

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

L'ORGANISATION SPATIALE ET TEMPORELLE DES ODEURS  
DANS L'ENVIRONNEMENT

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

PAR  
ESTÉBAN HAMEL JOMPHE

JANVIER 2022

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

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

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

*"Smell is an important sense  
in that it is primarily a very basic,  
emotional, arousing sense, unlike vision  
or sound, which tend to involve cognition."*

*John Douglas Porteous*

## REMERCIEMENTS

Je tiens d'abord à remercier mon directeur de recherche, Raphaël Proulx, pour m'avoir fait découvrir le monde de la recherche à travers ce projet inusité. Merci de ta patience pour les nombreuses fois où tu as tenté de m'expliquer comment se représenter cette chose abstraite que peut être un profil olfactif. Je te suis reconnaissant pour tous tes conseils et surtout pour avoir partagé avec moi cette insatiable curiosité qui t'anime comme chercheur. Je voudrais aussi remercier les membres de mon comité d'orientation, Shari Forbes et Johannes Frasnelli, pour leurs soutiens, leurs commentaires et leurs pistes de solutions à mes différents questionnements.

Merci à tous les membres de la Chaire de Recherche du Canada en intégrité écologique (CRIE), Chris Watson, Charles Martin, Louis Desrochers, Guillaume Rheault, Jérôme Barbeau, Léonie Carignan-Guillemette, Élisabeth Walfish et Stéphanie L'Italien-Simard. Votre aide lors des campagnes terrain ou lors de nos différentes discussions a grandement contribué à la réussite de ce projet et je vous en suis reconnaissant. Un remerciement particulier aux propriétaires des différents terrains où j'ai pu prendre des échantillons. Enfin, merci à mes proches de m'avoir soutenu tout au long de ce projet rempli de péripéties.

Ce projet a été réalisé grâce au soutien financier reçu par M. Raphaël Proulx du Fonds de recherche du Québec en Nature et technologies (FRQNT) et du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG).

## AVANT-PROPOS

Ce mémoire de recherche fait suite à un peu plus de deux ans de recherche dans le cadre de la maîtrise en science de l'environnement. Deux campagnes d'échantillonnage ont été faites. Une première série de travaux préliminaires ont été faits à l'été 2019 alors qu'une seconde campagne terrain où les profils olfactifs des forêts urbaines et naturelles étaient échantillonnés s'est déroulée à l'été 2020. Ces campagnes d'échantillonnage et les analyses de données qui s'en sont suivies ont été effectuées sous la supervision du professeur Raphaël Proulx, titulaire de la Chaire de recherche du Canada en intégrité écologique, à l'Université du Québec à Trois-Rivières. Le but de cette recherche était d'approfondir les connaissances sur l'organisation et la structure des paysages olfactifs dans l'environnement.

Ce mémoire comprend trois chapitres, une introduction générale et une conclusion écrite en français (Chapitres I et III) et un article scientifique découlant de mes principaux résultats (Chapitre II). Ce dernier, dont je suis l'auteur principal avec Raphaël Proulx, sera soumis à la revue *Landscape and Urban Planning*.

## RÉSUMÉ

L'écologie des paysages est souvent associée à l'étude d'attributs physiologiques au détriment d'autres attributs sensoriels comme les sons ou les odeurs. Plus particulièrement, dans le cas des odeurs, aucune unité de mesure n'existe pour les comparer. Pourtant selon la théorie du « *sensory drive hypothesis* », la diversification des espèces pourrait se faire selon l'adaptation des sens à l'environnement dans lequel elles évoluent. À ce jour, les études qui tentent de comparer la capacité olfactive des organismes vivants s'appuient en majorité sur des critères qualitatifs basés sur une perception anthropocentrique. Plus récemment, la technologie des nez électroniques a fait son apparition, permettant ainsi de comparer différentes odeurs sans avoir recours à des panélistes. Les nez électroniques sont généralement utilisés à des fins de contrôle de qualité ou d'identification dans des milieux contrôlés. Ces appareils fonctionnent à l'aide de capteurs électriques qui sont activés au contact de molécules chimiques pour former des profils olfactifs. Ces profils traduisent l'empreinte unique d'une odeur. Le but du présent mémoire est d'étudier l'organisation spatiale et temporelle des gradients olfactifs en milieu naturel. Nous avons utilisé le nez électronique Cyranose 320 pour comparer les profils olfactifs de différentes forêts. Une première expérience sur des forêts réparties le long d'un gradient d'urbanisation a permis d'étudier l'impact des limites terrestres sur la répartition des profils olfactifs. Une deuxième expérience sur des chronoséquences de données prises dans des forêts et dans des lieux intérieurs, comme des classes ou des habitations, visait à étudier l'influence des phénomènes naturels sur les profils olfactifs. Nos résultats ont montré que les profils olfactifs des forêts variaient plus fortement entre différentes dates qu'entre les localisations. Les chronoséquences ont montré des corrélations fortes entre l'heure de la prise de donnée et les profils olfactifs dans les forêts, alors qu'elles étaient absentes dans les lieux intérieurs. Les émissions de certains composés organiques volatils (COV) pourraient influencer les profils d'odeurs à l'échelle de la journée, alors que des variations phénologiques dans le développement de la végétation seraient plutôt en lien avec des changements saisonniers dans les profils olfactifs. Une tendance à l'homogénéisation des profils olfactifs dans les forêts urbaines a aussi été observée. Ce projet de recherche est un des premiers à étudier l'organisation et la structure des paysages olfactifs à l'aide d'un nez électronique.

**Mots-clés :** Forêts, Urbain, Nez électronique, Olfaction, COV.

## TABLE DES MATIÈRES

<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>iii</b>
<b>AVANT-PROPOS.....</b>	<b>iv</b>
<b>RÉSUMÉ.....</b>	<b>v</b>
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>ix</b>
<b>CHAPITRE I</b>	
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
1.1 L'étude des paysages sensoriels .....	1
1.2 La perception des odeurs .....	4
1.3 La source des odeurs dans l'environnement.....	5
1.4 La propagation des odeurs dans l'environnement .....	9
1.5 La détection spécifique des odeurs.....	11
1.6 Les nez électroniques.....	14
1.7 Questions de recherche.....	16
<b>CHAPITRE II</b>	
<b>COMPARAISON DES PAYSAGES OLFACTIFS EN MILIEUX FORESTIERS À L'AIDE D'UN NEZ ÉLECTRONIQUE.....</b>	<b>18</b>
2.1 Résumé .....	19
2.2 Introduction .....	20
2.3 Matériels et méthodes.....	23
2.3.1 Échantillonnage des profils olfactifs.....	23
2.3.2 Influence des facteurs environnementaux sur les profils olfactifs.....	24
2.3.3 Cycle diurne des profils olfactifs.....	26
2.3.4 Saisonnalité et spatialité des profils olfactifs.....	27
2.3.5 Hétérogénéité des profils olfactifs dans des paysages urbains et naturels.....	28
2.4 Résultats.....	28
2.4.1 Influence des facteurs environnementaux sur les profils olfactifs.....	28
2.4.2 Cycle diurne des profils olfactifs.....	30

2.4.3	Saisonnalité et spatialité des profils olfactifs.....	31
2.4.4	Hétérogénéité des profils olfactifs dans des paysages urbains et naturels.....	34
2.5	Discussion.....	34
2.5.1	Influence des facteurs environnementaux sur les profils olfactifs.....	34
2.5.2	Cycle diurne des profils olfactifs.....	35
2.5.3	Saisonnalité et spatialité des profils olfactifs.....	36
2.5.4	Hétérogénéité des profils olfactifs dans des paysages urbains et naturels.....	37
2.6	Conclusion.....	38
2.7	Remerciements .....	39
2.8	Références .....	39
<b>CHAPITRE III</b>		
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>		<b>44</b>
3.1	Contextualisation.....	44
3.2	Résultats principaux .....	45
3.3	Conclusion.....	47
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>		<b>50</b>
<b>ANNEXE A</b>		
<b>COMPARAISON ENTRE DES PROFILS OLFACTIFS FORESTIERS ET ANTHROPIQUES .....</b>		<b>57</b>
A.1	Mise en contexte.....	57
A.2	Méthodes .....	57
A.3	Résultats et discussion.....	58



## LISTE DES FIGURES

Figure		Page
1.1	Représentation idéalisée de la relation entre un attribut du paysage, ici la proportion de forêts, et la probabilité d'observer une espèce d'intérêt.	2
1.2	Diagramme circulaire inspiré d'une « smell wheel » pour comparer la perception olfactive entre les humains et les souris.....	14
1.3	Schéma simplifié de la création d'un profil olfactif en 32 dimensions par le nez électronique Cyranose 320 .....	16
2.1	Localisation des sites échantillonnés lors des campagnes de 2019 (croix) et 2020 (losange).....	26
2.2	Coefficients de corrélation de Spearman pour les 32 capteurs du Cyranose 320 .....	30
2.3	Coefficient de corrélation de Spearman pour les 32 capteurs du Cyranose 320 .....	31
2.4	Analyse en coordonnées principales sur les profils olfactifs des parcelles forestières échantillonnées au cours de la campagne 2020.....	33
A.1	Analyse en coordonnées principales de profils olfactifs forestiers comparés à des groupes de référence de sources anthropiques.....	60

