



**Détermination de l'habitat d'origine chez le Pic à dos noir et le Pic à dos rayé par analyses
des résines provenant de l'habitat**

par François-Xavier Grandmont

**Mémoire présenté à l'Université du Québec à Chicoutimi en vue de l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M. Sc.) en Ressources renouvelables, Environnement et Biologie**

Québec, Canada

RÉSUMÉ

L'aire de répartition restreinte de certaines espèces nichant dans la boréale québécoise rend l'étude de leur effectifs et mouvements ardue. Afin d'enrichir les connaissances sur les juvéniles en dispersion automnale chez deux pics boréaux, le Pic à dos noir et le Pic à dos rayé, une méthode expérimentale d'analyse des rectrices est tentée. L'habitat de reproduction de ces oiseaux est principalement monospécifique. Chaque habitat est composé soit d'Épinette noire, de Sapin baumier ou de Pin gris. Cette monospécificité des espèces arborescentes est assumée suffisante pour permettre une analyse des oléorésines accumulées sur les rectrices de ces oiseaux lors de leurs déplacements le long des troncs. À l'aide de la chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse, des échantillons de rectrices de ces pics, prélevés dans l'aire de nidification, ainsi que des échantillons d'écorce provenant du même site de prélèvement, sont analysés. L'objectif principal est d'associer la composition chimique retrouvée sur les rectrices de pics et celle d'écorces, par l'analyse des composés résiniques provenant des oléorésines afin de dégager une signature chimique associée à chacun de ces trois habitats de conifères.

Par la suite, des juvéniles en dispersion capturés à l'Observatoire d'Oiseaux de Tadoussac sont échantillonnés au niveau des rectrices. Le second objectif est de relier ces pics juvéniles en dispersion à leur habitat d'origine en se basant sur les analyses des oléorésines des conifères recueillis dans l'aire de nidification. Bien qu'il n'ait pas été possible de déterminer l'origine des pics en dispersion en raison d'un manque de précision des données chromatographiques, de nombreuses molécules provenant des oléorésines produites par les conifères ont été identifiées sur les rectrices. Ces résultats confirment qu'il y a un transfert des oléorésines entre les conifères et les oiseaux, et ouvrent la voie à de futurs travaux pour mieux comprendre cette dynamique afin d'identifier les habitats d'origine des jeunes pics en dispersion et éventuellement d'élaborer des stratégies de conservation pour ces espèces.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES TABLEAUX	v
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES SIGLES, ABRÉVIATIONS, ACRONYMES	viii
REMERCIEMENTS	x
1. INTRODUCTION	1
1.1. Suivi des populations aviaires	1
1.2. Situation des pics de la forêt boréale	2
1.3. Analyses des composantes retrouvées sur les rectrices	4
1.4. Analyse des oléorésines par GC-MS	5
1.5. Objectifs et hypothèses	6
2. MÉTHODOLOGIE	8
2.1. Période et lieu d'échantillonnage	8
2.1.1. Nidification	8
2.1.2. Dispersion des juvéniles	9
2.2. Échantillonnage sur les rectrices	10
2.3. Traitement en laboratoire	11
2.4. Analyses statistiques	13
3. RÉSULTATS ET DISCUSSION	15
3.1. Échantillonnage des <i>Picoides</i> et des essences d'arbre	15
3.2. Molécules d'intérêt des résultats chromatographiques	18
3.2.1. Terpènes des conifères de la boréale de l'Est	19
3.2.2. Association des rectrices de pics boréaux aux lichens	23
3.3. Analyse des patrons et résultats chromatographiques	25
3.3.1. Faiblesse du signal chromatographique associés aux territoires nidification	28
3.3.2. Patrons chromatographiques concluants à l'OOT	31
3.3.3. Difficultés statistiques inhérentes à la base de données	33
3.4. Possibilités futures	34
4. CONCLUSION	36
ANNEXE 1	37
RÉFÉRENCES	38

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Paramètres optimaux pour l'analyse des composés d'oléorésines par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse.....	12
Tableau 2 : Échantillonnage des Pics à dos noir, des Pics à dos rayé et des espèces de conifères caractérisant l'habitat de nidification selon les régions de provenance.	16
Tableau 3 : Répartition des sexes pour les individus de PIDN et PIDR capturés, selon les sites de capture.	17
Tableau 4 : Répartition des âges pour les individus capturés selon la période du cycle annuel. HY : première année (<i>Hatching year</i>) ; AHY : plus que la première année (<i>After Hatching Year</i>) ; SY : deuxième année (<i>Second Year</i>) ; ASY : après la deuxième année (<i>After Second Year</i>) ; TY : troisième année (<i>Third Year</i>) ; ATY : après la troisième année (<i>After Third Year</i>).	18
Tableau 5 : Occurrence des principales molécules pouvant être associées à la forêt boréale de l'Est, identifiées selon les groupements de nature et de provenances des échantillons ainsi que leur numéro CAS, inscrit entre parenthèse (Poaty et al. 2015).	22
Tableau 6 : Exemple des résultats chromatographiques extraits de la matrice, selon le temps de rétention des composés ainsi que l'espèce correspondante pour chaque échantillon.	37

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Répartition des sites d'échantillonnage dans l'est du Québec. (1) camp Pékan, Pessière noire à mousses (pics : $n = 33$; écorces : $n = 29$); (2) Pinèdes grises du Lac-St-Jean (pics : $n = 4$; écorces : $n = 3$); (3) Dunes de Tadoussac, OOT (pics : $n = 39$).....	10
Figure 2 : Pic à dos rayé en vue d'ensemble ci-haut, suivi d'un agrandissement sur les rectrices à la suite des manipulations. (A) Rectrice centrale de droite, immergée d'hexane.	11
Figure 3 : NMDS produite à partir des données GC-MS obtenues dans la matrice, témoignant de la forte corrélation entre échantillons engendrée par la proportion trop grande de zéros.	14
Figure 4 : Comparaison des spectres de masse obtenus dans un échantillon d'Épinette noire échantillonné en 2022 près du camp Pékan (en rouge) avec les spectres de masse de la banque NIST en référence (en bleu). A : α -pinene ; B : β -pinène. En abscisse : rapport charge/masse (m/z) ; en ordonné : intensité du signal.....	20
Figure 5 : Chromatogramme d'un échantillon de rectrice de Pic à dos noir capturé près du camp Pékan en juin 2022. Présence d'un pic chromatographique dominant d'acide atrarique au temps de rétention 28,6. En abscisse : temps de rétention (min) ; en ordonné : intensité du signal.	25
Figure 6 : Chromatogramme provenant du camp Pékan associé à un échantillon d'Épinette noire (A.), suivi de deux chromatogrammes : un de Pic à dos rayé (B.) et un second de Pic à dos noir (C.), tous deux également du camp Pékan. Ces derniers partagent un patron chromatographique similaire alors que le premier s'en distingue, malgré leur provenance commune. En abscisse : temps de rétention (min) ; en ordonné : intensité du signal.	27
Figure 7 : Chromatogrammes provenant du camp Pékan associés à un échantillon de Pic à dos rayé (A.) et de Sapin baumier (B.) sur lesquels on note la quasi-absence de pics chromatographiques de grande intensité. En abscisse : temps de rétention (min) ; en ordonné : intensité du signal.	30

Figure 8 : Chromatogramme provenant de Tadoussac (OOT) associé à un échantillon de Pic à dos rayé capturé en octobre 2022. Les regroupements de pics chromatographiques sont présents entre la 28e et la 36e minute et la 42e et la 50e minute. En abscisse : temps de rétention (min) ; en ordonné : intensité du signal. 33

LISTE DES SIGLES, ABRÉVIATIONS, ACRONYMES

GC-MS : *Gas chromatography-mass spectrometry* / Chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse

PIDN : Pic à dos noir

PIDR : Pic à dos rayé

EPN : Épinette noire

SAB : Sapin baumier

PIG : Pin gris

OOT : Observatoire d'Oiseaux de Tadoussac

HY : *Hatching year* / 1 an (jusqu'au 31 décembre de l'année de naissance)

AHY : *After Hatching Year* / post 1 an

SY : *Second Year* / 2 ans (jusqu'au 31 décembre de l'année de naissance)

ASY : *After Second Year* / post 2 ans

TY : *Third Year* / 3 ans (jusqu'au 31 décembre de l'année de naissance)

ATY : *After Third Year* / +3ans.

TBE : Tordeuse des bourgeons de l'épinette

GPS : *Global positioning system* / Système de positionnement global

VHF : *Very high frequency* / Très haute fréquence

Ind. : Individu

Pour qu'une chose soit intéressante, il suffit de la regarder longtemps.

- *Gustave Flaubert*

REMERCIEMENTS

Tant de personnes sont à remercier pour ce projet qui n'aurait jamais pu aboutir sans les innombrables aides et soutiens apportés. Il me faut tout d'abord souligner ma plus grande reconnaissance envers tous les membres de ma direction. Jacques qui a fait naître ce projet et m'a fourni l'opportunité de poursuivre un parcours stimulant au gré de mes passions. Bien plus qu'un encadrement académique, c'est également ces précieux moments passés sur le terrain à partager ta passion de naturaliste, si contagieuse, qui me resteront. De l'Île-aux-Basques jusqu'aux limites du 51^e parallèle, avoir eu la chance de te côtoyer, autant entre les murs de l'Université qu'en sortie de birding, fut aussi stimulant que plaisant.

Junior, avoir pu compter sur ton soutien indéfectible et de tous les instants au fil des mois qu'aura duré ce projet m'a été d'un renfort immense. J'éprouve le plus grand respect et la plus vive reconnaissance face au dévouement et à la sensibilité dont tu fais montre pour le bien-être de toute ton équipe. À de nombreuses reprises, avoir pu compter sur toi dans toutes situations a été une véritable bouée dans ce parcours parfois houleux.

Serge, tu as réussi à éveiller le chimiste en moi, aussi loin pouvait-il être enfoui. Ta patience, ton soutien infailible et ta constante bonne humeur sont quelques-uns des éléments qui ont rendu le travail avec toi aussi agréable, autant lors des séances en laboratoire, à patenter sur le GC-MS, que celles dans ton bureau, à me fournir des cours abrégés de notions de chimie (toujours d'une clarté éblouissante). Avoir eu la chance de te côtoyer fut un des grands plaisirs de mon parcours.

Catherine, un merci tout spécial à toi qui, malgré la nature changeante et incertaine que prenait mon projet, tu as été entièrement disponible et impliqué dès que nous le manifestions. En dépit des fluctuations qu'a pu connaître ce projet, ton appui et tes avis éclairés n'ont jamais fait défaut.

Au regard de leur valeureuse contribution respective, ce sont de bien humbles remerciements que je peux offrir aux nombreuses équipes qui ont apporté leur aide à ce projet. À commencer par toute l'équipe du camp Pékan : Vincent Lamarre, Myriam Lemieux, Xavier St-Amant, Jérémie Tixier. Ce fut un tel plaisir de partager avec vous les voluptueux banquets matinaux de Michel pour ensuite affronter mouches et intempéries de la pessière.

Les deux cohortes (2021-2022) de bénévoles à la station de baguage de l'OOT, aussi nombreux et changeant que vous ayez été à passer par la Maison de la mer, je vous remercie. Grâce à votre compagnie, ces périodes ont été franchement agréables à passer. Frank Bordeleau, pour des temps immémoriaux des chants seront chantés en l'honneur de cette matinée où tu baguas l'Élénie à bec court. Pour ma part, c'est ton courage, ta fougue, ton humour et ta passion dont je chanterai les éloges. Grand merci à tous les membres de la direction de l'observatoire : Pascal Côté, François Gagnon, Alexandre Terrigeol et Jean-François Therrien, qui m'ont épaulé malgré la période de transition qu'était la leur. C'est grâce à vous qu'a été possible ce partenariat avec l'OOT, programme d'Explos-Nature et de l'UQAC, à travers une subvention MITACS. Merci également à Camille Bégin-Marchand, Laetitia Desbordes et Pierre-Alexandre Dumas pour votre précieuse aide.

À tous les membres que j'eus la chance de côtoyer à l'UQAC, lors de périodes de laboratoire, de cours ou simplement de rencontres fortuites dans le corridor, je veux souligner ma gratitude. Josiane et Rébecca, vous avez toutes deux été aussi bénéfiques à ce projet qu'à mon appréciation de son déroulement. Germain, pour ton support en parallèle, mais tout particulièrement pour ces conviviaux échanges et tes accueils toujours aussi chaleureux, ce fut un réel bonheur de te côtoyer durant cette période.

Il me faut maintenant profiter de cet espace pour remercier ce qui mérite bien plus que de simples remerciements. Mes parents, Jean et Manon, votre souci attentionné et compréhensif de mon épanouissement sont très certainement en cause dans la personne que je me permets de devenir. Finalement, j'aimerais remercier de tout cœur mon frère et ma sœur, Thierry et Maxence,

pour les conseils avisés, l'écoute attentive et le souci d'être toujours présent pour moi. Être votre « milieu » est un honneur qui me procure le plus grand des plaisirs.

Bien sûr, à tous les potes, loins ou proches, que vous ayez été à Montréal, Québec, Rimouski, Les Bergeronnes, Sept-Îles, St-Michel-des-Saints, Trois-Rivières, Sherbrooke ou quelque part entre tout ça, sachez qu'il n'y aurait rien à lire plus bas sans vous.

1. INTRODUCTION

1.1. Suivi des populations aviaires

Afin d'assurer la conservation des populations animales, il est essentiel que celle-ci soit faite à la lumière d'une bonne connaissance de la biologie des espèces ciblées. Quoique l'enrichissement des connaissances doive se faire sur l'entièreté du cycle biologique des espèces, il n'en reste pas moins axé sur certains aspects fondamentaux, tels que la reproduction, le suivi des effectifs de population ainsi que de leurs mouvements. En raison de la diversité des conditions écologiques et environnementales propres à chaque espèce, réaliser un suivi des différentes populations d'une espèce en milieu naturel peut s'avérer extrêmement difficile. Cette difficulté s'intensifie lorsqu'il s'agit d'étudier des populations d'espèces migratrices, nombreuses parmi la faune aviaire (Sibly *et al.* 2002; Horns *et al.* 2018). Le baguage, qui utilise des bagues à numéros uniques fixées aux pattes des oiseaux, permet leur suivi par capture, marquage et recapture et ce, pour une grande diversité d'espèces migratrices (Finch 1993). Cette ancienne façon de faire a connu un essor récent grâce à la création d'un vaste réseau de stations de baguage coordonnées. En effet, la présence de nombreuses stations de baguages à travers le continent offre la possibilité d'acquérir des données relatives aux parcours migratoires empruntés par les différentes espèces baguées (Morrison 1975; Rousseau *et al.* 2020). De plus, la pérennité et la standardisation des suivis effectués permettent l'étude des effectifs et des variations au sein des populations d'oiseaux régulièrement capturés (Osenkowski *et al.* 2012).

