poisot, T., Albouy, C., Velez, L., & Mouillot, D. (2013). Inferring food web structure from predator-prey body size relationships. *Methods in Ecology and Evolution*, *4*(11), 1083-1090.

- Grubb, T. C. (1979). Olfactory guidance of Leach's storm petrel to the breeding island. *Wilson Bulletin*, *91*, 141e143.
- Hill, A. (1905). Can birds smell?. *Nature*, *71*(1840), 318-319.
- Hixon, M. A. (1980). Food production and competitor density as the determinants of feeding territory size. *The American Naturalist*, *115*(4), 510-530.
- Houston, D. C. (1986). Scavenging efficiency of turkey vultures in tropical forest. *The Condor*, *88*(3), 318-323.
- Hrncir, M., Gawryszewski, F. M., de Moraes, P. Z., & Pessoa, D. M. A. (2023). What sensory ecology might learn from landscape ecology?. *Frontiers in Ecology and Evolution*, *11*, 1198035.
- Johnson, L. S., Murphy, S. M., & Parrish, G. W. (2011). Lack of predator-odor detection and avoidance by a songbird, the House Wren. *Journal of Field Ornithology*, *82*(2), 150-157.
- Jones, R. B., & Roper, T. J. (1997). Olfaction in the domestic fowl: a critical review. *Physiology & Behavior*, *62*(5), 1009-1018.
- Jones, R. B., Facchin, L., & McCorquodale, C. (2002). Social dispersal by domestic chicks in a novel environment: reassuring properties of a familiar odourant. *Animal Behaviour*, *63*(4), 659-666.
- Jurcak, A. M., & Moore, P. A. (2014). Behavioral decisions in sensory landscapes: crayfish use chemical signals to make habitat use choices. *Journal of Crustacean Biology*, *34*(5), 559-564.
- Kare, M. R. (1970). The chemical senses of birds.
- Kats, L. B., & Dill, L. M. (1998). The scent of death: chemosensory assessment of predation risk by prey animals. *Ecoscience*, *5*(3), 361-394.
- Kemp, A. D., & Christopher Kirk, E. (2014). Eye size and visual acuity influence vestibular anatomy in mammals. *The Anatomical Record*, *297*(4), 781-790.
- Khan, I., Yang, Z., Maldonado, E., Li, C., Zhang, G., Gilbert, M. T. P., ... & Antunes, A. (2015). Olfactory receptor subgenomes linked with broad ecological adaptations in Sauropsida. *Molecular biology and evolution*, *32*(11), 2832-2843.
- Kiltie, R. A. (2000). Scaling of visual acuity with body size in mammals and birds. *Functional Ecology*, *14*(2), 226-234.
- Krenhardt, K., Jablonszky, M., Barta, K.A., Laczi, M., Nagy, G., Zsebök, S. & Garamszegi, L.Z. (2025). Birdsong as an Indicator of Habitat Structure and Quality. *Ecology and Evolution*, *15*(6), p.e71510.

- Laundré, J. W., Hernández, L., & Altendorf, K. B. (2001). Wolves, elk, and bison: reestablishing the "landscape of fear" in Yellowstone National Park, USA. *Canadian Journal of Zoology*, 79(8), 1401-1409.
- Liu, J., & Taylor, W. W. (Eds.). (2002). *Integrating landscape ecology into natural resource management* (No. 1). Cambridge University Press.
- Mahr, K., Nowack, L., Knauer, F., & Hoi, H. (2022). Songbirds use scent cues to relocate to feeding sites after displacement: An experiment in great tits (*Parus major*). *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10, 858981.
- Martin, C. A., & Proulx, R. (2016). Habitat geometry, a step toward general bird community assembly rules in mature forests. *Forest Ecology and Management*, 361, 163-169.
- Martin, G. R. (2017). *The Sensory Ecology of Birds*. Oxford University Press.
- Mason, J. R., & Clark, L. (2000). The chemical senses in birds. *Sturkie's avian physiology*, 39-56.
- Mason, J. R., Clark, L., & Shah, P. S. (1991). Ortho-aminoacetophenone repellency to birds: similarities to methyl anthranilate. *The Journal of wildlife management*, 334-340.
- Mattina, M. J. I., Pignatello, J. J., & Swihart, R. K. (1991). Identification of volatile components of bobcat (*Lynx rufus*) urine. *Journal of chemical ecology*, 17, 451-462.
- McClure, C. J. W., Ware, H. E., Carlisle, J., Kaltenecker, G., & Barber, J. R. (2013). An experimental investigation into the effects of traffic noise on distributions of birds: Avoiding the phantom road. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 280(1773), 20132290. <https://doi.org/10.1098/rspb.2013.2290>
- McNab, B. K. (1988). Food habits and the basal rate of metabolism in birds. *Oecologia*, 77(3), 343-349.
- Miyazaki, M., Yamashita, T., Suzuki, Y., Saito, Y., Soeta, S., Taira, H., & Suzuki, A. (2006). A major urinary protein of the domestic cat regulates the production of feline, a putative pheromone precursor. *Chemistry & biology*, 13(10), 1071-1079.
- Nevitt, G. A., & Bonadonna, F. (2005). Sensitivity to dimethyl sulphide suggests a mechanism for olfactory navigation by seabirds. *Biology Letters*, 1(3), 303-305.
- Nolte, D. L., Mason, J. R., Epple, G., Aronov, E., & Campbell, D. L. (1994). Why are predator urines aversive to prey?. *Journal of Chemical Ecology*, 20, 1505-1516.