## LISTE DES TABLEAUX

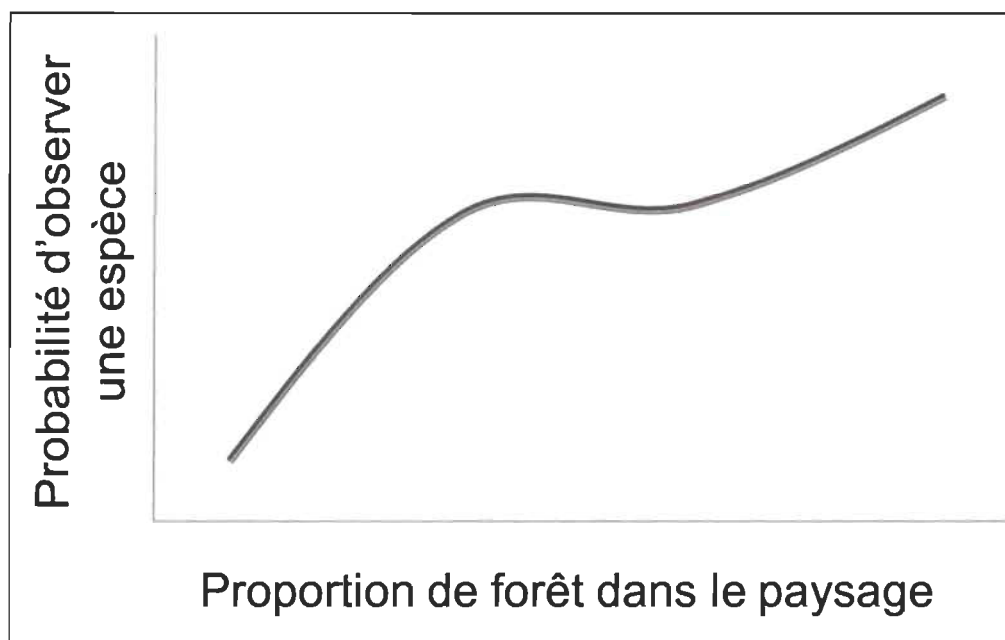
<b>Tableau</b>		<b>Page</b>
1.1	Tableau comparatif des avantages et des inconvénients de quelques signaux sensoriel .....	4
1.2	Persistance dans l'atmosphère de différents COV émis par des sources naturelles et anthropiques .....	8
2.1	Paramètres d'échantillonnage du Cyranose 320 pour l'analyse d'un échantillon d'air .....	24

# CHAPITRE I

## INTRODUCTION

### 1.1 L'étude des paysages sensoriels

L'écologie des paysages est le champ d'étude multidisciplinaire qui s'intéresse à la structure, la fonction et les changements dans les paysages (Liu et Taylor, 2002). Un paysage tel que défini par Haber (2004) est une « *pièce de territoire qui est perçue de façon similaire* ». Les objectifs de cette science visent à comprendre les relations entre les organismes et les attributs du territoire (Turner *et al.*, 2007). L'étude de ces relations s'exerce par l'analyse d'une mesure biologique, comme la richesse en espèces, par rapport à un attribut de paysage, par exemple le gradient d'affectation des terres ou des ressources à l'échelle d'une pièce du territoire. Ces interactions sont souvent étudiées dans un contexte où les humains ont transformé le milieu ciblé (Farina, 2006). En particulier, l'écologie des paysages propose que les individus de différentes espèces sélectionnent des « paysages favorables » qui correspondent à leurs besoins fondamentaux pour croître et se reproduire (Reed et Dobson, 1993). Cette norme de sélection peut s'exprimer simplement par la relation entre des attributs du paysage et la probabilité d'y observer une ou plusieurs espèces (Farina, 2006). Ainsi, plus un paysage posséderait des caractéristiques jugées attrayantes pour une espèce, plus la probabilité de rencontrer cette espèce augmenterait, comme illustré à la figure 1.1.



**Figure 1.1** Représentation idéalisée de la relation entre un attribut du paysage, ici la proportion de forêts, et la probabilité d'observer une espèce d'intérêt.

L'écologie des paysages sensoriels est une sous-discipline de l'écologie des paysages qui étudie des attributs de paysages reliés au sens des organismes comme les sons, les couleurs ou les odeurs (Potier, 2016). Les paysages physionomiques ou visuels sont parmi les plus étudiés en écologie des paysages (Metzger, 2008). Ils peuvent être décrits par l'amalgame des formes et des couleurs présentes dans notre environnement (López-Guillén *et al.*, 2009). D'autres exemples de paysages sensoriels étudiés sont les paysages acoustiques qui s'intéressent aux ondes sonores dans l'environnement terrestre (Pijanowski *et al.*, 2011). Il existe aussi des paysages climatiques dont les frontières sont créées par différentes variables climatiques comme les précipitations et la température entre des territoires (Masello *et al.*, 2015). Avec une variété de paysages de toutes sortes, dont ceux énumérés précédemment, l'écologie sensorielle se rapproche plus de la perception des organismes en considérant l'environnement comme un assemblage de sons, de couleurs et d'odeurs. Il y a donc fort à espérer que l'écologie des paysages sensoriels puisse repousser les connaissances sur l'assemblage des communautés surtout dans des cas où les attributs de paysages classiques peinent à expliquer plus de 40 % de la variabilité entre les espèces (Martin *et al.*, 2018).

L'écologie des paysages olfactifs s'intéresse à comprendre comment les gradients olfactifs dans l'environnement influencent la répartition des organismes sur un territoire (Frasnelli et Proulx, 2019). La première mention des paysages olfactifs remonte aux années 1980, ce qui en fait une branche de l'écologie très récente et peu étudiée. En ce sens, un territoire perçu de manière similaire et qui contiendrait plus d'une odeur serait décrit comme un paysage olfactif (Atema, 1996). Si l'une des théories en écologie sensorielle est que les sens d'un organisme influencent son choix d'habitat (Endler, 1993), un des objectifs de l'écologie des paysages olfactifs est de mieux comprendre comment les espèces répondent à la répartition des odeurs. Or, des notions fondamentales comme la structure et la fonctionnalité de ces paysages doivent être définies (Liu et Taylor, 2002) puisqu'ils sont encore inconnus (Xiao *et al.*, 2021). Les connaissances sur les paysages olfactifs sont néanmoins très limitées bien que plusieurs animaux s'appuient sur les signaux olfactifs pour explorer le monde qui les entoure (Legouis, 1995). Le tableau 1.1 compare l'utilisation de l'olfaction par rapport à l'ouïe, la vision et le goût chez les animaux. On remarque que l'odorat est considéré comme un signal très spécifique qui se fait via plusieurs canaux. Contrairement aux paysages acoustiques, on ne peut pas prédire comment les animaux vont réagir à une même odeur dans leur habitat puisqu'aucun système de mesure ni d'appareils calibrés n'existe pour comparer la sensibilité de différentes espèces à un même paysage olfactif. L'organisation des odeurs dans l'environnement pose un défi supplémentaire puisqu'il s'agit d'un signal chimique qui s'exprime à faible distance comparée aux ondes sonores ou lumineuses qui voyagent sur de plus longues distances (Endler, 1993).

**Tableau 1.1**

Tableau comparatif des avantages et des inconvénients de quelques signaux sensoriels  
(Adapté de Endler, 1993)

<b>Signaux sensoriels</b>	<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
Vision	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plusieurs canaux (vitesse des objets, direction, clarté, polarisation, etc.)</li> <li>• Haute vitesse de transmission de l'information (p. ex. prédation, rivalité)</li> <li>• Très rapide</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dépend de la lumière ambiante (excepté pour la bioluminescence)</li> <li>• Dépend de la ligne de mire du signal (aucune obstruction)</li> </ul>
Audition	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plusieurs canaux (fréquence et amplitudes des ondes sonores)</li> <li>• Moyenne à haute vitesse de transmission de l'information</li> <li>• Très rapide</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peut être entendu de tous y compris les prédateurs et des parasites</li> <li>• Se mélange facilement à d'autres sons</li> </ul>
Olfaction	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Signaux très spécifiques</li> <li>• Directement relié aux besoins (nourriture ou physiologie)</li> <li>• Indicateur de la condition</li> <li>• Plusieurs canaux</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Émission probablement énergivore</li> <li>• Récepteurs spécifiques requis pour l'interprétation</li> <li>• Peu de contrôle sur la direction de l'émission</li> <li>• Relativement lent</li> </ul>
Contact (toucher et goût)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grande quantité d'information transmise en peu de temps</li> <li>• Rapide</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Information moins précise et moins rapide que pour l'audition ou la vue</li> <li>• Courte portée</li> </ul>

## 1.2 La perception des odeurs

Pour appuyer le cadre conceptuel de cette étude, il convient de définir quelques concepts. Une odeur est une perception évoquée par des molécules odorantes. L'environnement olfactif est, quant à lui, caractérisé par des mélanges de molécules odorantes présentes à un endroit précis et à un moment donné (Holley, 2006).

Ces molécules sont de petites tailles (< 300 Dalton), elles sont hydrophobes et englobent des molécules aromatiques ou aliphatiques avec des squelettes carbonés de différentes longueurs (Le bon *et al.*, 2008). Lorsque les molécules odorantes entrent en contact avec des récepteurs dans l'appareil olfactif d'un organisme, un signal est transmis au cerveau et celui-ci l'interprète comme une odeur (Pernollet *et al.*, 2006). Chez les animaux, l'interprétation des odeurs reste encore en partie incomprise puisque différentes structures physiologiques sont impliquées dans l'interprétation d'un signal olfactif.