De nombreuses technologies et méthodes furent récemment développées afin de parvenir à suivre les oiseaux dans leurs déplacements tout en faisant un certain suivi des effectifs de population (Prevost 2016; Kirol *et al.* 2020). La pose de divers types d'émetteurs sur les oiseaux, tels que des émetteurs GPS ou VHF, est une autre avenue qui, quoique développée il y a maintenant plusieurs années, continue sans cesse de se perfectionner, ouvrant ainsi de nombreuses possibilités d'études sur des espèces aviaires de plus en plus petites (Fiedler 2009; Bächler *et al.* 2010; Bégin Marchand *et al.* 2020). Grâce à ces émetteurs, il est désormais possible de faire un suivi plus précis des mouvements et distances parcourues par de nombreuses espèces d'oiseaux, fournissant plusieurs

informations clés pour la compréhension de l'écologie de ces espèces, auparavant inconnues et inaccessibles (Webster *et al.* 2002; Robinson *et al.* 2010). Malgré ces avancées permettant l'acquisition de nouvelles connaissances sur les routes migratoires et les tendances populationnelles, certains mouvements plus discrets et marginaux demeurent peu documentés par ces méthodes (Cooper et Marra 2020). C'est le cas de la dispersion post-reproduction chez des espèces résidentes. Les mouvements de dispersion s'étendent généralement sur des distances plus courtes, parfois avec certaines parties de l'aire de répartition qui ne sont pas couvertes par des observatoires d'oiseaux, rendant l'étude de ces mouvements plus difficile à effectuer (Paradis *et al.* 1998).

1.2. Situation des pics de la forêt boréale

Le Pic à dos noir (*Picoides arcticus*; PIDN) et le Pic à dos rayé (*Picoides dorsalis*; PIDR) sont deux espèces résidentes de la forêt boréale qui utilisent presque exclusivement les conifères pour nicher et s'alimenter (Imbeau et Desrochers 2002; Nappi et Drapeau 2009; Tremblay *et al.* 2020b; 2020a; Lamarre et Tremblay 2021). Les déplacements des juvéniles correspondent bien à ces mouvements de plus petits effectifs, difficiles à documenter à l'aide des méthodes conventionnelles. Les déplacements effectués à l'automne par le PIDN et le PIDR sont restreints à certaines régions principalement localisées en forêt boréale et ils sont majoritairement liés à la dispersion juvénile (Dumas *et al.* 2024). En comparaison, la plupart des passereaux néotropicaux franchissent de très grandes distances et finissent conséquemment par passer dans des secteurs plus habités et accessibles à l'instauration de suivis. Les effectifs de PIDN et PIDR en déplacement sont moindres lorsqu'on les compare aux espèces couramment capturées aux stations de baguage (Yunick 1985; Kaschube *et al.* 2022). Au Québec, le PIDN niche dans des secteurs forestiers récemment brûlés ainsi que dans de vieilles forêts d'Épinette noire (*Picea mariana*), de Pin gris (*Pinus banksiana*) et de Sapin baumier (*Abies balsamea*) avec un apport suffisant en bois morts (Tremblay *et al.* 2015a). Une concentration importante en bois mort ou en état de sénescence avancée est essentielle dans l'habitat du PIDN pour s'y alimenter et y excaver des cavités nécessaires à la nidification. Similairement, le PIDR fréquente les vieilles forêts d'Épinette noire du territoire québécois qui comportent un recrutement régulier de tiges récemment mortes (Lamarre et Tremblay 2021). À la fin

de la saison de nidification, on suppose que les jeunes, devenus autonomes, sont expulsés du territoire de nidification. Ainsi, ils doivent trouver un territoire non occupé avec les ressources caractérisant leur niche écologique, telles qu'une densité suffisante en bois de conifères récemment morts. Il est généralement admis que cette recherche d'habitat par les juvéniles de l'année est à l'origine des mouvements automnaux chez ces espèces habituellement classifiées comme « résidentes », ce qui facilite la colonisation de nouveaux habitats (Huot et Ibarzabal 2005; Tremblay *et al.* 2015b; Siegel *et al.* 2015; Dumas *et al.* 2024).

Dans l'est du Québec-Labrador, il est attendu, en période automnale, que les individus en déplacement vers le sud se butent aux rives du fleuve Saint-Laurent (Ibarzabal *et al.* 2009; Gagnon *et al.* 2011). Certains passereaux migrateurs nocturnes peuvent entreprendre la traversée du fleuve afin d'atteindre la péninsule gaspésienne. Cependant, plusieurs de ces individus et les migrateurs diurnes décident plutôt de longer la Côte-Nord afin d'éviter de traverser cette vaste étendue d'eau (Haugh et Cade 1966; Gagnon *et al.* 2011). Ainsi, bien qu'ils soient localisés et de faible ampleur, ces mouvements sont détectables à certains endroits, favorisant la concentration des individus (par exemple les dunes de Tadoussac). En effet, les captures effectuées par l'Observatoire d'Oiseaux de Tadoussac (OOT) de 2000 à 2006 témoignent bien de l'emplacement stratégique que constitue Tadoussac. En somme, 78,3% (n = 114 ind./année) des PIDR et 36,0% (n = 205 ind./année) des PIDN capturés en Amérique du Nord durant cette période l'ont été à l'OOT (Dumas *et al.* 2024). Les données de structure d'âge obtenues lors de ces captures permettent également de confirmer l'hypothèse d'une dispersion juvénile puisqu'il s'agissait presque uniquement d'individus de première année (Adulte:Juvénile ; PIDN 1:13,9 ; PIDR 1:16,7) (Dumas *et al.* 2024). Les connaissances sont assez complètes pour ce qui est du sexe et de l'âge des individus capturés lors de ces mouvements. Cependant, les méthodes utilisées restent inappropriées en ce qui a trait à fournir des informations sur l'habitat d'origine des pics capturés en dispersion. En tenant compte de l'immensité du territoire d'où proviennent ces pics lors des mouvements automnaux, acquérir des données sur leur habitat d'origine permettrait une meilleure compréhension de leur écologie et de la dynamique des populations par le biais d'une connaissance accrue du phénomène de dispersion juvénile. En reliant chaque individu à son habitat d'origine, nous pouvons approfondir notre compréhension des

dynamiques et des interactions entre ces pics et la forêt boréale. Cette approche nous permettrait d'examiner comment différents facteurs écologiques ou environnementaux influencent les mouvements automnaux des pics. Dans le cas présent, les perturbations naturelles telles que les feux ou les invasions d'insectes, comme les tordeuses des bourgeons de l'épinette (TBE) sont à considérer, autant que les interventions humaines, comme la coupe forestière. En analysant ces associations, nous pourrions mieux cerner les différents aspects, problématiques ou spécificités inhérentes à certains enjeux de conservation liés à l'écologie de ces deux espèces de pics.

1.3. Analyses des composantes retrouvées sur les rectrices

Lors de leur déplacement le long des troncs d'arbres, les pics se servent de leurs rectrices très rigides comme troisième point d'appui en plus de leurs pattes (Fujita *et al.* 2007). Par ce fait, les rectrices constituant la queue d'un pic sont en contact direct avec leur environnement durant une bonne partie de leurs déplacements sur les arbres. Il est raisonnable d'envisager que ce frottement prolongé des plumes avec la surface des écorces des arbres puisse engendrer une accumulation de divers composés chimiques présents sur ces surfaces. Ainsi, les plumes pourraient agir comme un écouvillon qui serait passé à répétition sur la surface de troncs d'arbre. Quoique les rectrices elles-mêmes n'ont jamais fait l'objet d'étude chromatographique à notre connaissance, les plumes ont déjà été largement utilisées dans divers contextes afin de développer des méthodes d'analyse biochimique chez les oiseaux. Parmi les plus communément mis en œuvre, l'analyse des plumes a été utile dans des contextes de contamination de métaux lourds et autres polluants (Martínez *et al.* 2012; Rutkowska *et al.* 2018). En s'outillant de techniques et d'appareils appropriés, l'étude de certains composés jusqu'à présent peu connus de la biologie de ces espèces cryptiques est désormais envisageable en vue de déterminer leurs habitats préférentiels. En effet, ces plumes offrent la possibilité d'extraire et d'analyser les composés qui s'y sont accumulés afin de les associer aux environnements fréquentés. Parmi les composantes retrouvées sur les plumes, les oléorésines sont celles qui se prêtent le mieux à une étude détaillée de leur nature et de leur composition, étant possible de décrire les différentes molécules qui les composent (Sutton *et al.* 1997; Karanikas *et al.* 2010).

1.4. Analyse des oléorésines par GC-MS

Les oléorésines jouent un rôle important dans la défense de la plante contre les blessures, les infections microbiennes et les attaques d'insectes saproxyliques (Béland *et al.* 2019). Elles sont composées principalement de terpènes avec des structures et abondances variées selon les espèces de conifères. Bien qu'essentiellement composé de mono- et de diterpènes (Keeling et Bohlmann 2006; Zulak et Bohlmann 2010; Celedon et Bohlmann 2019), des tri- et même des tétraterpènes ont été détectés dans l'oléorésine du sapin (Lavoie *et al.* 2013). En raison de la nature poreuse des plumes de queue, constituées de β -kératine, celles-ci ont tendance à accumuler des particules de résine lorsqu'elles entrent en contact avec la surface des arbres (Greenwold et Sawyer 2010). Également, la texture visqueuse de ces substances favorise cette accumulation puisqu'elles auront probablement encore plus tendance à adhérer aux plumes lors du frottement (Keeling et Bohlmann 2006). De plus, l'évaporation de leurs composées volatiles devrait aider à solidifier l'oléorésine qui adhèrera solidement à la plume (Langenheim 2004). La composition moléculaire de l'oléorésine est spécifique à chaque essence d'arbre et permet une identification de l'essence productrice à partir d'un simple échantillon (Lewinsohn *et al.* 1993).

Le frottement continu des rectrices sur les troncs d'arbre lors des déplacements des pics, couplé à la nature absorbante de la plume, laisse supposer qu'il puisse s'y accumuler suffisamment de résines pour en faire une analyse par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (GC-MS). Cette technique permet d'identifier et de quantifier les différentes composantes moléculaires présentes dans un échantillon choisi (Sparkman *et al.* 2011). Le GC-MS a été préalablement utilisé dans une grande quantité d'études portant sur la composition chimique des oléorésines chez les gymnospermes de la forêt boréale (Pichette *et al.* 1998, 2006; Garneau *et al.* 2012; Poaty *et al.* 2015). Parmi ces études, celle de Pichette *et al.* (1998) s'est penchée sur des forêts avec les mêmes compositions en espèces de gymnospermes que celles qui caractérisent les forêts fréquentées par le PIDN et le PIDN, soit le Pin gris (PIG), l'Épinette noire (EPN) et le Sapin baumier (SAB). Les compositions et les abondances relatives obtenues en oléorésines ont permis à Pichette *et al.* (1998) d'identifier chacune de ces espèces de conifères par analyse au GC-MS. En

supposant une accumulation suffisante en oléorésine sur les rectrices, il est alors raisonnable d'envisager l'identification des principales espèces d'arbres présentes sur un échantillon de plume. De plus, la composition souvent quasi monospécifique en espèces retrouvée en forêt boréale de conifères, à l'échelle du domaine vital des pics échantillonnés pour cette étude (Saucier *et al.* 2003; Tremblay *et al.* 2010; Lamarre et Tremblay 2021) limite le nombre d'oléorésines différentes sur leurs rectrices et offre ainsi la possibilité d'identifier l'espèce de conifère dominante dans l'habitat utilisé par un pic donné.

Ces analyses devraient ainsi permettre de relier un individu échantillonné à l'essence d'arbre dominante de son domaine vital. Dans le cas où cette identification par les composés chimiques contenus sur la rectrice soit concluante, il deviendrait alors possible d'associer un individu au type d'habitat principalement fréquenté, sans avoir à recourir à d'autres méthodes. Nous espérons ainsi acquérir de plus amples connaissances sur l'origine des individus capturés lors de la dispersion juvénile, puisqu'il deviendrait possible de retracer leur habitat d'origine à l'aide d'un simple échantillon de rectrice.

1.5. Objectifs et hypothèses

Afin de répondre aux questions de provenance rattachées aux mouvements de dispersion automnaux chez le PIDN et le PIDR, cette étude exploratoire vise à aborder les objectifs suivants :

- 1) analyser par GC-MS les composantes moléculaires d'oléorésines retrouvées sur les rectrices des pics en les comparant avec des extraits d'oléorésine tirés directement de leur habitat de nidification et 2) de pouvoir relier par analyse au GC-MS, la composition en oléorésines retrouvées sur les rectrices d'un jeune pic de l'année en dispersion automnale avec un habitat correspondant à l'origine de ce même individu. La signature moléculaire des échantillons de rectrice devrait contenir un assemblage de terpènes similaires à ceux issus des prélèvements d'oléorésines provenant des écorces de l'habitat. Cet ensemble de molécules devrait également partager des similarités avec les échantillons de résine d'une essence de conifère spécifique, associée au type d'habitat de provenance. Nous émettons par le fait même l'hypothèse que ces signatures moléculaires associables aux oléorésines d'une essence dominante de conifère retrouvée sur le territoire de

nidification du PIDN et du PIDR seraient encore présentes et identifiables sur les retrices prélevées lors des captures de jeunes récemment expulsés du territoire et en dispersion automnale.

2. MÉTHODOLOGIE

2.1. Période et lieu d'échantillonnage

2.1.1. Nidification

La prise d'échantillons a été effectuée sur une période de deux ans (2021-2022), composée d'une partie en fin de printemps, soit de mai à la mi-juin, et d'une seconde de la mi-septembre jusqu'à la première semaine de novembre. Ces deux périodes ont été sélectionnées puisqu'elles permettent d'échantillonner les pics dans leur habitat de nidification au printemps et lors de la dispersion automnale des jeunes de l'année.