- Nummela, S., Pihlström, H., Puolamäki, K., Fortelius, M., Hemilä, S., & Reuter, T. (2013). Exploring the mammalian sensory space: Co-operations and trade-offs among senses. *Journal of Comparative Physiology A*, 199(12), 1077-1092. <https://doi.org/10.1007/s00359-013-0846-2>.
- Ottaviani, D., Cairns, S. C., Oliverio, M., & Boitani, L. (2006). Body mass as a predictive variable of home-range size among Italian mammals and birds. *Journal of Zoology*, 269(3), 317-330.
- Petit, C., Hossaert-McKey, M., Perret, P., Blondel, J., & Lambrechts, M. M. (2002). Blue tits use selected plants and olfaction to maintain an aromatic environment for nestlings. *Ecology letters*, 5(4), 585-589.
- Potier, S., Duriez, O., Célérier, A., Liegeois, J.-L., & Bonadonna, F. (2019). Sight or smell: which senses do scavenging raptors use to find food? *Animal Cognition*, 22(1), 49-59.
- Proulx, R., Waldinger, J., & Koper, N. (2019). Anthropogenic landscape changes and their impacts on terrestrial and freshwater soundscapes. *Current Landscape Ecology Reports*, 4, 41-50.
- Proulx, R., Brouillard, J., Mazzei, R., Provençal, L., Simard, Y., Bertolacci, J., & Girard, F. (2025). Understanding the sensory ecology of birds, fishes and rodents using vision, audition and olfaction traits. Article en préparation.
- Regroupement QuébecOiseaux. (2023). Liste des oiseaux du Québec. Version d'avril 2023. <https://www.quebecoiseaux.org/fr/liste-oiseaux-quebec>.
- Ricklefs, R. E. (1969). An analysis of nesting mortality in birds.
- Ritland, S. (1982). The Allometry of the Vertebrate Eye. [Unpublished doctoral dissertation]. The University of Chicago.
- Roth II, T. C., Cox, J. G., & Lima, S. L. (2008). Can foraging birds assess predation risk by scent?. *Animal Behaviour*, 76(6), 2021-2027.
- Safi, K., & Siemers, B. M. (2010). Implications of sensory ecology for species coexistence: biased perception links predator diversity to prey size distribution. *Evolutionary Ecology*, 24, 703-713.
- Schoener, T. W. (1968). Sizes of feeding territories among birds. *Ecology*, 49(1), 123-141.
- Schwartzkopff, J. (1955). On the hearing of birds. *The Auk*, 340-347.
- Stager, K. E. (1964). The role of olfaction in food location by the turkey vulture (*Cathartes aura*). University of Southern California.