Une distinction doit aussi être faite entre les notions de détection et de perception des odeurs. Si l'environnement olfactif est le même pour les organismes présents à un endroit donné, il en est autrement pour la perception évoquée par ces molécules qui varie, fort probablement, entre les espèces (Laska *et al.*, 2005). L'étude de la perception des odeurs relève plutôt un domaine de la psychologie (Wilson, 2006). Il existe même des systèmes de mesure pour quantifier la perception humaine d'une odeur. Il y a par exemple l'unité d'odeur européenne par mètre cube (European odor unit;  $ouE/m^3$ ) qui représente le nombre de dilutions nécessaire pour que la concentration d'un mélange de molécules odorantes devienne imperceptible par rapport à son seuil de détection (Bax *et al.*, 2020). Ainsi, un mélange qui devrait être dilué 50 fois pour qu'un groupe de panélistes ne le détecte plus aurait une concentration de  $50\ ouE/m^3$ . Ce type de mesure est souvent associé à l'olfactométrie, une méthode faisant appel à des panélistes qui évaluent la sensation perçue par un mélange de molécules odorantes d'une certaine concentration (Comité Européen de Normalisation, 2003). Malgré certaines allusions sur la perception des odeurs, ce mémoire se concentrera sur l'étude des profils olfactifs tels que détectés par un nez électronique.

### **1.3 La source des odeurs dans l'environnement**

La perception des odeurs par le cerveau humain se fait à une échelle moins détaillée que la distinction individuelle des molécules qui la compose (Holley, 2006). Cette perception ne peut pas se résumer à l'addition de ses composés. L'intensité d'une odeur dépend quant à elle de la concentration des éléments qui la compose et peut parfois

être diluée ou intensifiée en fonction du contexte. Une odeur variera donc spatialement selon la concentration à la source (Holley, 2006). Des travaux pour décrire le spectre des odeurs selon une perspective anthropocentrique ont souvent utilisé des critères qualitatifs (Dravniek, 1982; Madany Mamlouk *et al.*, 2003; Jacobs *et al.*, 2015). Dans de rares cas, on parlera de synergie pour un mélange de molécules odorantes qui sera plus intense que ces constituants (Holley, 2006). En général, seuls trois ou quatre composés d'un mélange odorant peuvent être discernés par un humain (Livermore et Laing, 1996). L'odeur perçue est souvent moins intense que la somme de ces constituants. La position et la sensibilité de l'organe olfactif par rapport aux sources influenceront l'interprétation qu'un organisme fait de l'odeur présente dans son environnement (Shepherd, 2004). Enfin, la capacité de détecter une odeur pourrait aussi être influencée par le nombre de gènes relié à l'olfaction pour différentes espèces.

En milieu naturel, les environnements olfactifs auxquelles sont exposés les organismes ne sont pas homogènes dans l'espace. Dans les milieux forestiers, les molécules odorantes émises par les végétaux sont multiples et varient selon divers phénomènes naturels (Dudareva *et al.*, 2006). On peut penser aux jasmonates qui agissent comme signaux d'alerte entre les arbres (Tamogami *et al.*, 2008) ou le linalol qui est dégagé pour attirer les pollinisateurs (Raguso et Pichersky, 1995). Les Composés Organiques Volatils (COV) sont les molécules odorantes les plus communes émises par les végétaux. Par exemple, les émissions naturelles de COV en été étaient estimées comme trois fois plus importantes que les émissions anthropiques pour la même période à la fin des années 1980 aux États-Unis (Lamb *et al.*, 1987). Les principales classes de composés organiques volatils sont des molécules aux squelettes carbonés comme les isoprénoïdes, les phénylpropanoïdes, les benzénoïdes et les dérivés d'acides gras (Dudareva *et al.*, 2006). Ces COV sont synthétisés par les végétaux dans différentes voies métaboliques succédant au cycle de Calvin lors de la photosynthèse (Dudareva *et al.*, 2006). Parmi ces COV odorants, le groupe des isoprénoïdes peut réagir avec l'ozone et d'autres composés atmosphériques pour créer des gradients olfactifs dans l'environnement (Calogirou *et al.*, 1999; Bourtsoukidis *et al.*, 2018; Rinne *et al.*, 2007). L'ajout ou le retrait de chaînes carbonées dans les isoprénoïdes, à différentes étapes des voies métaboliques, peut aussi



changer leurs propriétés odorantes (Dudareva *et al.*, 2004). Certains de ces COV sont associés aux odeurs qu'on retrouve dans les huiles essentielles, comme le limonène par exemple, qui donne une odeur de citron ou le  $\alpha$ -pinène qui donne la senteur boisée aux pins (Becerra et Villa, 2020). D'autres COV sont créés dans les chloroplastes, ou d'autres voies métaboliques spécifiques aux végétaux. Les études sur les COV ont aussi rapporté des différences entre les types de végétations feuillus ou résineux. Par exemple, certaines espèces de pins sont de bons émetteurs de monoterpènes, notamment au moment où leurs aiguilles se décomposent (Aaltonen *et al.*, 2011; Yu *et al.*, 2017). Les molécules odorantes provenant de la végétation ont souvent de courtes durées de vie qui se limitent à quelques minutes ou quelques heures (Atkinson, 2000). Par exemple, le  $\alpha$ -pinène et le limonène ont des durées de vie respectives de 156 minutes et 50 minutes (Atkinson, 2000). En calculant la dispersion des COV émis par la végétation par les courants d'air, une étude menée par Seco et ses collaborateurs (2011) quantifiait la zone d'influence de ces molécules entre 7 et 11 kilomètres. Puisque la dispersion des COV émis par les forêts est limitée par une courte durée de vie (Guenther *et al.*, 1993), celles-ci peuvent être traitées comme une source de COV stationnaire (Zemanchova et Brechler, 2010). De par leur faible temps de persistance, les odeurs créées par ces molécules sont très localisées.

Les COV qu'on retrouve en milieux urbains diffèrent de ceux émis par la végétation. Le tableau 1.2 tiré d'un article de Simpson et Volosciuk (2019) reprend quelques-unes de ces différences en présentant les classes de molécules qu'on retrouve dans les villes. Contrairement aux molécules émises par la végétation, la durée de vie des COV émis par des sources anthropiques est plus longue pour les classes de composés présentés dans ce tableau. Zemanchova et Brechler (2010) ont même catégorisé les émissions anthropiques de COV provenant de sources stationnaires ou mobiles dans une étude qui comparait les émissions de COV entre les forêts et les lieux anthropisés en République tchèque. Parmi ces catégories, les sources de COV anthropique mobiles étaient associées aux émissions produites par les automobiles alors que les sources de COV anthropiques stationnaires étaient reliées aux industries et aux bâtiments.

**Tableau 1.2**

Persistance dans l'atmosphère de différents COV émis par des sources naturelles et anthropiques (Adapté de Simpson et Volosciuk, 2019)

<b>Composé organique volatil (COV)</b>	<b>Temps de persistance dans l'atmosphère (approximativement)</b>	<b>Sources d'émission</b>
Éthane	1.5 mois	Gaz naturel, combustion de biomasse
Acétylène	15 jours	Émissions des véhicules, combustion de biomasse
Méthanol	12 jours	Végétation, oxydation des COV
Propane	11 jours	Gaz naturel, pétrole liquéfié
Benzène	10 jours	Émissions industrielles
Éthanol	4 jours	Végétation, biogaz
Toluène	2 jours	Solvant, émissions des véhicules
Éthène	1 jour	Émissions des véhicules
Formaldéhyde (valider)	1 jour	Oxydation des VOC, combustion de biomasse
Isoprénoides	3 heures	Végétation

Dans les milieux urbanisés, certaines activités anthropiques contribuent aux paysages olfactifs notamment avec l'émission de certains COV. D'ailleurs, une diminution des émissions de COV émis par les voitures a été recensée dans les dernières années au profit de nouveaux COV comme les pesticides, les produits de soin personnels et les produits nettoyants (McDonald *et al.*, 2018; Simpson et Volosciuk, 2019). Une étude faite par de Blas et ses collaborateurs (2012) rapporte que les composés qu'on retrouve à l'intérieur des bâtiments englobent un mélange des COV présent à l'extérieur et à l'intérieur d'un bâtiment. Dans cette étude, les auteurs notaient que des phénomènes naturels influençaient les COV retrouvés à l'intérieur d'un bâtiment, mais l'effet inverse n'était pas observé. Parfois, les épisodes d'émissions de COV à l'extérieur des bâtiments se répercutaient entre 2 et 4 h après dans les lieux intérieurs. D'autres émissions de sources anthropiques intérieures persistent même lorsqu'un édifice n'est pas occupé, c'est le cas

par exemple des molécules présentes dans les détergents qui sont perceptibles même la fin de semaine lorsqu'un édifice commercial est vide (de Blas *et al.*, 2012). En milieu extérieur, les COV provenant de sources naturelles et anthropiques se mélangent et l'influence de ces deux types de COV dans les paysages olfactifs urbains est inconnue.

#### 1.4 La propagation des odeurs dans l'environnement

La réponse des écosystèmes à la pression anthropique varie dans le temps et dans l'espace, mais les indicateurs pour quantifier ces changements restent à définir pour les paysages olfactifs (Xiao, 2018). Des phénomènes comme les mouvements d'air peuvent influencer la quantité de COV qu'on retrouve dans l'environnement (Seco *et al.*, 2011). L'effet du vent sur les odeurs est qu'il peut transporter les molécules odorantes sur de longues distances, mais peut aussi contribuer à diluer l'intensité d'une odeur près de sa source (Henshaw, 2013). Ainsi, lors de comparaison entre des profils olfactifs soumis aux phénomènes naturels extérieurs, l'influence du mouvement des masses d'air influencera potentiellement le résultat.