La majorité des échantillons proviennent du domaine de la pessière à mousses dans un secteur d'une quinzaine de kilomètres de rayon autour du camp Pékan (50,652550, -70,203602 ; site 1, Figure 1) situé dans la MRC du Fjord-du-Saguenay. Le paysage forestier de ce secteur est dominé par l'Épinette noire, avec également du Sapin baumier et du Pin gris. Quoique les deux espèces de *Picoides* se retrouvent dans ces habitats de la boréale québécoise, les efforts de capture ont été concentrés vers le Pic à dos noir puisqu'il s'agissait du sujet d'étude des projets de recherche partenaires lors de la récolte de données. Afin de diversifier les habitats échantillonnés, des prélèvements ont parallèlement été effectués dans des peuplements de Pin gris (48,5819632, -71,185187 ; site 2, Figure 1) situés sur de vastes dépôts deltaïques de la mer de Laflamme bordant les grandes rivières affluentes du Lac-Saint-Jean (Harland *et al.* 1985). La période de nidification s'étale sur quelques semaines, entre la fin de mai et le début de juillet. Durant cette période, les pics ont été capturés à l'aide d'un montage de filets japonais (6-9 m × 2,6 m) avec des mailles de 60 mm fixés à des tiges de bambou de 3 m. Le montage a été installé à divers endroits du secteur ciblé où l'habitat était principalement monospécifique (composition d'espèces arborescentes de conifères) et propice à la nidification de l'une ou l'autre des deux espèces de pics.

2.1.2 Dispersion des juvéniles

Les échantillons ont été récoltés à la station de baguage de l'Observatoire d'oiseaux de Tadoussac (OOT ; 48,1579631, -69,6649504 ; site 3, Figure 1), situé aux Dunes de Tadoussac, de la mi-septembre jusqu'à la première semaine de novembre. Cette période correspond à l'optimum du mouvement de dispersion des pics juvéniles aux Dunes de Tadoussac (Huot et Ibarzabal 2005; Dumas *et al.* 2024). À ce site, plusieurs filets étaient déjà en place afin de capturer des nyctales et des ictéridés, utilisant pour ce faire des tailles de maille compatibles pour la capture de PIDN et PIDR, soit 30 mm. Les filets y étaient installés en quadrilatère, formant ainsi une enceinte.

Afin d'inciter les individus à entrer dans l'enceinte, un haut-parleur FoxPro (FoxPro NX4) placé à un mètre du sol y diffusait de la repasse de cris et du tambourinement des deux espèces de pics à capturer. Cela incitait les pics à se prendre dans le filet lorsqu'ils plongeaient de leur perchoir vers la source de la repasse (Dumas *et al.* 2024). Les individus capturés sont rapidement extraits du filet et placés dans une poche de tissus en coton individuelle en attendant d'être bagués, âgés, sexés et mesurés (longueur d'aile et de queue, masse, culmen ; selon Pyle, 1997). Les manipulations sur les rectrices sont ensuite effectuées selon les étapes décrites plus loin.

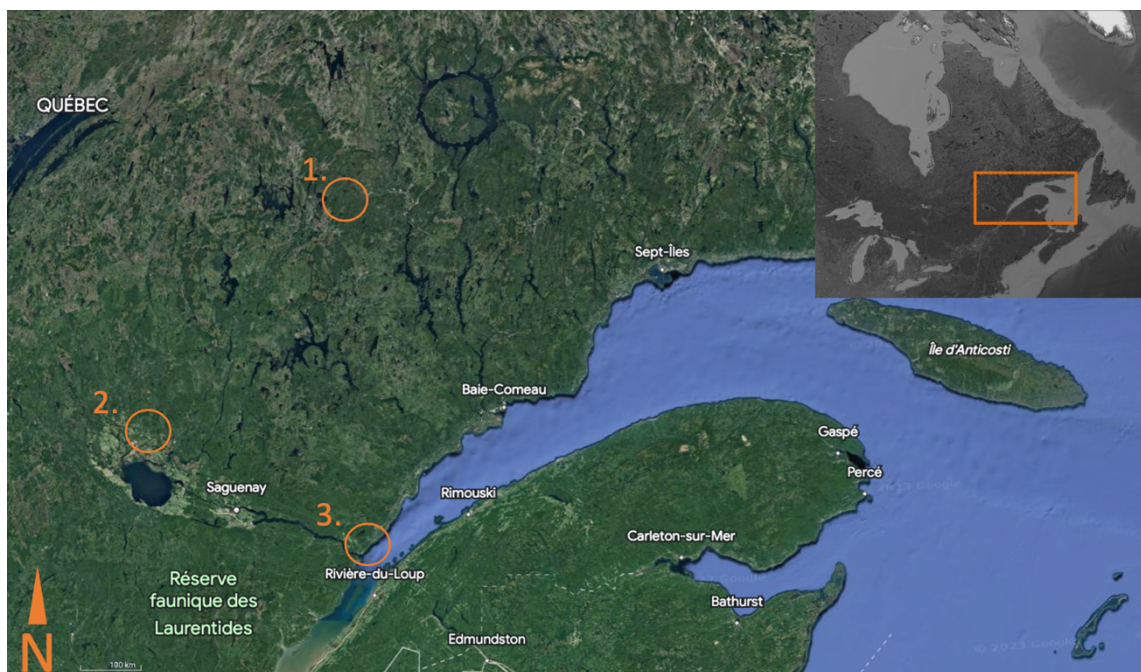


Figure 1 : Répartition des sites d'échantillonnage dans l'est du Québec. (1) camp Pékan, Pessière noire à mousses (pics : $n = 33$; écorces : $n = 29$); (2) Pinèdes grises du Lac-St-Jean (pics : $n = 4$; écorces : $n = 3$); (3) Dunes de Tadoussac, OOT (pics : $n = 39$)

2.2. Échantillonnage sur les rectrices

Le prélèvement des échantillons se déroulait en deux étapes similaires. La première consistait à mettre en solution les oléorésines retenues sur l'extrémité des rectrices des pics, qui seraient ensuite analysés par GC-MS. Le solvant organique, l'hexane, a été choisi pour sa capacité à solubiliser les oléorésines (Silva *et al.* 2009). Ainsi, l'extrémité de la rectrice centrale droite (R1d; approx 5 cm²; Figure 2) était immergée dans l'hexane pendant 30 secondes, tout en agitant doucement la fiole pour libérer les oléorésines. La plume utilisée pour cette étape reste sur l'oiseau, mais est méticuleusement nettoyée à la fin, afin d'éliminer toute trace d'hexane sur le plumage avant de relâcher l'oiseau. Les fioles étaient ensuite fermées hermétiquement et étiquetées avec les informations sur l'individu capturé, incluant le numéro de bague, l'espèce, le lieu et la date de capture.

La seconde étape a été réalisée uniquement en période de nidification au printemps. En effet, après avoir échantillonné les oléorésines sur la rectrice centrale d'un oiseau, nous avons prélevé un échantillon des oléorésines sur un arbre représentatif de l'essence dominante dans l'habitat où le pic a été capturé. Pour cela, un morceau d'écorce d'environ 1 cm × 1 cm a été retiré de l'arbre à l'aide

de pince de dissection métallique et placé directement dans une fiole contenant de l'hexane. Après agitation pendant 30 secondes, le morceau d'écorce était retiré à l'aide de pinces propres, et la fiole fermée hermétiquement. L'espèce de l'arbre échantillonné était identifiée, ainsi que le lieu et la date de récolte.



Figure 2 : Pic à dos rayé en vue d'ensemble ci-haut, suivi d'un agrandissement sur les rectrices à la suite des manipulations. (A) Rectrice centrale de droite, immergée d'hexane.

2.3. Traitement en laboratoire

L'analyse chimique des échantillons a été effectuée dans les laboratoires de recherche en chimie de l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC). La préparation des échantillons bruts

provenant du terrain impliquait uniquement un transfert des solutions dans des fioles de 2 mL adaptées pour les analyses GC-MS. En effet, la concentration des solutions d'hexane par évaporation a été envisagée, mais cette idée n'a pas été retenue afin d'éviter de modifier le profil des molécules de l'oléorésine par évaporation des constituants les plus volatils. Le volume à insérer dans ces fioles n'a pas besoin d'être exact, puisque l'appareil GC-MS est programmé pour prélever un volume précis. Le transfert a donc été fait pour tous les échantillons à l'aide de pipette Pasteur remplacée entre chaque fiole pour éviter de contaminer les échantillons entre eux. Un total de 108 fioles d'hexane contenant des échantillons de rectrices de pic ($n = 76$) et d'écorce ($n = 32$) a été préparé pour l'analyse par GC-MS. De plus, deux fioles remplies seulement d'hexane afin de servir de blanc ont été injectées.

Tous les échantillons ont ensuite été analysés à l'aide du GC-MS 5977C GC/MSD (Agilent 2022a) pairé au logiciel *Masshunter Unknown Analysis* (Agilent 2022b), fournissant les résultats quant à la composition moléculaire de chaque injection d'hexane. Plusieurs séances de test ont été faites afin d'obtenir une programmation optimale des paramètres du GC-MS permettant une analyse des composés résiniques associés aux essences de conifère de la forêt boréale de l'Est (Tableau 1).

Tableau 1 : Paramètres optimaux pour l'analyse des composés d'oléorésines par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse.

Appareil	Paramètre	Méthode utilisée
GC	Type de colonne	DB-5MS
	Programmation de température de la colonne	80 °C pendant 1 min
		80 à 150 °C à 7 °C/min
		150 à 300 °C à 50 °C/min
		300 °C pendant 5 min
	Température de l'injecteur	260 °C
	Gaz porteur	Hélium (He)
	Débit du gaz porteur	1 mL/min
	Mode injection	Split mode (10:1)
	Volume injecté	5 µL
MS	Énergie cinétique des électrons	70 eV

Ces données sont représentées sous forme de chromatogrammes et de spectres dans le logiciel MSD ChemStation (G1701CA; version C.00.00; Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA) et qui peuvent être comparés aux spectres et informations contenues dans la banque de données NIST (NIST/EPA/NIH, Mass Spectral Library, version 1.7, CA, USA), permettant une identification probante des différents composés (Adams 2005; Sparkman *et al.* 2011). La dernière étape avant l'obtention des résultats est l'analyse de chaque chromatogramme obtenu afin d'en identifier les composés et leur abondance relative. Ces données sont regroupées dans un tableau comprenant tous les échantillons, soit écorce et rectrice, en y associant les différentes variables à l'étude, telles que la provenance, l'espèce de pics ou l'essence de conifère (annexe 1).

2.4. Analyses statistiques

Les analyses prévues sont une PERMANOVA entre les essences d'arbre afin de noter ou non une distinction entre les trois essences composant l'habitat des *Picoides*. Si cette première analyse s'avère concluante, une seconde étape prévue est la même analyse, mais cette fois entre les échantillons de rectrices pairées à un échantillon d'écorce provenant du même site. En s'appuyant sur ces deux analyses statistiques, complémentées d'une NMDS (*Non-metric MultiDimensional Scaling* ; positionnement multidimensionnel non-métrique) permettant de visualiser les distinctions entre les groupes, l'analyse culminante serait de comparer les résultats chromatographiques des rectrices récoltées lors de la dispersion avec ceux des essences d'arbres du territoire de nidification. Une analyse par composantes principales associées à une PERMANOVA a été faite à partir de la base de données produites, mais quelques problèmes au sein de celle-ci ne permettaient pas de produire l'analyse. La principale problématique était une proportion trop grande de zéros dans de nombreux échantillons, s'élevant à 93% de l'ensemble des données (Anderson 2001; Quinn et Keough 2002). L'effet de cette caractéristique du jeu de données était que certains échantillons étaient presque vides. Conséquemment, ces échantillons contenant peu de molécules se trouvaient à avoir des coefficients de corrélation très grands entre eux, partageant souvent les mêmes molécules. Une représentation visuelle produite où la quasi-totalité des points se retrouve concentrée

dans un regroupement serré illustre bien cet enjeu (Figure 3). Les transformations habituellement de mise, telle qu'un $\log^{-1}$, se sont avérées inaptes à résoudre les problématiques inhérentes au jeu de données (Quinn et Keough 2002).