- Stevens, M. (2013). *Sensory Ecology, Behaviour, and Evolution*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199601776.001.0001>.
- Strong, R. M. (1911). On the olfactory organs and the sense of smell in birds. *Journal of Morphology*, 22(3), 619-661.
- Thomson, R. L., Forsman, J. T., Mönkkönen, M., Hukkanen, M., Koivula, K., Rytönen, S., & Orell, M. (2006a). Predation risk effects on fitness related measures in a resident bird. *Oikos*, 113(2), 325-333.
- Thomson, R. L., Forsman, J. T., Sardà-Palomera, F., & Mönkkönen, M. (2006b). Fear factor: prey habitat selection and its consequences in a predation risk landscape. *Ecography*, 29(4), 507-514.
- Voznessenskaya, V. V. (2014). Influence of cat odor on reproductive behavior and physiology in the house mouse (*Mus musculus*). *Neurobiology of chemical communication*, 389-406.
- Wenzel, B. M. (1971). Olfactory sensation in the kiwi and other birds. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 188(1), 183-192.
- Whittaker, D. J., Reichard, D. G., Dapper, A. L., & Ketterson, E. D. (2009). Behavioral responses of nesting female dark-eyed juncos *Junco hyemalis* to hetero- and conspecific passerine preen oils. *Journal of Avian Biology*, 40(6), 579-583.
- Whittaker, D. J., Richmond, K. M., Miller, A. K., Kiley, R., Bergeon Burns, C., Atwell, J. W., & Ketterson, E. D. (2011). Intraspecific preen oil odor preferences in Dark-eyed juncos (*Junco hyemalis*). *Behavioral Ecology*, 22(6), 1256-1263.
- Wiley, R. H. (1991). Associations of Song Properties with Habitats for Territorial Oscine Birds of Eastern North America. *The American Naturalist*, 138(4), 973-993.
- Zidar, J., & Løvlie, H. (2012). Scent of the enemy: behavioural responses to predator faecal odour in the fowl. *Animal Behaviour*, 84(3), 547-554.

ANNEXE A

Tableau 2 Description de la structure et de la composition forestière des sites expérimentaux en matière de coefficient de verdoisement et de recouvrement foliaire, de fréquences d'observations des essences d'arbres et des espèces de mammifères détectées par les caméras.

| Site | Coefficient de verdoisement (SE) | Recouvrement foliaire (SE) | Bouleau jaune | Érable à sucre | Hêtre à grandes feuilles | Mammifères |
|------|-------------------------------------|-------------------------------|------------------|-------------------|-----------------------------|------------|
| 1A | 0,0503 (0,0067) | 0,4299 (0,0249) | 4 | 11 | 0 | 6 |
| 1B | 0,0544 (0,0200) | 0,4019 (0,0261) | 6 | 6 | 4 | 4 |
| 2A | 0,0550 (0,0038) | 0,3998 (0,0156) | 1 | 14 | 0 | 11 |
| 2B | 0,0457 (0,0128) | 0,4088 (0,0308) | 0 | 18 | 0 | 16 |
| 3A | 0,0348 (0,0097) | 0,4197 (0,0319) | 2 | 16 | 0 | 2 |
| 3B | 0,0383 (0,0122) | 0,4023 (0,0317) | 1 | 14 | 3 | 0 |
| 4A | 0,0537 (0,0083) | 0,4262 (0,0190) | 1 | 13 | 6 | 6 |
| 4B | 0,0486 (0,0132) | 0,4271 (0,0272) | 1 | 14 | 5 | 3 |
| 5A | 0,0487 (0,0102) | 0,4155 (0,0283) | 1 | 16 | 3 | 10 |
| 5B | 0,0624 (0,0180) | 0,4061 (0,0234) | 0 | 15 | 4 | 10 |

ANNEXE B

Tableau 3 Liste de toutes les espèces répertoriées sur les clips audios.