L'effet de la température sur l'émission de COV par la végétation a été recensé dans la littérature (Guenther *et al.*, 1993, 2014; Cetin *et al.*, 2003). D'autres expériences ont montré qu'une augmentation de la température pouvait augmenter légèrement l'émission et la volatilité de certains isoprénoïdes comme les sesquiterpènes (Aaltonen *et al.*, 2011; Asensio *et al.*, 2007). Cependant, passé une température critique, le site actif des enzymes qui participe à la synthèse des COV est altéré et s'en suit une diminution des émissions (Niinemets *et al.*, 2004). Dans le cas des COV émis par certaines fleurs, l'augmentation de la température affecte plutôt la quantité de COV que la nature de ces composés (Farré-Armengol *et al.*, 2014). Une variation dans la quantité de COV est aussi observable lorsqu'il y a une sécheresse (Burkle et Runyon, 2016). À l'inverse, une émission de COV par les sols forestiers peut se produire après une averse (Bourtsoukidis *et al.*, 2018). Pour les COV émis par des sources anthropiques, notamment ceux produits par les véhicules, une baisse de température peut diminuer la vitesse de dégradation notamment

durant l'hiver, alors que le phénomène inverse se produit l'été avec des vitesses de dégradation et de mélange plus important (de Blas *et al.*, 2012).

Les émissions de COV par la végétation varient de manière saisonnière et journalière selon des facteurs reliés à des phénomènes d'origines physiologiques et climatiques (Seco *et al.*, 2011; Guenter *et al.*, 1995). Par exemple, l'émission de certains COV émis par la végétation est plus élevée en été qu'en automne et presque nulle en hiver (Simon *et al.*, 2001). Cette diminution dans l'émission de COV s'observe notamment chez les arbres feuillus puisqu'ils perdent leurs feuilles en automne, alors qu'elle est moins perceptible pour les COV propres aux conifères qui gardent leurs aiguilles toute l'année (Aaltonen *et al.*, 2011 ; Seco *et al.*, 2011). Sur une base quotidienne, des variations sont perceptibles dans les émissions de COV de la végétation notamment à cause de la photosynthèse qui, elle, dépend de la lumière. Ainsi, des pics d'émission de COV peuvent être détectés à l'ouverture des stomates le matin et cessent la nuit (Niinemets *et al.*, 2003).

Des variations saisonnières s'appliquent tout autant aux émissions de COV dans les milieux anthropisés, mais de manière moins systématique (Jia *et al.*, 2008). Un exemple de variations saisonnières a été observé avec les émissions de COV chlorés provenant des industries et des commerces dont les patrons d'émissions sont plutôt liés aux périodes de production qui connaissent parfois des arrêts ou des ralentissements (de Blas *et al.*, 2012). Des variations journalières et saisonnières de COV ont aussi été mesurées aux heures de pointe dans certaines villes plus particulièrement en hiver (Fillelas et Peñuelas, 2006 ; Ho *et al.*, 2004). Durant l'été, les variations journalières occasionnées par la circulation des voitures étaient à peine détectables.

La position dans l'espace pourrait aussi avoir une influence sur la détection des odeurs. En milieu forestier, la majorité des COV produits proviennent notamment de la biomasse végétale aérienne (Peñuelas *et al.*, 2014). Néanmoins, les racines émettent aussi des COV (Aaltonen *et al.*, 2011), même s'ils sont moins aisément volatilisés. La végétation de sous-étage comme les fougères peuvent aussi contribuer au paysage olfactif d'un endroit boisé en émettant certains COV qui leur est propre (Hewitt et Street,

1992). Par conséquent, l'odeur perçue dans une forêt pourrait être influencée non seulement par des composantes comme la végétation présente, la température de l'air, la saisonnalité, ou l'exposition au vent, mais aussi à la position de l'organe olfactif de l'organisme exposé à ces odeurs.

### **1.5 La détection spécifique des odeurs**

L'olfaction est un sens complexe pour lequel les organismes vivants ont eu recours à diverses adaptations pour l'utiliser (Legouis, 1995). Pourtant la capacité à sentir varie beaucoup entre les animaux et entre les différents mammifères. Par exemple, pour les humains, les molécules de limonène et de citronellal évoquent une odeur d'agrumes alors que ces molécules ont des profils chimiques distincts. Pour une même odeur, certains organismes la percevront comme un tout indécomposable alors que d'autres distingueront chaque composé individuellement (Wilson, 2006). Comme une odeur est constituée de plusieurs molécules et/ou composés chimiques, les organismes doivent être en mesure d'explorer plusieurs dimensions chimiques pour pouvoir interpréter toute la subtilité d'une odeur (Holley, 2006). Cette différence entre le nombre de dimensions explorées et détectées influencera la perception d'une odeur. Chez les animaux, la perception des odeurs sert notamment pour la recherche de nourriture, à la reconnaissance du territoire et à la reconnaissance des congénères pour la reproduction (Legouis, 1995). Par exemple, Clark et ses collaborateurs (2014) ont montré que les oiseaux avec un gros bulbe olfactif ont une capacité de détection à de plus faibles concentrations pour certains odorants contrairement aux oiseaux avec un bulbe olfactif plus petit. La détection de certains COV spécifiques est aussi possible pour certains animaux s'ils les associent à un prédateur, une proie ou à des congénères (Weldon, 1990; Legouis, 1995). Lorsqu'un danger est présent, des comportements d'évitement pourront être observés, notamment lorsqu'un prédateur est détecté. C'est le cas des rats par exemple qui réagissent au 2,4,5-triméthylthiazoline présent dans l'odeur des fèces de chat ou de renard puisqu'ils font partie de leurs prédateurs naturels (Laska *et al.*, 2005). D'autres adaptations comportementales comme celles observées chez les moustiques reposent sur leur système olfactif qui s'active au contact du CO<sub>2</sub> et des molécules odorantes émises par la peau

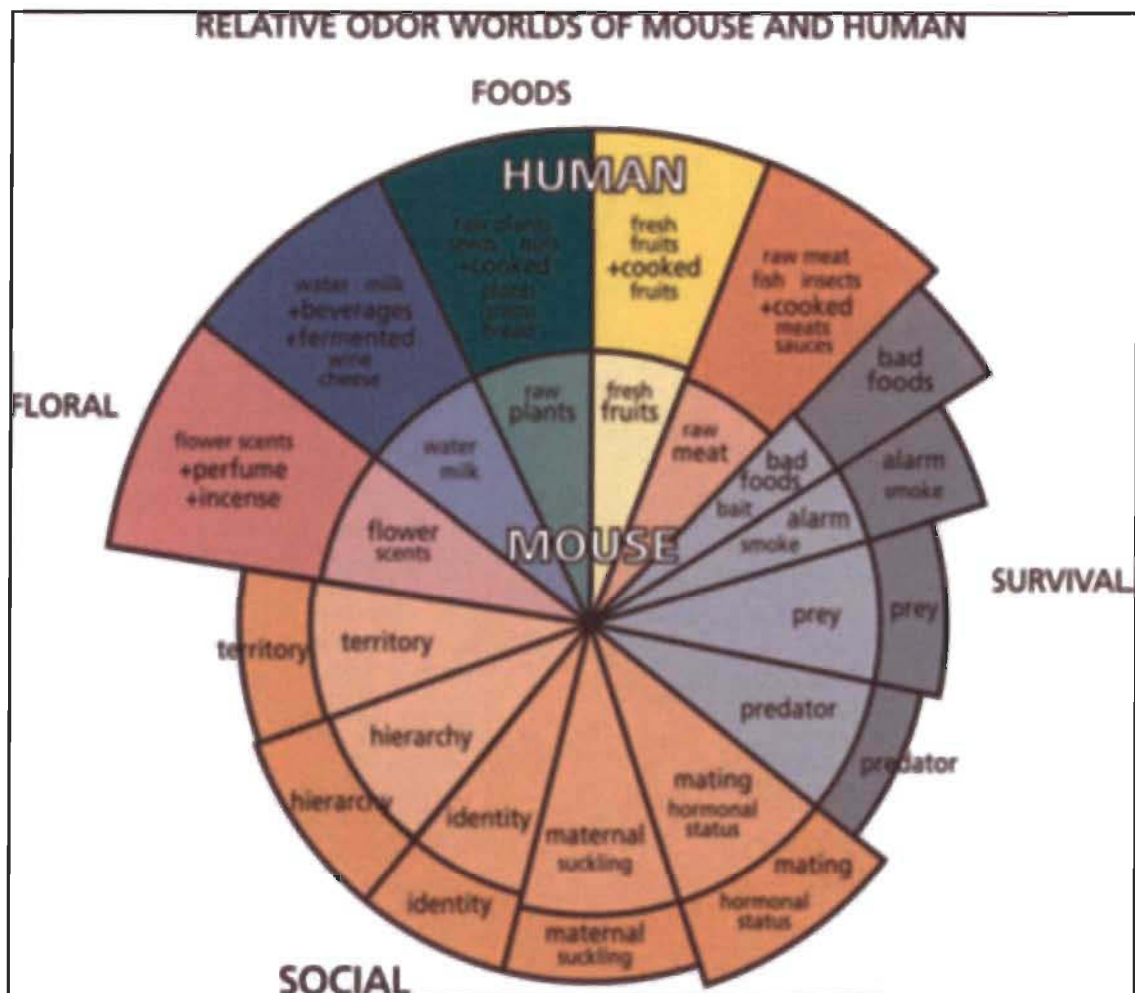
humaine (Gillies, 1980). Lorsque détectés, les moustiques femelles sont attirés par ces molécules odorantes et par la chaleur dégagée (Ray, 2015).