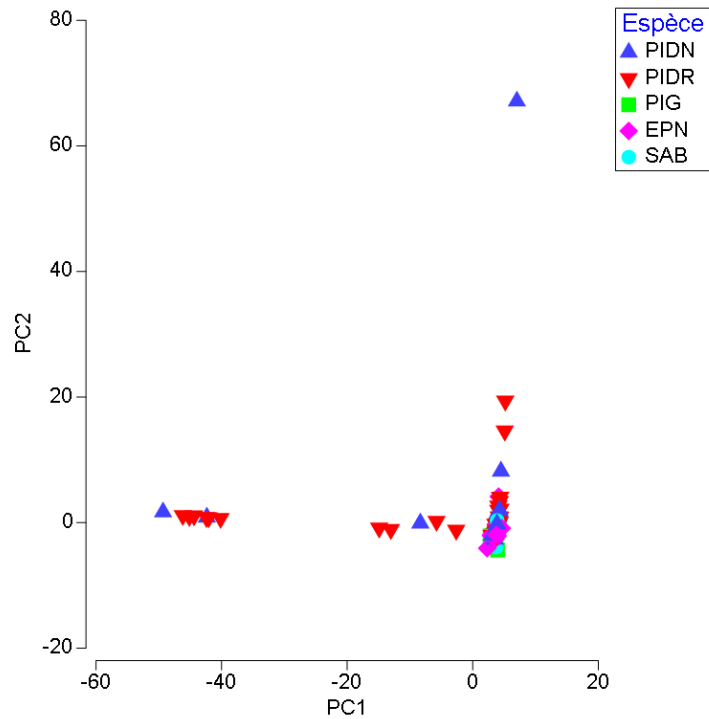


Figure 3 : NMDS produite à partir des données GC-MS obtenues dans la matrice, témoignant de la forte corrélation entre échantillons engendrée par la proportion trop grande de zéros.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Échantillonnage des *Picoides* et des essences d'arbre

L'échantillonnage des espèces de pics et les essences d'arbre s'est effectué selon les sites offrant l'opportunité de capturer et d'échantillonner un nombre optimal d'oiseaux. Cette planification opportuniste des captures influence l'échantillonnage vers une proportion plus importante de pics provenant d'habitat de nidification situé en pessière noire. Le camp Pékan constitue le site à travers les divers territoires de nidification où l'effort en termes de jours de capture fut le plus important. S'étalant sur deux semaines durant l'année 2021 et 2022, c'est au cumulatif 14 jours de capture qui ont été effectués lors de ces deux années. Au moment de la prise d'échantillons, il a été constaté que l'assemblage forestier entourant le camp Pékan contenait des peuplements présentant du Sapin baumier et du Pin gris, permettant une diversification de l'échantillonnage avec quelques pics capturés dans ces habitats distincts. L'accent mis sur le PIDN est à considérer lorsque vient le temps de justifier la différenciation retrouvée au sein des effectifs de captures au camp Pékan. Au cumulatif, c'est 24 PIDN qui ont été capturés par rapport à 9 pour les PIDR, soit un écart de 16 individus (Tableau 2). L'effort de capture dans les pinèdes autour du Lac-Saint-Jean (LSJ) s'est trouvé restreint à l'année 2022 et ne s'étale que sur quatre matinées, expliquant la faible taille d'échantillonnage pour cet habitat (Tableau 2). Le Pic à dos rayé n'étant pas une espèce typiquement retrouvée dans ce type d'habitat forestier, l'espèce ciblée lors de ces séances de capture était le Pic à dos noir. Ce dernier est quant à lui un nicheur connu des forêts de Pins gris du Lac-Saint-Jean (Imbeau *et al.* 1999; Imbeau et Desrochers 2002; Tremblay *et al.* 2015a). Comme attendu, l'entièreté des captures effectuées dans les pinèdes du Lac-Saint-Jean est composée de Pics à dos noir (Tableau 2). Deux des quatre individus composant cette partie de l'échantillonnage proviennent du même environnement puisqu'il s'agit d'un couple échantillonné au nid.

Tableau 2 : Échantillonnage des Pics à dos noir, des Pics à dos rayé et des espèces de conifères caractérisant l'habitat de nidification selon les régions de provenance.

	Camp Pékan		Pinèdes Lac Saint-Jean	Tadoussac		Total
	2021	2022	2022	2021	2022	
PIDN	9	15	4	1	3	32
PIDR	6	3		25	10	44
PIG		1	3			4
SAB		4				4
EPN		24				24
Total	15	47	7	26	13	108

Dans le cas des captures d'oiseaux lors de la dispersion automnale, les effectifs d'individus en déplacement lors des automnes 2021-2022 sont plus grands pour le PIDR que pour le PIDN, influençant l'échantillonnage vers une source de données accrues pour les PIDR en dispersion (Tableau 2). Ce débalancement entre les deux espèces est un effet inattendu de la variabilité interannuelle des mouvements de dispersion juvénile chez ces deux espèces de *Picoides* (Dumas *et al.* 2024). Cette différence dans les effectifs de captures entre les deux espèces de pic peut aussi être attribuée à certaines différences comportementales lors de la migration. Le Pic à dos noir a été observé plus souvent à haute altitude, survolant rapidement le secteur avec des filets, témoignant peut-être d'un passage plus bref et au-delà de la hauteur des filets. Quant au Pic à dos rayé, il était plus rare de le voir survoler les dunes de Tadoussac, passant possiblement plutôt à basse altitude à travers le milieu forestier, ayant conséquemment plus de chance de se prendre dans les filets. Ces deux espèces sont également connues pour avoir des années d'irruptions, moments où des nombres hautement supérieurs aux moyennes annuelles sont répertoriés à l'automne et à l'hiver, souvent à des latitudes beaucoup plus au sud qu'habituellement (Yunick 1985). L'automne 2021 a permis un nombre plus important de captures de pics que 2022 (Tableau 2), mais dans les deux cas il s'agissait d'années de faible abondance, si l'on compare aux captures effectués en 2004-06 au même site (Dumas *et al.* 2024). La caractère éruptif et imprévisible de ces mouvements a donc engendré une représentation inégale des espèces dans les données. En effet, lors de la période de nidification on

observe une dominance en captures de PIDN alors que l'échantillonnage automnal est largement dominé par le PIDR.

Tableau 3 : Répartition des sexes pour les individus de PIDN et PIDR capturés, selon les sites de capture.

	Femelle	Mâle	Total
PIDN			
Pinèdes LSJ	2	2	
Camp Pékan	11	13	32
OOT	1	3	
PIDR			
Camp Pékan	3	6	44
OOT	11	24	
Total	28	48	76

Au cumulatif, un nombre plus important de mâles que de femelles a été capturé (Tableau 3). Cette différence dans le ratio des sexes est involontaire et il ne semble pas y avoir de raison qui justifierait que cela ait un impact sur l'étude des oléorésines. Effectivement, selon une étude d'Imbeau et Desrochers (2002), le comportement alimentaire chez le PIDR est similaire pour les deux sexes. Aucune différence notable ne permet d'envisager que l'accumulation d'oléorésines aux rectrices diffère. Pareillement pour le PIDN, qui ne présente pas de différenciation sexuelle marquée relative aux comportements alimentaires (Villard 1994; Tremblay *et al.* 2010). Autant au niveau des mensurations, la longueur des rectrices est semblable entre les sexes (Ridgway 1919; Koenig 1983). Il est ainsi possible d'écarter le risque d'une accumulation différée de résine entre les deux sexes, attribuable à des différences morphologiques. Un facteur d'intérêt relié aux caractéristiques de l'échantillonnage de pics est l'âge des oiseaux capturés. Tous les oiseaux capturés en début de saison de reproduction appartiennent à une classe considérée adulte, 14 SY et 23 autres qui ont plus de deux ans (ASY; Tableau 4). Il existe une différence marquée dans la structure d'âge des individus capturés au printemps et ceux capturés à l'automne à l'OOT. En effet, à l'exception de deux individus adultes, tous les pics en dispersion capturés à l'automne sont des individus de première année (37 HY; Tableau 4). Une étude récente soutient que ces individus soient en dispersion juvénile

(Dumas *et al.* 2024). Il s'agit des jeunes qui quittent leur habitat de naissance à la recherche d'un nouveau territoire offrant les ressources nécessaires (Huot et Ibarzabal 2005; Tremblay *et al.* 2015a; Siegel *et al.* 2015). Les données d'âge recueillies lors du baguage automnal effectué pour ce projet appuient cette hypothèse puisque la classe d'âge largement dominante est composée d'individus de première année (~ 95% HY les deux espèces confondues ; Tableau 4) similaires aux proportions de Dumas *et al.* (2024); 93% pour le PIDN et 94% pour le PIDR.

Tableau 4 : Répartition des âges pour les individus capturés selon la période du cycle annuel. HY : première année (*Hatching year*) ; AHY : plus que la première année (*After Hatching Year*) ; SY : deuxième année (*Second Year*); ASY : après la deuxième année (*After Second Year*) ; TY : troisième année (*Third Year*) ; ATY : après la troisième année (*After Third Year*).

	OOT		Camp Pékan & Pinèdes LSJ				
	HY	SY / ASY	SY	ASY	TY	ATY	n.a.
PIDN	4		12	8	2	5	1
PIDR	33	2	2	6			1
	37	2	14	14	2	5	2

Périodes de capture : OOT – septembre-novembre; Camp Pékan, Pinèdes LSJ – Mai-Juin.

3.2. Molécules d'intérêt des résultats chromatographiques

La base de données obtenue à partir de l'analyse des résultats chromatographiques fournit une matrice comprenant les 108 analyses chromatographiques réussies, incluant deux blancs servant à éliminer les molécules non pertinentes aux analyses. Les molécules déjà présentes dans le blanc sont éliminées puisqu'elles ne proviennent pas des oiseaux ou des écorces échantillonnés. L'appareil a détecté la présence de 848 molécules qui sont inventoriées selon leur concentration dans chaque volume de 5 µL d'échantillon injecté au GC-MS. Les concentrations obtenues étaient toutefois en deçà du seuil de détection d'analyse au GC-MS (1mg/1mL). Les analyses des résultats n'utilisent donc pas leur concentration au sein de l'échantillon, mais plutôt la fréquence à laquelle se retrouve chaque molécule à travers les différents échantillons. À la suite de l'élimination des molécules retrouvées dans les deux blancs, il reste un total de 835 molécules pouvant être associées

aux sujets d'étude. La présente discussion n'aborde toutefois dans le détail que huit de ces molécules, répertoriées dans le tableau 5, puisque ce n'est pas l'ensemble qui a pu être identifié avec un pourcentage de confiance suffisant avec la banque de référence NIST (> 20%).

3.2.1. Terpènes des conifères de la boréale de l'Est

Parmi les molécules identifiées, certaines sont particulièrement connues pour provenir des oléorésines produites par les conifères de la forêt boréale de l'Est. Parmi les monoterpènes présents, les deux molécules qui se retrouvent avec une fréquence élevée sont le α -pinène et le β -pinène, se retrouvant respectivement dans 66% et 58% des échantillons. Leur fréquence se retrouve de plus à travers les différents types d'échantillons, autant pour les arbres que pour les oiseaux. Elles se retrouvent dans les oléorésines en quantité suffisante chez les trois espèces de conifères à l'étude pour être détectées avec constance par le GC-MS, même à faible concentration (Pichette *et al.* 1998, 2006; Poaty *et al.* 2015). C'est d'ailleurs ce qui explique qu'on les retrouve à une fréquence importante sur les échantillons de rectrice, soit près de 45%, et ce, malgré que ces échantillons contiennent normalement une concentration moindre de résines. Cependant, elles demeurent présentes avec des pics chromatographiques de faible intensité au sein des chromatogrammes. Effectivement, malgré une fréquence importante à travers divers types d'échantillon, qui a tout de même permis une identification sûre avec la banque de référence NIST (Figure 4), les concentrations auxquelles on les retrouve ne sont pas aussi grandes qu'attendu selon les résultats obtenus par des études antérieures sur ces mêmes essences (Pichette *et al.* 1998; Garneau *et al.* 2012; Poaty *et al.* 2015). En particulier sur les échantillons d'écorce, le α -pinène et le β -pinène devaient être présents à des concentrations et des récurrences suffisamment importantes pour arriver à reconnaître des différences interspécifiques entre les trois essences d'arbre (Pichette *et al.* 1998; Garneau *et al.* 2012). Parmi les différences attendues, une abondance supérieure en α -pinène dans les échantillons provenant d'habitat de Pin gris, sa concentration dans cette oléorésine surpassant naturellement celles des deux autres essences à l'étude (Pichette *et al.* 2006; Poaty *et al.* 2015). La récurrence de ces monoterpènes sur les rectrices demeure un résultat d'intérêt. Retrouver des constituants d'oléorésines de conifères sur des oiseaux fréquentant exclusivement des forêts de pins, de sapins ou d'épinettes témoigne de l'accumulation des résines propres à ces arbres. Ce fait confirme la

première hypothèse quant au transfert des oléorésines se retrouvant à la surface des troncs de conifères vers les rectrices de *Picoides*.

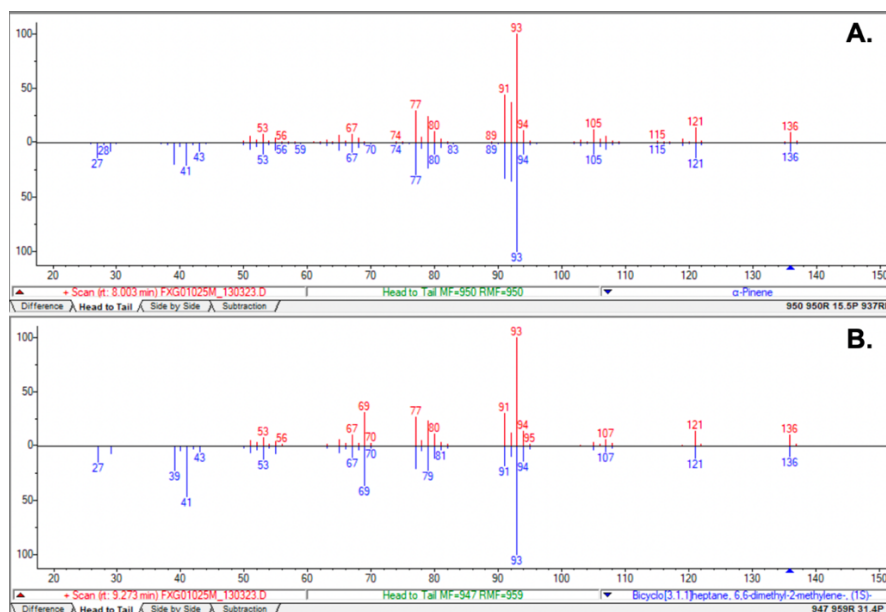


Figure 4 : Comparaison des spectres de masse obtenus dans un échantillon d'Épinette noire échantillonné en 2022 près du camp Pékan (en rouge) avec les spectres de masse de la banque NIST en référence (en bleu). A : α -pinene ; B : β -pinène. En abscisse : rapport charge/masse (m/z) ; en ordonné : intensité du signal.