| Nom latin | Espèce | Famille | Ordre |
|----------------------------------|----------------------------|---------------|-----------------|
| <i>Actitis macularius</i> | Chevalier grivelé | Scolopacidae | Charadriiformes |
| <i>Aegolius acadicus</i> | Petite Nyctale | Strigidae | Strigiformes |
| <i>Agelaius phoeniceus</i> | Carouge à épaulettes | Icteridae | Passériformes |
| <i>Archilochus colubris</i> | Colibri à gorge rubis | Trochilidae | Apodiformes |
| <i>Bombycilla cedrorum</i> | Jasseur d'Amérique | Bombycillidae | Passériformes |
| <i>Bonasa umbellus</i> | Gélinotte huppée | Phasianidae | Galliformes |
| <i>Branta canadensis</i> | Bernache du Canada | Anatidae | Anseriformes |
| <i>Bubo virginianus</i> | Grand-duc d'Amérique | Strigidae | Strigiformes |
| <i>Buteo lineatus</i> | Buse à épaulettes | Accipitridae | Accipitriformes |
| <i>Buteo platypterus</i> | Petite Buse | Accipitridae | Accipitriformes |
| <i>Cardellina canadensis</i> | Paruline du Canada | Parulidae | Passériformes |
| <i>Catharus fuscescens</i> | Grive fauve | Turdidae | Passériformes |
| <i>Catharus guttatus</i> | Grive solitaire | Turdidae | Passériformes |
| <i>Catharus ustulatus</i> | Grive à dos olive | Turdidae | Passériformes |
| <i>Certhia americana</i> | Grimpereau brun | Certhiidae | Passériformes |
| <i>Charadrius vociferus</i> | Pluvier kildir | Charadriidae | Charadriiformes |
| <i>Coccyzus erythrophthalmus</i> | Coulicou à bec noir | Cuculidae | Cuculiformes |
| <i>Colaptes auratus</i> | Pic flamboyant | Picidae | Piciformes |
| <i>Contopus cooperi</i> | Moucherolle à côtés olive | Tyrannidae | Passériformes |
| <i>Contopus virens</i> | Pioui de l'Est | Tyrannidae | Passériformes |
| <i>Corthylio calendula</i> | Roitelet à couronne rubis | Regulidae | Passériformes |
| <i>Corvus brachyrhynchos</i> | Corneille d'Amérique | Corvidae | Passériformes |
| <i>Corvus corax</i> | Grand Corbeau | Corvidae | Passériformes |
| <i>Cyanocitta cristata</i> | Geai bleu | Corvidae | Passériformes |
| <i>Dryobates pubescens</i> | Pic mineur | Picidae | Piciformes |
| <i>Dryobates villosus</i> | Pic chevelu | Picidae | Piciformes |
| <i>Dryocopus pileatus</i> | Grand Pic | Picidae | Piciformes |
| <i>Empidonax flaviventris</i> | Moucherolle à ventre jaune | Tyrannidae | Passériformes |
| <i>Empidonax minimus</i> | Moucherolle tchébec | Tyrannidae | Passériformes |
| <i>Falco columbarius</i> | Faucon émerillon | Falconidae | Falconiformes |
| <i>Gavia immer</i> | Plongeon huard | Gaviidae | Gaviiformes |
| <i>Geothlypis philadelphia</i> | Paruline triste | Parulidae | Passériformes |
| <i>Haemorhous purpureus</i> | Roselin pourpré | Fringillidae | Passériformes |
| <i>Leiostyris peregrina</i> | Paruline obscure | Parulidae | Passériformes |
| <i>Leiostyris ruficapilla</i> | Paruline à joues grises | Parulidae | Passériformes |