La capacité de détection de certaines odeurs peut aussi être influencée par la hauteur de l'organe olfactif et d'autres caractéristiques physiologiques chez les animaux. Par exemple, les cavités nasales de certains mammifères non-primates qui arpentent le sol sont dotés d'un filtre qui sert notamment à réchauffer, à humidifier et à purifier l'air inspiré et de protéger leurs cavités nasales des contaminations de l'air inspiré (Negus, 1958). La présence de cet appareil filtrant peut avoir des conséquences sur la détection des odeurs chez les animaux qui en sont dotés. Un réchauffement ou une humidification de l'air inspiré pourrait stimuler la détection de certaines molécules odorantes alors qu'une purification pourrait retirer certaines de ces molécules de l'air inspiré (Shepherd, 2004). Chez les humains, une hypothèse veut que ce soit justement parce que notre nez est plus éloigné du sol que notre sens de l'odorat est moins sollicité au détriment de la vue contrairement à d'autres animaux (Shepherd, 2004). La détection des odeurs par les organismes vivants varie donc en fonction des différentes adaptations que chaque espèce a mises en place pour sentir, ce qui complexifie la comparaison des réactions à une même odeur entre différentes espèces.

À l'instar des différentes adaptations animales pour percevoir les paysages olfactifs, diverses méthodes analytiques permettent de mieux comprendre la composition de l'air ambiant. Ces méthodes peuvent, par exemple, mesurer la qualité de l'air notamment en analysant la concentration des gaz qui le compose (de Blas *et al.*, 2012). La chromatographie en phase gazeuse est souvent associée à la spectrométrie de masse afin de séparer les composés chimiques présents dans l'air pour ensuite les interpréter (Zhang *et al.*, 2010). La spectrométrie de masse a, par exemple, permis de mieux comprendre la nature des COV émis par les feuilles des arbres (Burkle et Runyon, 2017). Ces techniques renvoient des résultats détaillés de la composition chimique de l'air analysé à l'échelle des molécules chimiques. Dans des lieux exposés aux phénomènes naturels, les odeurs sont cependant créées par un nombre important de molécules et de composés chimiques. La durée de vie de ces molécules odorantes est aussi un enjeu de

taille puisque les approches analytiques sont particulièrement lentes et n'arrivent pas toujours à bien séparer certains composés chimiques (Jones *et al.*, 2014). Ces inconvénients ajoutés à la faible mobilité des équipements d'analyse en font des moyens peu adéquats pour caractériser les paysages olfactifs d'un grand nombre de sites en milieu naturel en plus de s'éloigner de la réalité perçue par les organismes vivants qui ne détecte qu'une partie de ces molécules odorantes.

À l'inverse des approches quantitatives, les « smell wheels » ou « odour wheels » sont des outils qualitatifs pour catégoriser les odeurs et pallier la variabilité qui peut exister entre les individus. Ces chartes des odeurs sous forme de clé décisionnelle tirent leurs origines de l'industrie vinicole qui souhaitait catégoriser les odeurs perçues dans le vin (Mendrey, 2014). L'avantage de ces outils réside dans la facilité d'utilisation par plusieurs individus. En soumettant des panélistes ou des néophytes à cette clé décisionnelle, il est possible de catégoriser les odeurs en grand groupe. L'utilisation des « smell wheel » à des problématiques qui comparent plusieurs organismes est relativement complexe puisque la description des odeurs est faite du point de vue des humains dans la clé décisionnelle. La perception des autres espèces n'y est pas représentée. La figure 1.2 présente une comparaison entre la perception olfactive des humains et des souris pour quelques odeurs communes ainsi que pour des comportements associés à ces odeurs. Ce type d'outil qui pourrait s'apparenter à une « smellwheel » est moins efficace pour résoudre des problématiques complexes liées à l'assemblage des communautés en raison du nombre peu élevé de comparaisons représentables et sa vision anthropocentriste.



**Figure 1.2** Diagramme circulaire inspiré d'une « smell wheel » pour comparer la perception olfactive entre les humains et les souris. (Tirée de Shepherd, 2004.)

## 1.6 Les nez électroniques

La technologie des nez électroniques vise à recréer l'olfaction des mammifères en reconnaissant les odeurs par le biais d'appareils munis de capteurs sensibles à différents composés et/ou classes de molécules (Persaud et Dodds, 1982). Ces instruments offrent une approche complémentaire pour quantifier objectivement les odeurs dans l'environnement, mais leur capacité de détection se limite à décrire l'environnement olfactif selon la réponse des capteurs aux molécules odorantes échantillonnées. Ils ne permettent cependant pas de nous informer sur la perception évoquée par ces molécules.



Un nez électronique avec plus grand nombre de capteurs devrait permettre une meilleure distinction des odeurs puisqu'ils pourront discriminer plus de composés chimiques ou de mélanges odorants. Les différentes technologies de nez électroniques emploient différents types de capteurs. Les capteurs en polymère de carbone sont communément utilisés dans les nez électroniques et sont principalement conçus pour reconnaître les COV, mais ils sont moins performants pour détecter des substances inorganiques comme celles présentes dans certaines toxines (Wilson, 2012). D'autres capteurs comme ceux à métal-oxydes peuvent quant à eux reconnaître des molécules inorganiques azotées ou carbonées ainsi que certains COV comme le chloroforme, l'éthanol et le méthanol pour en nommer quelques-uns (Wilson, 2012). En contrepartie, l'utilisation de nez électroniques munis de capteurs à métal-oxydes est plus énergivore que pour les nez électroniques avec des capteurs en polymère de carbone en raison de la température d'oxydation souvent élevée qui est nécessaire pour la détection des composés aspirés (Wilson, 2012). Selon le type de nez électronique qui est utilisé, il faut donc s'assurer que le type de capteur concorde avec les molécules que l'on veut détecter. Généralement, 5-6 capteurs sont nécessaires pour pouvoir détecter ou distinguer plusieurs classes de COV (Wilson, 2012). Par exemple, dans le cas du Cyranose 320 (Cyranose Sciences, Pasadena, Californie), les COV détectés regroupent des alcools comme l'isopropanol, des alcanes comme le diméthylheptane et les composés soufrés comme le sulfure d'hydrogène et le dioxyde de soufre (Dragonieri *et al.*, 2007; Lamagna *et al.*, 2008). Ce modèle de nez électronique a été utilisé avec succès dans différents domaines notamment dans le contrôle de qualité en milieu alimentaire (Balasubramanian *et al.*, 2004; Zheng *et al.*, 2009). Les analyses en composantes principales et les analyses par régressions sont des méthodes statistiques couramment employées pour étudier les différences entre les profils olfactifs (Wilson, 2012).

Pour prendre des mesures répétées et quantifier une odeur, un nez électronique s'appuie sur un profil olfactif. Il s'agit d'une signature unique à une odeur en n-dimensions où n dépend du nombre de capteurs du nez électronique. Ce profil olfactif est créé quand les molécules en phases gazeuses frappent les capteurs du nez électronique et induisent une résistance électrique dans ceux-ci (Kalita *et al.*, 2015). Les résistances calculées sont ensuite transmises à un ordinateur, ou traitées directement par le nez électronique pour

former le profil olfactif tel qu'illustré à la figure 1.3. Un cycle d'échantillonnage programmé permet notamment d'ajuster au préalable la vitesse de la pompe interne du nez électronique et la chaleur de la chambre d'analyse, mais aussi de prédéterminer la durée d'un échantillonnage. Pour certains nez électroniques, l'extraction des profils olfactifs vers un ordinateur peut se faire en même temps que la prise de donnée. Lorsque calibrés et optimisés adéquatement, les nez électroniques peuvent répéter des mesures olfactives sans délai tout en sachant que les profils olfactifs seront égaux entre eux.



**Figure 1.3** Schéma simplifié de la création d'un profil olfactif en 32 dimensions par le nez électronique Cyranose 320.

## 1.7 Questions de recherche

Un des principaux défis de l'écologie des paysages olfactifs vient du fait qu'aucun système de classification n'existe pour organiser les odeurs. Le présent projet a pour objectif principal de comprendre la variabilité temporelle et spatiale des paysages olfactifs en milieu forestier dans un gradient d'urbanisation à l'aide du nez électronique Cyranose 320.

La première question de recherche est d'identifier la variabilité spatiale et temporelle des profils olfactifs entre différents paysages forestiers. L'hypothèse associée est que les profils d'odeurs qui sont prélevés de manière rapprochée dans le temps (p. ex. : même journée) ou dans l'espace (p. ex. : même région) seront plus similaires entre eux que les profils d'odeurs plus éloignées.

La seconde question de recherche est de comprendre comment la variabilité spatiale et temporelle des profils olfactifs est affectée par les limites des paysages terrestres. L'hypothèse en lien avec cette question est que la variabilité des profils olfactifs diminuera le long d'un gradient d'intensification des activités humaines si les odeurs d'origine anthropiques masquent les odeurs d'origine naturelle. En d'autres termes, on s'attend à ce que la diversité des profils olfactifs soit plus faible dans les paysages fortement anthropisés. On parlera dans ce cas d'une homogénéisation du paysage olfactif. À l'inverse, il est possible que les odeurs d'origine anthropique s'ajoutent aux odeurs d'origine naturelle, ce qui augmenterait la diversité des profils olfactifs. On parlera dans ce cas d'une fragmentation des paysages olfactifs.