Corollairement, d'autres molécules associées aux oléorésines de conifères se retrouvent parmi les résultats chromatographiques provenant d'échantillons de rectrices. Le limonène, un diterpène associé aux oléorésines des conifères a été identifié dans quelques-uns des échantillons (Amaral et Knowles 1998; Pichette *et al.* 2006; Yasmeen *et al.* 2011). Quoiqu'il y soit moins abondant naturellement et conséquemment restreint à une récurrence plus faible dans les échantillons que certains autres monoterpènes, sa présence répétée à travers différentes extractions de rectrices soutient l'accumulation des composantes d'oléorésine sur le plumage des oiseaux. Le p-cymène retrouvé dans les échantillons suggère le même concept de partage de monoterpènes moins abondants, mais néanmoins fréquemment présents dans les oléorésines des conifères. Par ailleurs, le p-cymène se retrouve en faible concentration dans l'oléorésine de l'Épinette noire et du Sapin baumier, alors que dans celle du Pin gris elle contraste par son absence (Poaty *et al.* 2015). La

présence de ce monoterpène dans nos échantillons correspond à cette distribution caractérisée par sa présence dans le Sapin baumier et l'Épinette noire, mais absente dans le Pin gris. Conformément, il n'a pas été retrouvé sur les plumes et l'écorce provenant des pinèdes, ni même dans les oiseaux de l'OOT, mais bien uniquement au sein des écorces et de certaines rectrices récoltées au camp Pékan. Son absence des oiseaux de Tadoussac peut toutefois également s'expliquer par une production différentielle des molécules dans l'oléorésine selon la saison. Il est connu que la productivité fluctue au cours d'une année, alors il pourrait y avoir une variation saisonnière dans les molécules produites qui ferait disparaître le p-cymène des échantillons en automne (Hakola *et al.* 2003; Kopaczyk *et al.* 2020). Pour ce qui est de son absence des échantillons associés au Pin gris, il s'agit d'une démonstration du potentiel que certaines molécules ont de servir en guise de données discriminantes lors de la détermination de l'habitat de ces oiseaux à partir de composantes chimiques. Une molécule spécifique à certaines essences comme celle-ci permet ainsi de tracer plus aisément un lien entre la composition chimique et l'habitat. Dans le cas des regroupements de pics chromatographiques sur les rectrices provenant de Tadoussac, la domination du cembrène soulève l'enjeu d'une accumulation dépendante de la nature de la molécule. Le cembrène étant un diterpène, celui-ci est moins volatile que les monoterpènes retrouvés dans les oléorésines (Zulak et Bohlmann 2010; Celedon et Bohlmann 2019). Il est donc vraisemblable que les monoterpènes se volatilisent plus rapidement à partir des rectrices, rendant leur détection plus difficile sur les rectrices d'oiseaux en dispersion. L'idée d'une variation saisonnière dans les oléorésines de conifères à l'étude émise plus tôt peut également être soulevée dans ce cas. Il est possible que le cembrène soit une molécule produite en plus grande quantité lors des mois d'automne, ce qui expliquerait les résultats chromatographiques obtenus.

Tableau 5 : Occurrence des principales molécules pouvant être associées à la forêt boréale de l'Est, identifiées selon les groupements de nature et de provenances des échantillons ainsi que leur numéro CAS, inscrit entre parenthèses (Poaty et al. 2015).

	Plumes			Écorce		
	Tadoussac	Pékan	Pinède LSJ	EPN	SAB	PIG
Acide atrarique (4707-47-5)	x	x	x	x	x	
α -pinène (80-56-8)	x	x	x	x	x	x
β -pinène (127-91-3)	x	x	x	x	x	x
Limonène (5989-27-5)	x	x	x	x	x	
p-Cymène (99-87-6)		x		x	x	
Cembrène (1898-13-1)	x					
Camphène (79-92-5)		x		x	x	x
Acide β -pimarique (79-54-9)	x	x	x			

Quelques autres terpènes, tels que le camphène, pouvant être associés aux oléorésines des conifères à l'étude ont été répertoriés dans la base de données (Tableau 5). Similairement à l' α -pinène, la concentration du camphène est relativement plus grande dans une des essences en particulier, soit l'Épinette noire (Garneau *et al.* 2012; Poaty *et al.* 2015). Quoique la molécule soit retrouvée dans toutes les essences d'arbres, elle ne se retrouve que sur les plumes prélevées au camp Pékan, habitat de pessière à mousses largement dominé par l'Épinette noire. Cette particularité soutient l'idée que la différence d'abondance de certaines molécules entre les trois conifères étudiés puisse fournir des informations sur l'habitat de provenance des pics. Des données plus précises relatives aux concentrations de chaque molécule sont toutefois nécessaires avant de pouvoir affirmer que le lien entre les molécules retrouvées sur les oiseaux puisse les relier avec assurance à leur habitat d'origine. Ultimement, plusieurs molécules ou traits caractéristiques semblables pourraient être identifiés, tels des indicateurs pouvant être associés à certaines essences d'arbre. La combinaison de plusieurs indicateurs de ce genre sur un même échantillon de rectrice aurait ensuite le potentiel d'ouvrir la voie à une association rectrice-arbre avec un seuil de confiance acceptable. À l'aide des faibles concentrations obtenues, il a tout de même été possible d'expliquer partiellement certains résultats obtenus sur les rectrices en les reliant à la composition connue des oléorésines

des conifères étudiées. De plus amples informations et des données complémentaires auraient le potentiel d'appuyer rigoureusement les prémisses proposées.

3.2.2. Association des rectrices de pics boréaux aux lichens

En parallèle, un résultat obtenu à partir des chromatogrammes vient appuyer l'hypothèse de l'accumulation de substances de l'environnement sur les rectrices des *Picoides* sans toutefois faire d'association avec les oléorésines. Il s'agit de la présence d'un pic chromatographique récurrent majoritairement chez les oiseaux, en particulier chez le PIDN, avec parfois des abondances importantes. En comparant les spectres de masse avec la banque de référence NIST, l'identification est constante sur l'acide atrarique. La particularité inhérente à la présence de cette molécule dans les échantillons est qu'elle ne se retrouve pas naturellement dans les oléorésines. La provenance de cette molécule est plutôt associée aux lichens, qui se retrouvaient souvent sur les troncs de conifère échantillonnés. Il s'agirait d'un métabolite secondaire des lichens, dont le précurseur est l'atranorine (Bourgeois *et al.* 1999). La présence occasionnelle sur les échantillons d'écorce d'arbres, mais quasi totale pour les échantillons de rectrice s'accorde entièrement avec une provenance expliquée par un échange avec les lichens. De toute évidence, les échantillons d'écorce ont pu contenir des traces de lichens ou de leurs métabolites secondaires lors de la prise d'échantillon (Pizňak et Bačkor 2019). Il est d'autant plus vraisemblable que ce soit surtout les rectrices qui contiennent cette molécule, celles-ci pouvant être directement en contact avec les lichens épiphytiques couvrant la surface des troncs en forêt boréale (Bourgeois *et al.* 1999; Hauck 2011). Il est bien connu que les vieilles forêts, habitats des *Picoides* comprenant les trois essences forestières à l'étude (Imbeau et Desrochers 2002; Tremblay *et al.* 2015a), comportent une riche diversité de lichens, incluant certaines espèces épiphytes (Pipp *et al.* 2001; Boudreault *et al.* 2002). Quoique la documentation d'un lien direct entre l'acide atrarique et les lichens de la forêt boréale soit déficiente, la présence du précurseur atranorine est bien documentée au sein des lichens occupant la forêt boréale nord-américaine (Zraik *et al.* 2018; Pizňak et Bačkor 2019).

Une seconde particularité relative à l'acide atrarique dans l'échantillonnage est qu'il se retrouve à des concentrations très élevées seulement chez le Pic à dos noir (Figure 5). Même chez

le Pic à dos rayé de toutes provenances, aucun pic chromatographique ne s'approche des concentrations obtenues pour certains Pics à dos noir. La différence entre les pics chromatographiques dominants pour l'acide atrarique chez le Pic à dos noir en comparaison à ceux beaucoup plus petits du Pic à dos rayé trouve possiblement sa source dans certains traits comportementaux distinctifs chez ces deux espèces. Le choix du substrat d'alimentation, quoique similairement associé à la grande catégorie du bois mort, peut se distinguer à plus fine échelle. Corollairement, la colonisation des débris ligneux par les lichens et les bryophytes s'échelonne différemment au sein du paysage selon divers éléments, tels que les perturbations et l'âge du peuplement (Morneau et Payette 1989). Ainsi, quoique les lichens se retrouvent généralement dans les différents habitats de vieilles forêts, ils seront plus abondants sur certains types de débris ligneux. Étant des organismes avec une grande tolérance pour des conditions arides, ils se retrouveront sur des débris morts récents, tels que les arbres morts toujours soutenus par des branches ou les débris récemment tombés au sol. Les lichens occupent donc le rôle d'espèce pionnière, colonisant les bois morts récents ou sévèrement brûlés (Rheault *et al.* 2009). Des observations personnelles faites sur le terrain peuvent suggérer une seconde explication reliée à des distinctions comportementales entre les deux espèces. Le Pic à dos noir a été observé à de nombreuses reprises en alimentation très bas sur les troncs, voire au niveau des racines, tout autant que sur des arbres couchés, ce qui a été observé dans 41 % et 16 % des cas d'alimentation par Villard (1994) et Tremblay *et al.* (2010) respectivement. Le Pic à dos rayé ne semblant pas adopter ce type de comportement alimentaire, il est possible qu'une accumulation de métabolites produits par les lichens non épiphytiques se soit effectuée pour le Pic à dos noir seulement. Il faudrait vérifier quelles espèces de lichens de la flore québécoise produisent l'acide atrarique afin de pouvoir tracer des conclusions plus éclairées en lien avec ces distinctions.

Certaines perturbations connues de l'habitat des deux espèces de pics, telles que les feux ou les épidémies de TBE, peuvent influencer la chronoséquence floristique et engendrer une couverture des surfaces dominée par différents lichens et bryophytes (Morneau et Payette 1989; Boudreault 1997). Il est fort possible que l'utilisation des habitats post-perturbations soit différentielle à fine échelle entre les deux espèces de pics. Le changement dans les taxons de lichens au cours

de la chronoséquence floristique pourrait associer le Pic à dos noir à certains stades spécifiques de régénération, selon les lichens de la forêt boréale québécoise produisant ce métabolite secondaire. Comme soulevé plus tôt, des recherches plus détaillées sur les lichens producteurs de l'acide atrarique retrouvés dans l'habitat des pics boréaux pourraient offrir de plus amples explications.

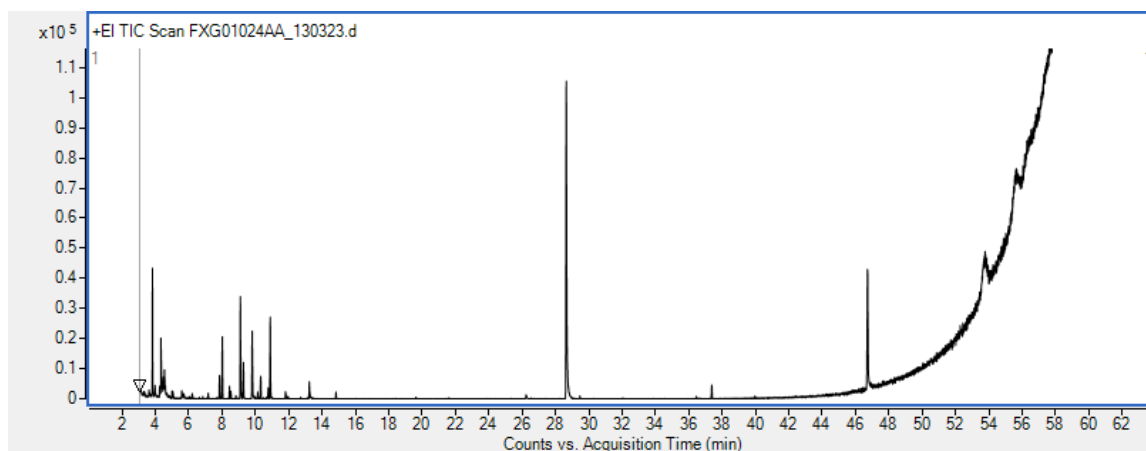


Figure 5 : Chromatogramme d'un échantillon de rectrice de Pic à dos noir capturé près du camp Pékan en juin 2022. Présence d'un pic chromatographique dominant d'acide atrarique au temps de rétention 28,6. En abscisse : temps de rétention (min) ; en ordonné : intensité du signal.

3.3. Analyse des patrons et résultats chromatographiques

Les chromatogrammes comprenant les molécules retrouvés sur les pics et les écorces offrent des patrons chromatographiques variables sur l'ensemble de l'échantillonnage (Figure 6). Il demeure ardu de les regrouper selon les objectifs établis, soit d'effectuer un pairage des différents échantillons selon l'essence dominante dans l'habitat, pour quelques raisons. De prime abord, des patrons distincts peuvent se retrouver entre certains groupements théoriques préétablis, tels que le lieu de prélèvement ou la nature de l'échantillon (i.e. pics ou arbres), résultat recherché pour permettre une différenciation entre les habitats ou espèces. Cependant, on remarque aussi une variabilité dans les patrons chromatographiques au sein même de ces groupements théoriques. Cette variabilité de patrons s'observe bien lorsqu'on considère l'ensemble des molécules et des assemblages de molécules présents sur un chromatogramme, tout en y considérant aussi les variations de concentration qui les caractérisent. On obtient ainsi certains chromatogrammes types pouvant être regroupés par leurs patrons de ressemblance, mais sans qu'il ne soit possible de les associer aux

variables qualitatives à l'étude, tel qu'une essence ou une espèce. Par exemple, il était attendu d'avoir des patrons chromatographiques semblables pour toutes les rectrices de pics provenant d'un même habitat, telles que les rectrices provenant d'habitats d'EPN dans le secteur du camp Pékan. Ceux-ci ne partagent toutefois pas le même patron chromatographique. En effet, au sein même de ce regroupement théorique, on retrouve des sous-regroupements partageant certaines particularités n'apparaissant pas dans les autres échantillons. L'absence de ressemblance récurrente au sein des échantillons d'une même variable nuit à l'établissement de signatures chromatographiques types pouvant être associées à ces variables qualitatives. Dans le cas des échantillons de rectrices récoltés dans les habitats d'EPN au camp Pékan, il n'a donc pas été possible d'établir une signature chromatographique pour cet habitat. Ce sont ces signatures chromatographiques qui devaient servir ensuite en guise de comparatifs pour les analyses subséquentes, tels des groupements de référence.