| Nom latin | Espèce | Famille | Ordre |
|---------------------------------|-----------------------------|----------------|---------------|
| <i>Megascops asio</i> | Petit-duc maculé | Strigidae | Strigiformes |
| <i>Meleagris gallopavo</i> | Dindon sauvage | Phasianidae | Galliformes |
| <i>Melospiza melodia</i> | Bruant chanteur | Passerellidae | Passériformes |
| <i>Mniotilta varia</i> | Paruline noir et blanc | Parulidae | Passériformes |
| <i>Parkesia noveboracensis</i> | Paruline des ruisseaux | Parulidae | Passériformes |
| <i>Pheucticus ludovicianus</i> | Cardinal à poitrine rose | Cardinalidae | Passériformes |
| <i>Piranga olivacea</i> | Piranga écarlate | Cardinalidae | Passériformes |
| <i>Poecile atricapillus</i> | Mésange à tête noire | Paridae | Passériformes |
| <i>Quiscalus quiscula</i> | Quiscale bronzé | Icteridae | Passériformes |
| <i>Regulus satrapa</i> | Roitelet à couronne dorée | Regulidae | Passériformes |
| <i>Sayornis phoebe</i> | Moucherolle phébi | Tyrannidae | Passériformes |
| <i>Seiurus aurocapilla</i> | Paruline couronnée | Parulidae | Passériformes |
| <i>Setophaga americana</i> | Paruline à collier | Parulidae | Passériformes |
| <i>Setophaga caerulescens</i> | Paruline bleue | Parulidae | Passériformes |
| <i>Setophaga castanea</i> | Paruline à poitrine baie | Parulidae | Passériformes |
| <i>Setophaga coronata</i> | Paruline à croupion jaune | Parulidae | Passériformes |
| <i>Setophaga fusca</i> | Paruline à gorge orangée | Parulidae | Passériformes |
| <i>Setophaga magnolia</i> | Paruline à tête cendrée | Parulidae | Passériformes |
| <i>Setophaga pensylvanica</i> | Paruline à flancs marron | Parulidae | Passériformes |
| <i>Setophaga ruticilla</i> | Paruline flamboyante | Parulidae | Passériformes |
| <i>Setophaga virens</i> | Paruline à gorge noire | Parulidae | Passériformes |
| <i>Sitta canadensis</i> | Sittelle à poitrine rousse | Sittidae | Passériformes |
| <i>Sitta carolinensis</i> | Sittelle à poitrine blanche | Sittidae | Passériformes |
| <i>Sphyrapicus varius</i> | Pic maculé | Picidae | Piciformes |
| <i>Spizella passerina</i> | Bruant familier | Passerellidae | Passériformes |
| <i>Spinus pinus</i> | Tarin des pins | Fringillidae | Passériformes |
| <i>Spinus tristis</i> | Chardonneret jaune | Fringillidae | Passériformes |
| <i>Strix varia</i> | Chouette rayée | Strigidae | Strigiformes |
| <i>Sturnus vulgaris</i> | Étourneau sansonnet | Sturnidae | Passériformes |
| <i>Tachycineta bicolor</i> | Hirondelle bicolore | Hirundinidae | Passériformes |
| <i>Thryothorus ludovicianus</i> | Troglodyte de Caroline | Troglodytidae | Passériformes |
| <i>Troglodytes hiemalis</i> | Troglodyte des forêts | Troglodytidae | Passériformes |
| <i>Turdus migratorius</i> | Merle d'Amérique | Turdidae | Passériformes |
| <i>Vireo gilvus</i> | Viréo mélodieux | Vireonidae | Passériformes |
| <i>Vireo olivaceus</i> | Viréo aux yeux rouges | Vireonidae | Passériformes |
| <i>Vireo solitarius</i> | Viréo à tête bleue | Vireonidae | Passériformes |
| <i>Zenaidura macroura</i> | Tourterelle triste | Columbidae | Passériformes |
| <i>Zonotrichia albicollis</i> | Bruant à gorge blanche | Passerellidae | Passériformes |

ANNEXE C

CALCULS RELATIFS AUX QUANTITÉS D'URINE DE LYNX ROUX

L'urine a été appliquée à environ 30 cm du sol, ce qui se trouve à mi-chemin entre la hauteur d'épaule d'un lynx roux de taille moyenne et le sol (IELC, 2024).

Le lynx roux occupe un territoire moyen de 14 km² et parcourt entre 1,6 et 6,4 km/jour (4 km en moyenne) (Kamler & Gipson, 2000; ICWDM, 2024).

Un lynx roux marque son territoire 3 fois/0,4 km (Bailey, 1974; MacDonald, 1980) : notre zone d'étude mesure environ 3,5 km linéaires (5,8 km²), alors une moyenne de 4 km si le lynx zigzague un peu à travers la zone peut s'appliquer.

Un trajet de 4 km correspond à environ 30 marquages ($4 \times 3 / 0,4 = 30$); notre dispositif comporte 25 piquets de « marquage », un nombre qui semble réaliste par rapport aux 30 marquages absolus pour la distance parcourue.

La superficie de la zone d'étude correspond au tiers du territoire moyen, alors un lynx la visiterait environ aux 2,33 jours (7/3).

Le volume quotidien d'urine produite par un mammifère est de 26 mL/kg (Yang et al., 2014).

- Un lynx roux produit ~208 mL d'urine/jour (poids moyen de 8 kg) (IELC, 2024)
- 208 mL/25 marquages (5 piquets/site x 5 sites) = 8,3 mL/marquage ou 41,5 mL/station/visite

Une visite aux 2,33 jours : 208 mL x 2,33 = 485,3 mL/semaine

- 1250 mL/485,3 mL x 100 = 257 %

Nous avons utilisé environ 2,6 fois plus d'urine qu'un lynx roux pour les marquages, ce qui assurait une pression olfactive importante et continue aux fins de l'étude.