## CHAPITRE II

### COMPARAISON DES PAYSAGES OLFACTIFS EN MILIEUX FORESTIERS À L'AIDE D'UN NEZ ÉLECTRONIQUE

Manuscrit soumis à la revue *Landscape and urban planning*.

Estéban Hamel Jomphe\*, Raphaël Proulx

Canada Research Chair in Ecological Integrity, Département des sciences de l'environnement, Université du Québec à Trois-Rivières, C.P. 500, Trois-Rivières, Québec, G9A 5R7 (Canada)

\* Corresponding author: [esteban.hamel.jomphe@uqtr.ca](mailto:esteban.hamel.jomphe@uqtr.ca)

Keywords: smellscape, forest, Enose, odours, urban gradient

## 2.1 Résumé

Les paysages sensoriels sont des représentations de l'environnement selon des gradients physiologiques, acoustiques ou même olfactifs. Des études récentes suggèrent que les paysages créés par les couleurs, les sons ou les odeurs se complètent en capturant différentes dimensions de l'environnement. Si les sons et les couleurs se quantifient à l'aide de système d'unité de mesure défini, il n'en va pas de même pour les odeurs qui sont plus souvent évaluées selon des critères subjectifs. Les profils olfactifs créés par les nez électroniques fournissent un moyen objectif de quantifier les paysages olfactifs sur le plan spatial et temporel à une échelle très fine. L'objectif de notre étude est d'évaluer i) l'influence des facteurs environnementaux sur les profils olfactifs et ii) si l'hétérogénéité des profils olfactifs de forêts imbriquées dans différentes matrices de paysages différent. Le nez électronique Cyranose 320 muni de 32 capteurs en polymère de carbone a été utilisé pour échantillonner les profils olfactifs des différentes forêts. Durant l'été 2020, 16 forêts réparties dans des matrices de paysages urbains ou naturels ont été échantillonnées autour de la ville de Trois-Rivières (Québec, Canada). Les forêts étaient échantillonnées lors d'une même journée dans un ordre qui variait. Cet échantillonnage a été répété à de multiples occasions. Des comparaisons entre d'autres profils olfactifs échantillonnés à l'intérieur de bâtiment ou en milieu forestier ont aussi été faites. L'analyse des profils olfactifs montre une forte composante temporelle entre les différentes forêts. Pour une même journée d'échantillonnage, les profils olfactifs des forêts étudiés avaient plus de ressemblance entre eux que les profils olfactifs de forêts échantillonnés à deux dates différentes. La localisation géographique des différentes forêts a aussi pu être distinguée de part et d'autre du fleuve Saint-Laurent qui séparait les sites d'échantillonnage. Les capteurs responsables de la distinction temporelle et spatiale n'étaient pas les mêmes. Les comparaisons entre les lieux intérieurs et extérieurs montrent une influence des cycles diurnes dans les cas des profils olfactifs échantillonnés en forêt. Une analyse de dispersion multivariée sur l'homogénéité des groupes a montré que les profils olfactifs des forêts urbaines tendent à être systématiquement plus homogènes que ceux échantillonnés dans les forêts naturelles. Ces résultats suggèrent une organisation multiéchelle des paysages olfactifs qui varient selon les panaches d'odeurs créées par des sources locales et régionales.

## 2.2 Introduction

L'étude des associations entre les espèces, leurs traits fonctionnels, et l'environnement est une pierre angulaire de l'écologie. Néanmoins, les modèles statistiques actuels peinent à expliquer adéquatement la composition des espèces dans une communauté (Martin *et al.*, 2018). L'écologie du paysage est une sous-discipline qui s'intéresse aux relations entre les espèces et l'environnement dans une parcelle de territoire. Il est commun de représenter le paysage dans lequel les espèces évoluent à travers des attributs physionomiques (p. ex., proportion de terres en cultures, densité des routes, indices de couvert végétal). Cependant, les limites de cette vision de l'écologie du paysage ont été exprimées dans un éditorial (Metzger, 2008): « *Landscape ecology so far is too much of a 'visual science'; new frontiers or ecologically scaled indices could be found by considering the spatial and temporal heterogeneity of sounds and smells, i.e. studying sound-scapes and smell-scapes* ». Au cours des dernières années, l'écologie du paysage s'est rapidement développée autour de nouveaux attributs sensoriels, tels que les sons (p. ex., Farina, 2014) et plus récemment encore, les odeurs (Porteous, 1985; Frasnelli et Proulx, 2019). Sous l'impulsion de nouvelles technologies et de capacités analytiques accrues, les travaux de recherches en écologie des paysages acoustiques ont explosé. En contrepartie, l'étude des paysages olfactifs en est toujours à ses balbutiements, notamment en raison de l'absence de méthodes standards et de mesures objectives des profils olfactifs dans l'environnement.

L'écologie du paysage s'appuie sur le « *sensory drive theory* », qui stipule que la sélection d'habitats et les comportements d'adaptation sont déterminés par les traits sensoriels des organismes (Endler, 1993). Dans ce contexte, l'écologie des paysages olfactifs cherche à décrire la répartition spatiale et temporelle des odeurs dans l'environnement (Frasnelli et Proulx, 2019). Une odeur se définit ici comme la perception d'un ensemble de molécules chimiques volatiles qui sont détectées de manière ponctuelle par le système olfactif d'un organisme. Pour reconnaître la singularité d'une odeur, les organismes capables de sentir doivent explorer simultanément un ensemble de propriétés chimiques, ce qu'ils font en multipliant les récepteurs olfactifs, chacun répondant à une combinaison de ces propriétés (Holley, 2006). Par exemple,

une analyse synthèse du nombre de neurones olfactifs pour différents mammifères a montré que leur nombre est autour de 10 millions pour plusieurs espèces comme les souris, les cochons, les humains et les singes (McGann, 2017). La sensibilité des différents récepteurs à une odeur forme ce qu'il convient d'appeler un profil olfactif; une sorte d'empreinte des molécules odorantes dans l'air (Kalita *et al.*, 2015).

Les odeurs en nature sont influencées par le contexte géographique, les conditions extérieures, les cycles diurnes et saisonniers. Lorsqu'analysés sur de petites superficies, les profils olfactifs sont affectés par les sources locales et varient largement dans le temps et l'espace (Porteous, 1985). En comparaison, les profils olfactifs intégrés sur de grandes superficies reflèteront plutôt la dominance de sources régionales. Les profils olfactifs mesurés varieront aussi selon la concentration en molécules odorantes (Wilson, 2006). D'autres phénomènes naturels viennent moduler l'émission et le transport des molécules odorantes, comme le rayonnement incident, le déplacement des masses d'air et la température (Kesselmeyer et Staud, 1999; Cetin *et al.*, 2003). Parmi les sources d'odeurs, les milieux urbains sont souvent opposés aux milieux forestiers puisque les profils olfactifs retrouvés dans l'un et l'autre de ces milieux varient en termes de composition (Zemanchova et Brechler) et de persistances dans l'environnement (Atkinson 2000; Simpson et Volociuk, 2019).

Afin de décrire les profils olfactifs, les composés organiques volatils (COV) peuvent être étudiés puisqu'ils forment un groupe de molécules odorantes qui peuvent réagir avec les composés ozonisés de l'atmosphère (Farré-Armengol *et al.*, 2016). L'effet de la température sur l'émission de COV par la végétation se traduit par une augmentation de leur volatilité jusqu'à une température critique (Niinemets *et al.*, 2004). Les mouvements d'air et les vents dominants peuvent aussi influencer la quantité de COV retrouvée dans l'environnement en approchant ou en éloignant les panaches de molécules odorantes (Cetin *et al.*, 2003). Les COV retrouvés en forêt appartiennent majoritairement à la famille des isoprénoides, et sont métabolisés par les plantes dans des étapes suivant le cycle de Calvin lors de la photosynthèse (Dudareva *et al.*, 2006). La durée de vie de ces molécules varie entre quelques minutes à quelques heures (Atkinson 2000). Des cycles diurnes et

saisonniers des COV ont été recensés en milieu forestier en lien avec les échanges gazeux de la végétation avec l'environnement (Staud *et al.*, 1997, Seco *et al.*, 2011). Enfin, des changements saisonniers associés au climat et aux activités humaines peuvent aussi influencer la persistance des COV d'origine anthropique dans les villes à des échelles temporelles variées (Quercia *et al.* 2015; Filellas et Peñuelas, 2006). Un exemple de changement saisonnier des paysages olfactifs est relié au débourrement des bourgeons au printemps que les humains associent au changement de saison.