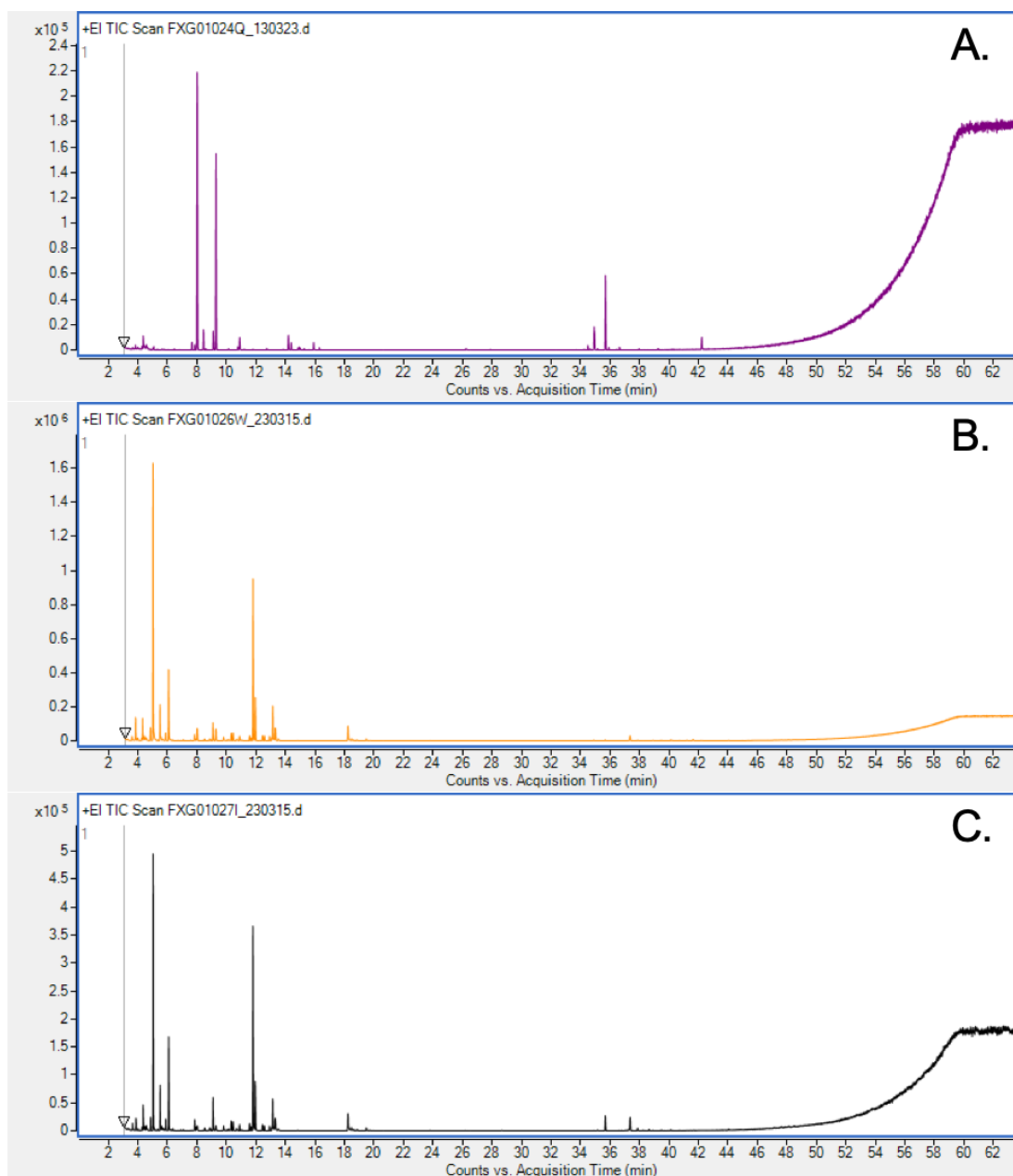


Figure 6 : Chromatogramme provenant du camp Pékan associé à un échantillon d'Épinette noire (A.), suivi de deux chromatogrammes : un de Pic à dos rayé (B.) et un second de Pic à dos noir (C.), tous deux également du camp Pékan. Ces derniers partagent un patron chromatographique similaire alors que le premier s'en distingue, malgré leur provenance commune. En abscisse : temps de rétention (min) ; en ordonné : intensité du signal.

3.3.1. Faiblesse du signal chromatographique associé aux territoires nidification

Un second facteur compliquant la lecture des données est la faiblesse du signal pour de nombreux échantillons, n'y retrouvant que très peu de molécules pouvant servir aux analyses. N'ayant que très peu de pics chromatographiques au sein de certains chromatogrammes, ou encore des pics chromatographiques à des abondances trop faibles, il est difficile d'en tirer des informations détaillées pouvant servir à l'analyse des distinctions dans la signature chimique. C'est avec les chromatogrammes associés aux échantillons effectués à même l'écorce des arbres que cet enjeu est le plus critique. Le but visé avec ce type d'échantillon était d'avoir une représentation la plus fidèle possible de la composition moléculaire des oléorésines de l'habitat dans lequel les pics ont été capturés. Les résultats obtenus par Pichette *et al.* (1998) démontrent qu'il est possible de décrire la composition chimique des oléorésines de ces espèces d'arbre à un niveau de précision suffisant pour arriver à les distinguer les unes des autres. Leurs résultats, provenant d'extraction d'hexane fait avec des copeaux de bois, présentent des composantes spécifiques à certaines essences d'arbre ainsi que des concentrations relatives distinctes selon les différentes oléorésines. Ce sont ces traits caractéristiques qui étaient recherchés dans les chromatogrammes provenant d'échantillons d'arbres. Les résultats obtenus dans cette étude sont cependant tout autre, puisque de manière récurrente, les chromatogrammes d'arbres ne contiennent que quelques pics chromatographiques (Figure 7). Les concentrations substantielles d'oléorésine attendues en échantillonnant à même la surface des arbres n'est pas retrouvées sur les échantillons effectués. Il faut toutefois soulever la différence importante entre la nature des échantillons utilisés dans la présente étude et celle de Pichette *et al.* (1998). Ces derniers ont fait l'analyse GC-MS de copeaux de bois, alors que dans le cas présent, seuls des frottis faits à la surface des troncs ont été analysés. L'abondance de résine entre ces deux types d'échantillon peut considérablement varier.

Les chromatogrammes obtenus à la suite de l'analyse des rectrices provenant du territoire de nidification au printemps partagent aussi cette faiblesse dans les concentrations. Conséquemment, une majorité des compositions moléculaires obtenues en provenance du territoire de nidification ne fournissent que peu d'informations (Figure 7). Ce type de chromatogramme, qui se caractérise par une faible quantité de molécules, est parmi les plus représentés de l'échantillonnage.

La problématique découlant de tels résultats est le manque d'informations pouvant servir aux analyses relatives à l'identification des variables, basées sur la composition moléculaire ici déficiente. De plus, le peu de molécules présentes dans ces chromatogrammes s'avère souvent partagé et commun pour de nombreux échantillons de différents types, les rendant non discriminantes lors du procédé d'identification. Parallèlement, il faut souligner que le plan d'échantillonnage était trop opportuniste et ainsi trop faible pour les arbres. Par exemple, sur les 32 arbres qui composent cette partie de l'échantillonnage, 75 % sont représentés par l'Épinette noire, témoignant d'une faible diversité dans la distribution des essences étudiées (Tableau 2). L'échantillonnage ne permet pas une répartition adéquate des données parmi la diversité d'arbres étudiés, ce qui aurait potentiellement permis de faire des distinctions malgré la faible présence de signatures chimiques. Une représentation mieux équilibrée des différentes essences d'arbre aurait offert une vue plus complète des différentes variables étudiées. Ainsi, plutôt que de prendre des échantillons d'écorce représentatifs de l'habitat à pailler avec chaque rectrice, il aurait été préférable d'avoir une taille d'échantillon minimale pour chaque type d'habitat. Avec les résultats actuels, l'objectif de comparaison entre des chromatogrammes d'écorce représentant l'habitat et ceux des rectrices devient un exercice pratiquement impossible par carence de détails dans les données.

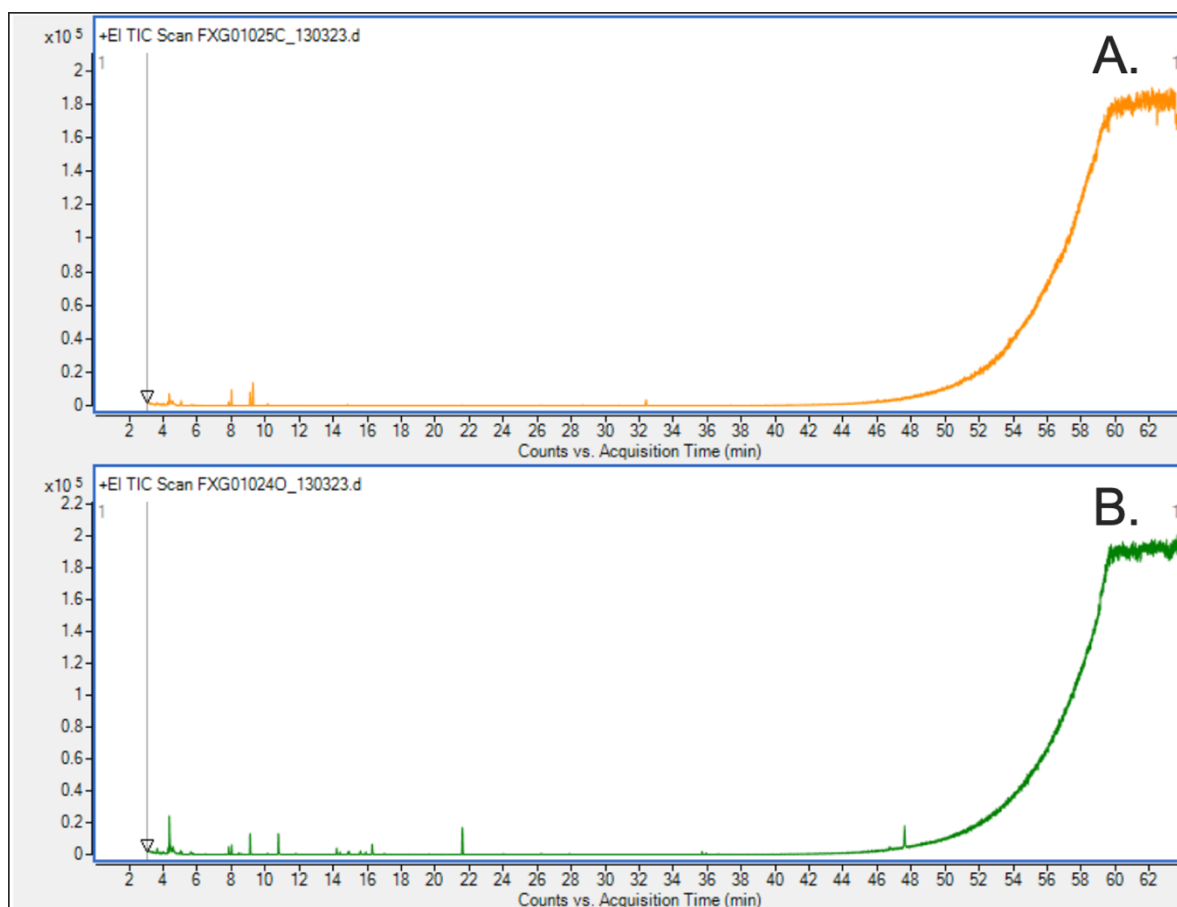


Figure 7 : Chromatogrammes provenant du camp Pékan associés à un échantillon de Pic à dos rayé (A.) et de Sapin baumier (B.) sur lesquels on note la quasi-absence de pics chromatographiques de grande intensité. En abscisse : temps de rétention (min) ; en ordonné : intensité du signal.

La période de prélèvement est l'une des causes importantes à considérer pour expliquer l'obtention de chromatogrammes pauvres en pics chromatographiques pour la période de nidification. Certains facteurs propres à la nature des substances sont à évaluer pour mieux comprendre les résultats qui en découlent. D'évidence, la concentration et même la nature des terpènes des oléorésines sont sujettes à des variations saisonnières. La saisonnalité de production des oléorésines chez de nombreuses espèces de conifères, dont certaines de la forêt boréale, reprend au printemps et est à son maximum dans les mois de juin-juillet (Staudt *et al.* 2000; Hakola *et al.* 2003; Holzke *et al.* 2006; Kopaczky *et al.* 2020). Il est donc possible, voire même attendu, que la production d'oléorésines diminue au courant de l'hiver (Flores et Doskey 2015; Kopaczky *et al.* 2020). La résine

que l'on prélève lors de la période de nidification doit donc être en grande partie celle produite à l'été précédent et conséquemment vieillie de quelques mois. Plusieurs molécules volatiles composant les oléorésines, telles que les acides abiétiques, peuvent polymériser lorsqu'elles se trouvent en contact avec l'air (Langenheim 2004; Celedon et Bohlmann 2019). Cet aspect est d'une grande importance puisque cela rend les molécules beaucoup plus difficiles à analyser au GC-MS. Il est donc fort probable que les résines vieilles de plusieurs mois récoltées en période de nidification possédaient moins de molécules encore volatiles qu'attendu, rendant l'analyse de celles-ci difficile, et ce, autant sur les oiseaux qu'à même les arbres. Dans le cas présent, l'échantillonnage s'est possiblement fait quelques jours ou semaines trop tôt pour être dans une période de forte production ou en remarquer les effets dans nos échantillons.

3.3.2. Patrons chromatographiques concluants à l'OOT

Dans d'autres cas, les chromatogrammes affichent un grand nombre de substances fournissant beaucoup plus d'informations sur la composition moléculaire (Figure 8). Ce sont les chromatogrammes provenant des oiseaux capturés à l'OOT qui représentent la majorité pour ce type de chromatogramme. Ces chromatogrammes présentent généralement des concentrations plus grandes que les chromatogrammes découlant de l'échantillonnage pendant la période de nidification. Dans les chromatogrammes provenant de la dispersion juvénile à l'OOT, la récurrence de regroupements de pics chromatographiques à des temps de rétention semblables soutient l'hypothèse d'un partage de molécules entre les échantillons qualitativement similaires. On observe deux regroupements de substances qui se retrouvent à de nombreuses reprises dans les échantillons de l'OOT. Ces regroupements se situent approximativement entre la 28^e et la 36^e minute pour le premier et entre la 42^e et la 50^e minute pour le second (Figure 8). L'identification de quelques-uns de ces pics chromatographiques par comparaison avec la banque de référence NIST oriente vers des molécules qui se retrouvent dans de nombreuses oléorésines chez les conifères (Pichette *et al.* 1998; Wajs *et al.* 2007). Il s'agit d'acides résiniques tels que l'acide abiétique et l'acide β -pimarique, ainsi que d'autres diterpènes, tel que le cembrène. Ces résultats représentent bien les chromatogrammes escomptés lors d'une analyse GC-MS d'oléorésines avec grande variété d'acides résiniques et de diterpènes.

Obtenir de tels résultats pour les oiseaux lors de la période de dispersion contraste avec ce qui a été obtenu pour les échantillons faits en période de nidification. Le type de chromatogramme qu'on retrouve à l'OOT, avec de nombreux pics chromatographiques, ne se retrouve pas parmi les échantillons d'écorce récoltés. Il était pourtant attendu de retrouver ce type de chromatogrammes principalement sur ces échantillons, l'accumulation sur les rectrices devant se faire à partir de cette surface. La distinction apparente entre ces deux types d'échantillons soutient l'hypothèse émise selon laquelle il puisse y avoir des facteurs non considérés qui affectent la présence des oléorésines, telle que la saisonnalité du prélèvement. L'émission d'oléorésines pouvant dépendre de certaines conditions environnementales telle que la température, il est attendu que celle-ci ne soit pas constante à travers les différentes saisons d'une même année au Québec (Simard *et al.* 1988; Flores et Doskey 2015; Kopaczky *et al.* 2020). Similairement, la production d'oléorésines dépend en partie du stress induit à l'arbre, tel que des attaques d'insectes, dont l'activité est sujette à des fluctuations temporelles (Zulak et Bohlmann 2010; Bloin *et al.* 2022). Par voie de conséquence, l'émission d'oléorésines en réponse à ce facteur de stress devrait également subir une fluctuation temporelle. Pour tester celle-ci, il aurait été nécessaire d'avoir des échantillons pour un même site lors des deux saisons. En effet, il est possible que les échantillons d'écorce au camp Pékan aient donné des résultats plus concluants à l'automne, tel que le représente notre échantillonnage automnal pour l'OOT. De plus, lorsque l'on considère la mue des rectrices qui s'opère à la fin de la période de nidification, vers la fin juillet – début août, il est clair que l'état des plumes échantillonnées lors des deux périodes est différent. En période de nidification (mai - juin), les plumes sont vieilles de plusieurs mois et contiennent des oléorésines tout aussi âgées. Dans le cas des rectrices prises à l'OOT (septembre - octobre), il s'agit de jeunes plumes puisqu'elles ont été mises en place récemment lors de la croissance des juvéniles ou de la mue basale chez les adultes. Ces plumes sont possiblement plus poreuses et les oléorésines qui s'y sont accumulées ont été produites dans les semaines précédentes. Ainsi, la qualité des oléorésines retrouvées dans les échantillons varie vraisemblablement avec l'âge de l'oléorésine et, par le fait même, selon la période de prélèvement, pouvant peut-être expliquer la distinction observée.

Néanmoins, ces chromatogrammes types soutiennent notre première hypothèse selon laquelle il est possible de retrouver une quantité suffisamment grande d'oléorésines sur des rectrices pour que ses composantes soient détectables lors de l'analyse par GC-MS. En l'absence de comparatif avec des arbres échantillonnés pendant la dispersion juvénile à l'OOT, il est toutefois impossible de relier avec certitude les résultats chromatographiques obtenus pour ces rectrices à une essence spécifique d'arbre, malgré la présence connue de ces molécules dans les oléorésines de conifère. La dominance en Pin gris dans l'environnement immédiat de la station de baguage à l'OOT peut avoir influencé la composition chimique retrouvée sur les rectrices. Certes, pour que cet échange s'effectue avec les Pins gris de ce milieu, il faudrait que les oiseaux capturés à l'OOT aient erré dans l'environnement des dunes de Tadoussac depuis un certain temps. Toutefois, la prémisse selon laquelle les pics capturés à l'OOT sont en déplacement implique qu'ils ne s'arrêtent pas pour de longues périodes dans un même habitat. L'hypothèse d'une accumulation d'oléorésines provenant des Pins gris de Tadoussac sur les rectrices d'oiseaux qui y sont capturés est donc fort peu plausible considérant l'écologie de ces mouvements.

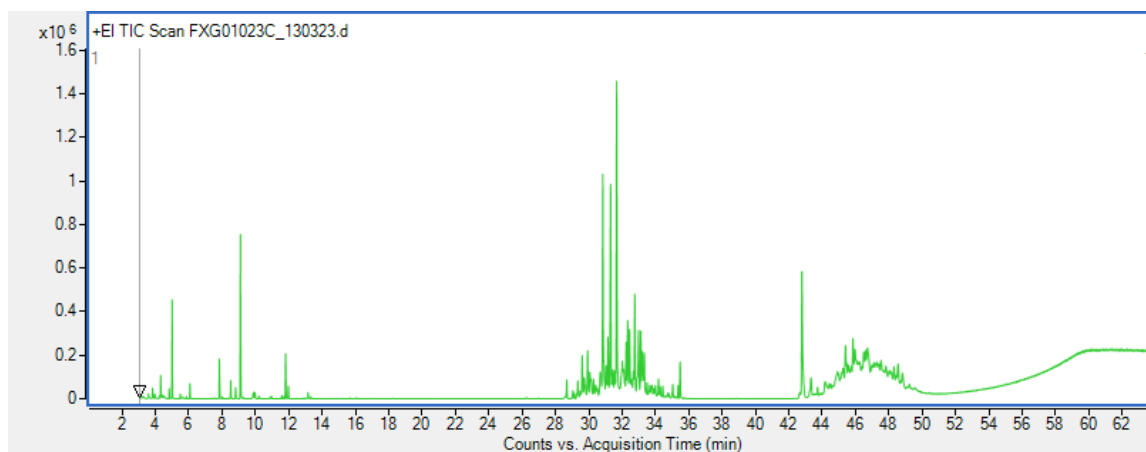


Figure 8 : Chromatogramme provenant de Tadoussac (OOT) associé à un échantillon de Pic à dos rayé capturé en octobre 2022. Les regroupements de pics chromatographiques sont présents entre la 28e et la 36e minute et la 42e et la 50e minute. En abscisse : temps de rétention (min) ; en ordonné : intensité du signal.

3.3.3. Difficultés statistiques inhérentes à la base de données

À partir des 108 chromatogrammes obtenus, un tri visuel a été effectué afin d'éliminer 27 chromatogrammes qui ne possédaient pratiquement aucun pic chromatographique, réduisant la

base de données à 81 chromatogrammes, dans laquelle on trouve en moyenne 76 molécules par échantillons (de 4 à 277 molécules par échantillons). Toutes les données découlant des analyses au GC-MS ont ensuite été compilées dans une matrice présentant les molécules et leur concentration respective selon les échantillons dans lesquels elles se retrouvent (annexe 1). C'est à partir de cette matrice, contenant toutes les données obtenues, que les analyses et représentations statistiques escomptées devaient être effectuées, telles que les PERMANOVA et NMDS. Parmi les problèmes rencontrés, le premier est la proportion trop grande de zéro dans la matrice contenant les résultats chromatographiques, ceux-ci s'élevaient à 93% de l'ensemble des valeurs présentes dans la matrice. Avec une telle proportion, même les approches habituellement de mise, tel que l'indice de Bray-Curtis, ne pouvaient arriver à fournir des analyses. Également, des taux de corrélation trop élevés entre certains échantillons ou molécules empêchaient d'arriver à une analyse robuste. La haute corrélation entre certains échantillons peut s'expliquer en partie par la carence en informations chromatographiques produites, comme discuté plus tôt pour les échantillons prélevés pendant la période de nidification (Figure 7). Ces problèmes au sein du jeu de données ont pour conséquence qu'il n'a pas été possible de produire les analyses statistiques souhaitées.

3.4. Possibilités futures

Certains défis inhérents à la méthodologie et à l'échantillonnage ont fait surface au cours de l'analyse de résultats, ce qui n'est pas étranger à la nature exploratoire du projet de recherche. Dans l'optique de reproduire les analyses effectuées en évitant de retrouver les mêmes lacunes, quelques aspects sont à prendre en compte. À priori, une mesure de la saisonnalité dans l'échantillonnage est une donnée qui fait cruellement défaut pour la justification des présents résultats. Aucun des sites échantillonnés ne l'a été durant les deux périodes de prise de données, soit l'automne et le printemps. Compléter les informations obtenues avec des échantillons d'écorce pris à l'automne dans l'habitat de pessière à mousse entourant le camp Pékan permettrait de tracer un comparatif avec les chromatogrammes provenant des oiseaux de Tadoussac pour la même période. Pareillement, ces résultats offriraient un comparatif entre les arbres d'un même habitat durant des saisons distinctes, permettant de vérifier l'effet possible de la saisonnalité de production des oléorésines. Également, prendre des échantillons d'écorce sur les arbres environnants la station de baguage aux dunes de

Tadoussac offrirait un comparatif entre les oiseaux capturés au même site ainsi qu'un comparatif avec les résultats d'écorce provenant du printemps. En plus de la saisonnalité, avoir des oléorésines de conifères provenant d'un milieu côtier ainsi que d'autres de forêt d'intérieur ajoute un niveau d'analyse supplémentaire. Effectivement, Pureswaran *et al.* (2004) démontre qu'on peut observer des différences intraspécifiques dans les oléorésines selon l'écotype de provenance des arbres, ce qui pourrait être investigué avec ce genre de données.

La diversification des habitats de provenance ainsi que le nombre d'oiseaux échantillonnés à chaque site seraient assurément une bonification de taille. Obtenir de plus amples informations sur chaque habitat par inventaire forestier terrain ainsi que mieux couvrir la diversité qu'on peut retrouver au sein de la niche écologique de ces deux espèces permettrait une analyse plus complète de la question. Dans le même ordre d'idée, assurer un échantillonnage des rectrices de pics boréaux capturés à l'OOT pour les années à venir serait un ajout d'échantillons pouvant offrir des données diversifiées. La variabilité de ces mouvements pourrait être étudiée au regard des analyses de résines. Par exemple, des effectifs plus grands chez l'une ou l'autre des espèces ou même des résultats chromatographiques variables et distinctifs selon l'année de prélèvement enrichiraient les connaissances sur le sujet.

D'un point de vue plus technique, le traitement des échantillons pourrait également être optimisé afin d'assurer de meilleurs résultats chromatographiques. Une vérification minutieuse des concentrations, entre autres par l'ajustement des volumes de solvant dans les échantillons, pourrait être une étape supplémentaire qui éviterait les défis d'interprétation des chromatogrammes obtenus. Pour optimiser les probabilités de bien prélever toutes les molécules d'oléorésines, il serait également avantageux de laisser l'extrémité de rectrice dans la fiole d'hexane. De surcroît, afin de rendre plus volatiles les molécules lourdes contenues dans l'oléorésine, une réaction de silylation des acides carboxyliques est proposée. Par l'ajout de BSTFA (*N,O*-bis(triméthylsilyl)trifluoroacétamide) dans les échantillons, la réaction de silylation consiste à convertir le groupement hydroxyle présent dans une molécule polaire par un groupement triméthylsilyle ($\text{Si}(\text{CH}_3)_3$). Ce changement a pour effet de diminuer la polarité de la molécule et permet ainsi une meilleure volatilisation de ces composés lors de la chromatographie (Pietrogrande *et al.* 2010).

4. CONCLUSION

Malgré les défis techniques rencontrés, il a été possible de détecter des traces d'oléorésines de conifères de la forêt boréale de l'est sur le plumage de deux espèces de pics de ces habitats. Les résultats obtenus au terme de nos analyses mettent toutefois en évidence certaines faiblesses dans le plan d'échantillonnage établi. La carence en données prenant en compte la saisonnalité ou la diversification des habitats de provenance en sont quelques-uns qui semblent avoir eu un impact sur la qualité des données obtenues. Néanmoins, l'objectif premier était celui de détecter la trace d'oléorésine de conifères de la forêt boréale de l'est sur le plumage d'oiseaux de ces habitats, soit le PIDN et PIDR. Celui-ci a été complété puisque de nombreuses molécules présentes dans les oléorésines du Sapin baumier, de l'Épinette noire et du Pin gris ont été retrouvées sur les échantillons de rectrices des pics. L'hypothèse selon laquelle un transfert s'effectue entre les composés produits par les conifères et les oiseaux est confirmée. L'objectif second voulant retracer l'habitat d'origine de ces pics lors de la dispersion juvénile à l'automne en les capturant à l'OOT n'a pas été complété. Les échantillons pris à l'OOT confirment également une accumulation d'oléorésines au niveau des rectrices de pics, mais les compositions obtenues ne sont pas assez précises pour retracer l'essence productrice sans la connaître à priori et donc il a été impossible d'identifier l'habitat d'origine des pics en dispersion. Par ailleurs, la présence d'un métabolite secondaire associé aux lichens ouvre la voie à des analyses corollaires afin de répondre à des questions autres que celle de l'habitat. À partir des résultats obtenus, il semble possible d'identifier des différenciations comportementales et alimentaires de fine échelle entre ces deux espèces boréales. Une récolte d'échantillons de rectrice supplémentaires effectuée sur une base régulière, voire systématique, permettrait de faire avancer les réflexions présentement entamées.

Bien que la possibilité de retracer l'habitat d'origine de ces pics boréaux lors de leur mouvement de dispersion automnale reste à confirmer, la démonstration qui a été faite dans cette étude qui souligne la présence d'échanges de molécules entre les pics et leur substrat laisse présager un avenir encourageant pour la suite des choses.

ANNEXE 1

Tableau 6 : Exemple des résultats chromatographiques extraits de la matrice, selon le temps de rétention des composés ainsi que l'espèce correspondante pour chaque échantillon.

Espèce		PIDR	PIDR	PIDN	EPN	PIDR
Composé	RT	FXG01026N	FXG01026Q	FXG01023A	FXG01024B	FXG01023D
A	8,07					
B	8,16	5251	7524	5677	11720	14878
C	8,36	8327	8678,76563	5554	12238	18757,2305
D	8,61					
E	8,62	150570	187559,672	156928	273216	403935,781
F	8,71					
G	8,85	6810	1628		1119	

Dumas P-A, Tremblay JA, Lowe J, Rompré G, Savard JPL et Ibarzabal J. 2024. Efficiency of enhanced capture methods and age-class structure of dispersing boreal woodpeckers. *Journal of Field Ornithology*, 95 : 10.

Fiedler W. 2009. New technologies for monitoring bird migration and behaviour. *Ringling & Migration*, 24 : 175–179.