Il existe différentes façons de décrire les odeurs dans l'environnement. Des approches analytiques comme la spectrométrie de masse et la chromatographie en phase gazeuse permettent de mesurer la composition chimique de l'air ambiant et donc de décrire les profils olfactifs au niveau moléculaire (de Blas, et al. 2012). Les « smellswheel », un outil tiré de l'industrie vinicole, s'appuient quant à eux sur le caractère qualitatif des odeurs pour en décrire l'assemblage (Mendrey, 2014). La technologie des nez électroniques allie en partie ces deux méthodes en tentant de répliquer l'appareil olfactif des mammifères avec une série de capteurs dont l'affinité aux molécules chimiques diffère (Persaud et Dodds, 1982). Quand les capteurs d'un nez électronique sont exposés à un composé en phase gazeuse, la résistance induite par les molécules chimiques sur un ensemble de capteurs est calculée et analysée sous forme d'un profil olfactif (Cyranose Practical Guide, 2013). Le nombre de capteurs du nez électronique correspond au nombre de dimensions du profil olfactif (Kalita *et al.*, 2015). Plusieurs études visant à identifier des profils olfactifs de COV ont utilisé des nez électroniques avec succès. Une étude sur un fleuve d'Argentine a utilisé le nez électronique Cyranose 320 pour évaluer la qualité d'eau (Lamagna *et al.*, 2008). Les résultats de l'étude montrent des différences spatiales entre les sections plus ou moins polluées du fleuve. D'autres études ont utilisé le nez électronique Cyranose 320 dans un processus de contrôle de la qualité alimentaire (Balasubramanian *et al.*, 2004; Zheng *et al.*, 2009). Par exemple, Hu et ses collaborateurs (2008) ont pu différencier les huitres entreposées à différentes températures pendant des périodes de temps différentes en fonction des profils olfactifs mesurés par le nez électronique.



Dans la présente étude, le nez électronique Cyranose 320 est utilisé pour comprendre la variabilité spatiale et temporelle des paysages olfactifs des milieux forestiers répartis le long d'un gradient d'urbanisation. En premier lieu, nous avons cherché à savoir si les paysages olfactifs extérieurs étaient influencés par les phénomènes naturels ponctuels, comme la position au-dessus du sol, le vent, la température de l'air et le rayonnement incident de la lumière en les comparant à des paysages olfactifs intérieurs à l'abri des phénomènes naturels. Ensuite, nous avons voulu explorer comment les limites terrestres influencent l'organisation des paysages olfactifs dans le temps et dans l'espace. La variation temporelle des profils olfactifs forestiers pourrait être attribuable à des processus journaliers et saisonniers dans les forêts. Quant à la variabilité spatiale, il pourrait exister des différences locales et régionales liées à une fragmentation des paysages olfactifs si les molécules odorantes des milieux urbains s'additionnent aux profils olfactifs émis par la végétation pour produire des paysages olfactifs plus diversifiés. Au contraire si les molécules odorantes de sources anthropiques venaient plutôt masquer celles émises par la végétation, on constaterait une homogénéisation des paysages olfactifs dans les forêts en milieu urbain. Cette étude est la première à tester l'hypothèse de la fragmentation des paysages olfactifs.

## **2.3 Matériels et méthodes**

### **2.3.1 Échantillonnage des profils olfactifs**

Un profil olfactif était généré par le nez électronique Cyranose 320 (Cyranose Sciences, Pasadena, Californie) à partir des résistances électriques induites au contact des molécules environnantes sur les capteurs. Cet appareil est muni de 32 capteurs en polymère de carbone qui sont sensibles à des composés chimiques spécifiques ou des classes de composés chimiques. Le tableau 2.1 décrit les paramètres d'un cycle d'échantillonnage du Cyranose 320. Un échantillonnage débutait avec l'installation du nez électronique sur un trépied de caméra à une hauteur de 120 cm. Ce dernier était connecté à un ordinateur portable qui enregistrerait les valeurs de résistance en continu sur une période de 70 secondes. Au cours d'un cycle d'échantillonnage, la température interne

de la chambre de mesure du Cyranose 320 était fixée à 40°C et la vitesse de la pompe à 180 ml/min. Un profil olfactif était obtenu en calculant la moyenne des valeurs de résistance des dix dernières secondes pour chacun des 32 capteurs. Des tests préliminaires dans différents environnements ont permis de confirmer la stabilité des valeurs aux capteurs après 30 secondes d'échantillonnage. Pendant la prise de mesure du nez électronique, les observateurs s'éloignaient de celui-ci et se plaçaient face au vent, s'il y en avait, afin de ne pas influencer l'enregistrement des capteurs avec leur odeur corporelle.

**Tableau 2.1**

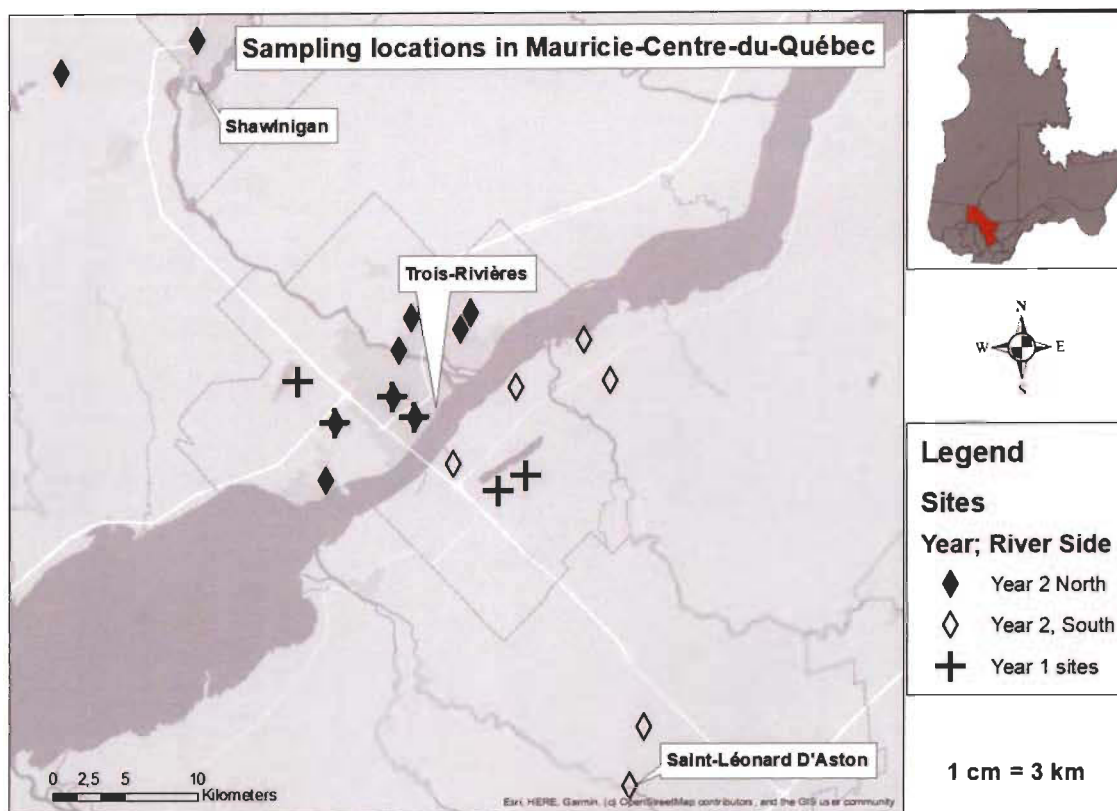
Paramètres d'échantillonnage du Cyranose 320 pour l'analyse d'un échantillon d'air

<b>Paramètres d'acquisition du Cyranose 320</b>		
<b>Étape d'échantillonnage</b>	<b>Temps (s)</b>	<b>Vitesse de la pompe</b>
Baseline Purge	10	Rapide
Sample Draw 1	40	Rapide
Sample Draw 2	0	Rapide
Snout removal	0	Rapide
1 <sup>st</sup> Sample Gas Purge	10	Rapide
1 <sup>st</sup> Air Intake Purge	10	Rapide
2 <sup>nd</sup> Sample Gas Purge	0	Rapide
2 <sup>nd</sup> Air Intake Purge	0	Rapide
Durée totale d'un cycle d'échantillonnage	70	
<b>Paramètres additionnels du Cyranose 320</b>		
Substrate Heater	En fonction	
Capteurs actifs	Tous	
Algorithme	Canonique	

### 2.3.2 Influence des facteurs environnementaux sur les profils olfactifs

Une campagne d'échantillonnage préliminaire en 2019 a permis d'étudier l'influence de variables environnementales sur l'organisation des profils olfactifs dans des forêts de la

région de la Mauricie- Centre-du-Québec (Québec, Canada). Les parcelles forestières étaient réparties le long d'un gradient d'urbanisation au nord et au sud de la ville de Trois-Rivières (Figure 2.1). Chaque parcelle a été visitée à six reprises entre le 5 août et le 8 octobre 2019. Toutes les parcelles étaient échantillonnées la même journée en variant aléatoirement la séquence de visite des six forêts. Les données étaient prises aux quatre coins et au centre de la parcelle à deux élévations, soit près du sol (10 cm) et sur un trépied (120 cm), pour un grand total de 348 échantillons. Douze échantillons n'ont pas pu être traités pour des questions techniques, notamment en raison d'échantillons incomplets. L'heure de la journée et la température de l'air étaient notées lors de chaque prise d'échantillon. Un anémomètre avec thermomètre intégré (modèle EA-3010U, La Crosse Technology) a été utilisé pour estimer la vitesse du vent en kilomètre/ heure ( $\text{Kmh}^{-1}$ ) et la température en degré Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ). Le rayonnement solaire incident a été mesuré en watt par mètre carré ( $\text{Wm}^{-2}$ ) à l'aide d'un luxmètre spécifiquement calibré (Solarmeter Model 10.0, Solar Light Company). Une analyse procustéenne a permis de détecter des différences entre les profils olfactifs échantillonnés au sol et sur le trépied. La fonction « procrustes » de l'extension *vegan* du logiciel R a été utilisée (Jari Oksanen *et al.*, 2020). Ce test visait à comparer les profils olfactifs pour déterminer leur pourcentage de ressemblance. Des tests de corrélations de Spearman entre les résistances de chaque capteur du Cyranose 320 et les différentes variables prises séparément (heure, rayonnement, température et vent) ont permis de quantifier la réponse des 32 capteurs à ces facteurs environnementaux. Comme les coefficients de détermination des corrélations de Spearman étaient similaires aux résultats obtenus par des corrélations de Pearson, cela suggère la linéarité des relations.