Finch DM. 1993. Status and management of neotropical migratory birds: September 21-25, 1992, Estes Park Center, YMCA of the Rockies, Colorado. Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, U.S. Department of Agriculture, 432 p.

Flores RM et Doskey PV. 2015. Estimating terpene and terpenoid emissions from conifer oleoresin composition. *Atmospheric Environment*, 113 : 32–40.

Fujita M, Kawakami K et Higuchi H. 2007. Hopping and climbing gait of Japanese Pygmy Woodpeckers (*Picoides kizuki*). Comparative biochemistry and physiology part A: Molecular & integrative physiology, 148 : 802–810.

Gagnon F, Ibarzabal J, Savard JPL, Bélisle M et Vaillancourt P. 2011. Autumnal patterns of nocturnal passerine migration in the St. Lawrence estuary region, Quebec, Canada: a weather radar study. *Canadian Journal of Zoology*, 89 : 31–46.

Garneau F-X, Collin G, Gagnon H et Pichette A. 2012. Chemical composition of the hydrosol and the essential oil of three different species of the Pinaceae family : *Picea glauca* (Moench) Voss., *Picea mariana* (Mill.) B.S.P., and *Abies balsamea* (L.) Mill. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 15 : 227–236.

Greenwold MJ et Sawyer RH. 2010. Genomic organization and molecular phylogenies of the beta (β) keratin multigene family in the chicken (*Gallus gallus*) and zebra finch (*Taeniopygia guttata*): implications for feather evolution. *BMC Evolutionary Biology*, 10 : 148.

Hakola H, Tarvainen V, Laurila T, Hiltunen V, Hellén H et Keronen P. 2003. Seasonal variation of VOC concentrations above a boreal coniferous forest. *Atmospheric Environment*, 37 : 1623–1634.

Harland TL, Pickerill RK et Fillion D. 1985. Ordovician intracratonic sediments from the Lac-St-Jean and Chicoutimi areas, Quebec, eastern Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 22 : 240–254.

Hauck M. 2011. Site factors controlling epiphytic lichen abundance in northern coniferous forests. *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 206 : 81–90.

Haugh JR et Cade TJ. 1966. The spring hawk migration around the southeastern shore of lake Ontario. *The Wilson Bulletin*, 78 : 88–110.

Holzke C, Hoffmann T, Jaeger L, Koppmann R et Zimmer W. 2006. Diurnal and seasonal variation of monoterpene and sesquiterpene emissions from Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Atmospheric Environment*, 40 : 3174–3185.

Horns JJ, Adler FR et Şekercioğlu ÇH. 2018. Using opportunistic citizen science data to estimate avian population trends. *Biological Conservation*, 221 : 151–159.

Huot M et Ibarzabal J. 2006. A comparison of the age-class structure of Black-backed Woodpeckers found in recently burned and unburned boreal coniferous forests in eastern Canada. *Annales Zoologici Fennici*, 43 : 131–136.

- Ibarzabal J, Côté P et Drolet B. 2009. Tadoussac : sentinelle ornithologique de la forêt boréale au parc national du Saguenay. *Le Naturaliste Canadien*, 133 : 27–31.
- Imbeau L et Desrochers A. 2002. Foraging ecology and use of drumming trees by Three-toed Woodpeckers. *The Journal of Wildlife Management*, 66 : 222.
- Imbeau L, Savard JPL et Gagnon R. 1999. Comparing bird assemblages in successional black spruce stands originating from fire and logging. *Canadian Journal of Zoology*, 77 : 1850–1860.
- Karanikas C, Walker V, Scaltsoyiannes A, Comte G et Bertrand C. 2010. High vs. low yielding oleoresin *Pinus halepensis* Mill. trees GC terpenoids profiling as diagnostic tool. *Annals of Forest Science*, 67 : 412.
- Kaschube D, Saracco J, Ray C, Godwin C, Foster K et Pyle P. 2022. Minimum capture-recapture rates and years of banding station operations to obtain reliable adult annual survival estimates. *Journal of Field Ornithology*, 93 : 7.
- Keeling CI et Bohlmann J. 2006. Genes, enzymes and chemicals of terpenoid diversity in the constitutive and induced defence of conifers against insects and pathogens. *The New Phytologist*, 170 : 657–675.
- Kirol CP, Kesler DC, Walker BL et Fedy BC. 2020. Coupling tracking technologies to maximize efficiency in avian research. *Wildlife Society Bulletin*, 44 : 406–415.
- Kopaczzyk JM, Warguła J et Jelonek T. 2020. The variability of terpenes in conifers under developmental and environmental stimuli. *Environmental and Experimental Botany*, 180 : 104197.
- Lamarre V et Tremblay JA. 2021. Occupancy of the american Three-toed Woodpecker in a heavily-managed boreal forest of eastern Canada. *Diversity*, 13 : 35.
- Langenheim JH. 2004. Plant resins: chemistry, evolution, ecology and ethnobotany. *Annals of Botany*, 93 : 784–785.
- Lavoie S, Gauthier C, Legault J, Mercier S, Mshvildadze V et Pichette A. 2013. Lanostane- and cycloartane-type triterpenoids from *Abies balsamea* oleoresin. *Beilstein Journal of Organic Chemistry*, 9 : 1333–1339.
- Lewinsohn E, Savage TJ, Gijzen M et Croteau R. 1993. Simultaneous analysis of monoterpenes and diterpenoids of conifer oleoresin. *Phytochemical Analysis*, 4 : 220–225.
- Martínez A, Crespo D, Fernández JÁ, Aboal JR et Carballeira A. 2012. Selection of flight feathers from *Buteo buteo* and *Accipiter gentilis* for use in biomonitoring heavy metal contamination. *Science of The Total Environment*, 425 : 254–261.
- Morneau C et Payette S. 1989. Postfire lichen–spruce woodland recovery at the limit of the boreal forest in northern Quebec. *Canadian Journal of Botany*, 67 : 2770–2782.
- Morrison RIG. 1975. Migration and morphometrics of european knot and turnstone on Ellesmere Island, Canada. *Bird-Banding*, 46 : 290–301.
- Nappi A et Drapeau P. 2009. Reproductive success of the Black-backed Woodpecker (*Picoides arcticus*) in burned boreal forests: Are burns source habitats? *Biological Conservation*, 142 : 1381–1391.

Osenkowski JE, Paton PWC et Douglas K. 2012. Using long-term constant-effort banding data to monitor population trends of migratory birds: A 33-year assessment of adjacent coastal stations. *The Condor*, 114 : 470–481.

Paradis E, Baillie SR, Sutherland WJ et Gregory RD. 1998. Patterns of natal and breeding dispersal in birds. *Journal of Animal Ecology*, 67 : 518–536.

Pichette A, Larouche P-L, Lebrun M et Legault J. 2006. Composition and antibacterial activity of *Abies balsamea* essential oil. *Phytotherapy Research*, 20 : 371–373.

Pichette A, Garneau F-X, Jean F-I, Riedl B et Girard M. 1998. Chemical differences between the wood extracts of jack pine (*Pinus banksiana*), black spruce (*Picea mariana*) and balsam fir (*Abies balsamea*) from eastern Canada. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 18 : 427–438.

Pietrogrande MC, Bacco D et Mercuriali M. 2010. GC–MS analysis of low-molecular-weight dicarboxylic acids in atmospheric aerosol: comparison between silylation and esterification derivatization procedures. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 396 : 877–885.

Pipp AK, Anderson C et Callaway RM. 2001. Effects of forest age and forest structure on epiphytic lichen biomass and diversity in a Douglas-fir forest. *Northwest Science*, 75 : 12–24.

Pizňák M et Bačkor M. 2019. Lichens affect boreal forest ecology and plant metabolism. *South African Journal of Botany*, 124 : 530–539.

Poaty B, Lahlah J, Porqueres F et Bouafif H. 2015. Composition, antimicrobial and antioxidant activities of seven essential oils from the North American boreal forest. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 31 : 907–919.

Prevost S. 2016. Estimating avian populations with passive acoustic technology and song behavior. University of Tennessee, 143 p.

Pureswaran DS, Gries R et Borden JH. 2004. Quantitative variation in monoterpenes in four species of conifers. *Biochemical Systematics and Ecology*, 32 : 1109–1136.

Pyle P, Howell SNG et Pyle P. 1997. Columbidae to Ploceidae: A compendium of information on identifying, ageing, and sexing « near-passerines » and passerines in the hand. Slate Creek Press, Bolinas (Cal.), 732 p.

Quinn GP et Keough MJ. 2002. Experimental design and data analysis for biologists. Cambridge University Press, Cambridge, UK ; New York, 537 p.

Rheault H, Bélanger L, Grondin P, Ouimet R, Hébert C et Dussault C. 2009. Stand composition and structure as indicators of epixylic diversity in old-growth boreal forests. *Écoscience*, 16 : 183–196.

Robinson WD, Bowlin MS, Bisson I, Shamoun-Baranes J, Thorup K, Diehl RH, Kunz TH, Mabey S et Winkler DW. 2010. Integrating concepts and technologies to advance the study of bird migration. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 8 : 354–361.

Rousseau J, Alexander J et Betts M. 2020. Using continental-scale bird banding data to estimate demographic migratory patterns for Rufous Hummingbird (*Selasphorus rufus*). *Avian Conservation and Ecology*, 15 .

Rutkowska M, Płotka-Wasyłka J, Lubinska-Szczygeł M, Róžańska A, Możejko-Ciesielska J et Namieśnik J. 2018. Birds' feathers – Suitable samples for determination of environmental pollutants. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 109 : 97–115.

Saucier JP, Bergeron JF, Grondin P et Robitaille A. 2003. Les zones de végétation et les domaines bioclimatiques du Québec. Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs.

Sibly RM, Hone J, Clutton-Brock TH, Sæther B et Engen S. 2002. Pattern of variation in avian population growth rates. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences, 357 : 1185–1195.

Siegel RB, Tingley MW, Wilkerson RL, Howell CA, Johnson M et Pyle P. 2015. Age structure of Black-backed Woodpecker populations in burned forests. The Auk, 133 : 69–78.

Silva JR de A, Zoghbi M das GB, Pinto A da C, Godoy RLO et Amaral ACF. 2009. Analysis of the hexane extracts from seven oleoresins of protium species. Journal of Essential Oil Research, 21 : 305–308.

Simard S, Hachey JM et Collin GJ. 1988. The variations of essential oil composition during the extraction process. The case of *Thuja occidentalis* L. and *Abies balsamea* (L.) Mill. Journal of Wood Chemistry and Technology, 8 : 561–573.

Sparkman OD, Penton Z et Kitson FG. 2011. Gas chromatography and mass spectrometry : A practical guide Ed. 2. Elsevier Science.

Staudt M, Bertin N, Frenzel B et Seufert G. 2000. Seasonal variation in amount and composition of monoterpenes emitted by young *Pinus pinea* trees – Implications for emission modeling. Journal of Atmospheric Chemistry, 35 : 77–99.

Sutton BA, Woosley RS et Butcher DJ. 1997. Determination of monoterpenes in oleoresin: A chemosystematic study of the interaction between fraser fir (*Abies fraseri*) and balsam woolly adelgid (*Adelges piceae*). Microchemical Journal, 56 : 332–342.

Tremblay JA, Ibarzabal J et Savard JPL. 2010. Foraging ecology of Black-backed Woodpeckers (*Picoides arcticus*) in unburned eastern boreal forest stands. Canadian Journal of Forest Research, 40 : 991–999.

Tremblay JA, Ibarzabal J et Savard JPL. 2015a. Contribution of unburned boreal forests to the population of Black-backed Woodpecker in eastern Canada. Écoscience, 22 : 145–155.

Tremblay JA, Savard JPL et Ibarzabal J. 2015b. Structural retention requirements for a key ecosystem engineer in conifer-dominated stands of a boreal managed landscape in eastern Canada. Forest Ecology and Management, 357 : 220–227.

Tremblay JA, Leonard Jr. DL et Imbeau L. 2020a. Pic à dos rayé (*Picoides dorsalis*), version 1.0. In Birds of the World (P. G. Rodewald, Editor). Cornell Lab of Ornithology, Ithaca, NY, USA. Consulté le 5 mars 2022, <https://birdsoftheworld.org/bow/species/attwoo1/cur/introduction>

Tremblay JA, Dixon RD, Saab VA, Pyle P et Patten MA. 2020b. Pic à dos noir (*Picoides arcticus*), version 1.0. In Birds of the World (P. G. Rodewald, Editor). Cornell Lab of Ornithology, Ithaca, NY, USA. Consulté le 5 mars 2022, <https://birdsoftheworld.org/bow/species/bkbwoo/cur/introduction>

Villard P. 1994. Foraging behavior of Black-backed and Three-toed Woodpeckers during spring and summer in a canadian boreal forest. Canadian Journal of Zoology, 72 : 1957–1959.

Wajs A, Pranovich A, Reunanen M, Willför S et Holmbom B. 2007. Headspace-SPME analysis of the sapwood and heartwood of *Picea abies*, *Pinus sylvestris* and *Larix decidua*. Journal of Essential Oil Research, 19 : 125–133.

Webster MS, Marra PP, Haig SM, Bensch S et Holmes RT. 2002. Links between worlds: unraveling migratory connectivity. *Trends in Ecology & Evolution*, 17 : 76–83.

Yasmeen F, Szmigielski R, Vermeylen R, Gómez-González Y, Surratt JD, Chan AWH, Seinfeld JH, Maenhaut W et Claeys M. 2011. Mass spectrometric characterization of isomeric terpenoic acids from the oxidation of α -pinene, β -pinene, d-limonene, and Δ^3 -carene in fine forest aerosol. *Journal of Mass Spectrometry*, 46 : 425–442.

Yunick RP. 1985. A review of recent irruptions of the Black-backed Woodpecker and Three-toed Woodpecker in eastern North America. *Journal of Field Ornithology*, 56 : 138–152.

Zraik M, Booth T et Piercey-Normore MD. 2018. Relationship between lichen species composition, secondary metabolites and soil pH, organic matter, and grain characteristics in Manitoba. *Botany*, 96 : 267–279.

Zulak KG et Bohlmann J. 2010. Terpenoid biosynthesis and specialized vascular cells of conifer defense. *Journal of Integrative Plant Biology*, 52 : 86–97.