**Figure 2.1 Localisation des sites échantillonnés lors des campagnes de 2019 (croix) et 2020 (losange).**  
Trois sites ont été échantillonnés au cours des deux campagnes de terrain. Trois et onze sites ont été échantillonnés uniquement en 2019 et 2020, respectivement.

### 2.3.3 Cycle diurne des profils olfactifs

Afin d'étudier plus en détail l'influence de l'heure de la journée sur les profils olfactifs des forêts, des chronoséquences de profils olfactifs ont été réalisées dans quatre parcelles forestières et dans trois lieux intérieurs. Les forêts étudiées pour cette expérience se trouvaient dans différentes régions du Québec (Canada), dont deux dans la région de la Mauricie, une dans la région métropolitaine de Québec et une autre dans la région de Charlevoix. Les lieux intérieurs sélectionnés étaient sans activités humaines ou commerciales et devaient se trouver à l'abri des phénomènes naturels extérieurs. Au cours de chaque chronoséquence, un profil olfactif était échantillonné chaque heure entre 7 h 30 et 21 h 30. Des corrélations de Spearman entre les résistances de chaque capteur du Cyranose 320 et l'heure de la journée ont été calculés pour les chronoséquences de profils

olfactifs échantillonnés. L'influence des processus journaliers dans les deux types d'environnement a pu être isolée ensuite en comparant les coefficients de corrélation de pour les lieux intérieurs et les forêts.

#### **2.3.4 Saisonnalité et spatialité des profils olfactifs**

Une seconde campagne d'échantillonnage en 2020 a permis d'étudier l'organisation spatiale et temporelle des profils olfactifs de parcelles forestières insérées dans des paysages considérés urbains ou naturels (Figure 2.1). La moitié des parcelles forestières échantillonnées étaient situées dans un paysage naturel entièrement forestier (c.-à-d., une forêt dans une forêt), alors que l'autre moitié des parcelles étaient situées dans un paysage urbain. Chaque forêt urbaine était appariée géographiquement à une forêt dite naturelle à proximité. La sélection des parcelles était basée sur une analyse géospatiale réalisée à l'aide du logiciel d'information géographique QGIS (QGIS Development Team, 2021). Cette analyse préliminaire visait à filtrer les forêts de plus d'un hectare en milieu urbain à l'aide des couches d'information provenant des cartes écoforestières de la région et des installations urbaines aux alentours, tels que les routes et les bâtiments. Dans le cas des forêts insérées dans un paysage considéré naturel, l'analyse géospatiale visait à cibler des forêts de la plus grande superficie possible non loin des parcelles en milieu urbain. La densité de tiges entre les forêts était semblable, mais la hauteur des tiges variait. L'âge des forêts était en moyenne de 50 ans (entre 30 et 80 ans) sur la carte écoforestière de la région. La superficie des peuplements forestiers oscillait entre 2 et 36 hectares (médiane de 6 hectares) dans le cas des forêts urbaines et 22 et 190 hectares (médiane de 72 hectares) dans le cas des forêts dites naturelles. Les essences d'arbres présentes dans les forêts étaient typiques du domaine bioclimatique régional de l'érablière à tilleul sans différence systématique. Une validation visuelle des lieux permettait ensuite de confirmer l'accessibilité de l'endroit, l'absence de perturbation naturelle et l'absence d'activités anthropiques motorisées dans les parcelles forestières ciblées. Les forêts urbaines étaient bordées par diverses installations anthropiques comme des bâtiments et des voies de circulation alors que les forêts dites naturelles se trouvaient à l'intérieur d'un plus grand peuplement forestier. Le profil olfactif était échantillonné à un point au centre de chaque

parcelle, à une élévation de 120 cm au-dessus du sol. Les 16 parcelles forestières étaient visitées au cours d'une même journée, chaque fois dans un ordre différent pour d'éviter de confondre l'influence de l'heure de la journée avec celle de la position géographique. Toutes les forêts ont été visitées à six reprises entre les mois de juin et août lors de journées sans précipitation et de vent faible.

### **2.3.5 Hétérogénéité des profils olfactifs dans des paysages urbains et naturels**

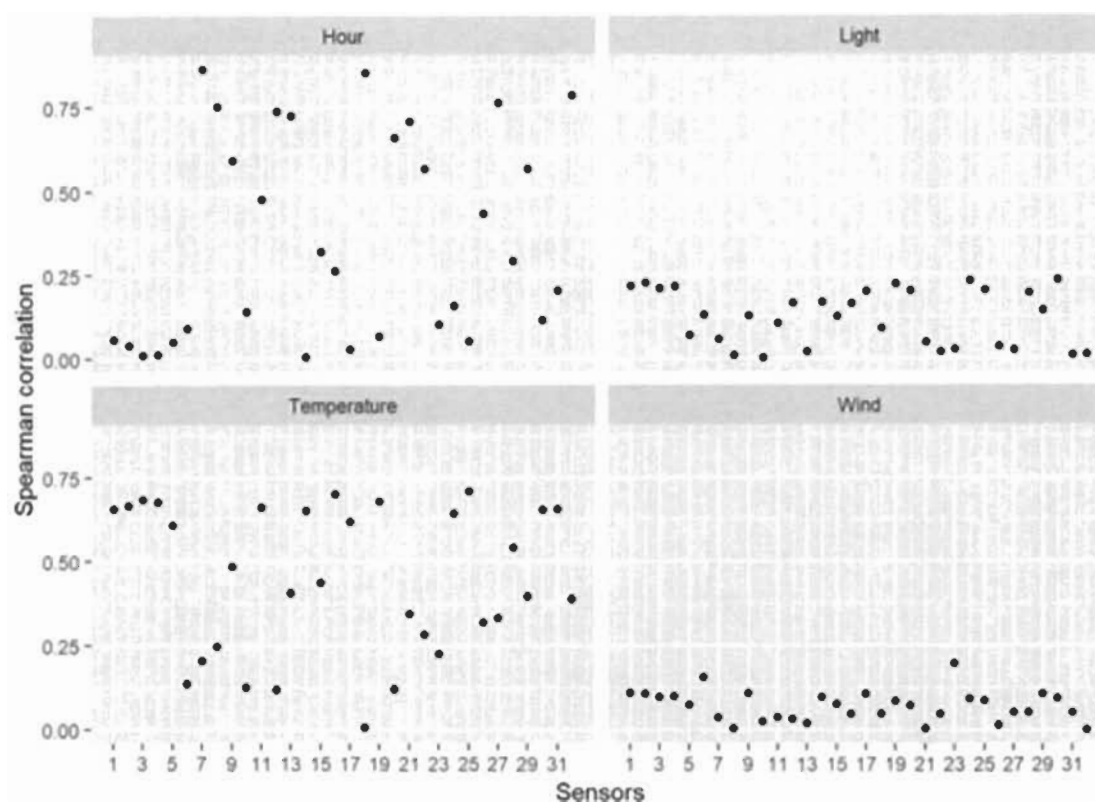
L'ensemble des profils olfactifs récoltés en 2020 consistait en 6 visites de 16 parcelles forestières (8 urbaines et 8 dites naturelles) pour un total de 96 échantillons. Deux échantillons n'ont pu être analysés en raison de difficultés à accéder à certains sites. L'influence du cycle diurne sur les profils olfactifs a été éliminée en récupérant les résidus des relations linéaires bivariées entre les résistances des capteurs et l'heure de la journée. Une analyse en coordonnées principales sur les distances euclidiennes a ensuite été réalisée pour représenter dans un espace réduit la réponse des 32 capteurs du Cyranose 320. La fonction « rda » de l'extension *vegan* du logiciel R a été utilisée (Jari Oksanen *et al.*, 2020). Des tests de dispersion multivariés ont permis de décrire la variabilité des paysages olfactifs par rapport à des variables catégoriques comme le type de paysage (forêt urbaine vs naturel), les différentes dates d'échantillonnage et les paires de forêts échantillonnées. Ces tests d'hétérogénéité des groupes ont été réalisés avec la fonction « betadisper » de l'extension *vegan* du logiciel R (Jari Oksanen *et al.*, 2020). Cet enchaînement de tests statistiques a été le même pour l'analyse des facteurs environnementaux sur les profils olfactifs échantillonnés en 2019.

## **2.4 Résultats**

### **2.4.1 Influence des facteurs environnementaux sur les profils olfactifs**

La campagne d'échantillonnage de 2019 aura permis d'identifier la température de l'air et de l'heure de la journée comme des facteurs déterminants de la variation des profils olfactifs en forêt, indépendamment du type de paysage autour. En contrepartie, la hauteur

d'échantillonnage n'influençait pas les profils olfactifs. L'analyse Procruste de corrélation a révélé une forte similitude entre les profils olfactifs pris près du sol et ceux pris en hauteur aux mêmes sites (Coefficient de détermination Procruste = 0.96). Pour cette raison, les analyses subséquentes ont été réalisées uniquement sur les profils olfactifs obtenus sur un trépied à 120 cm au-dessus du sol. Les valeurs de rayonnement solaire étaient réparties entre 1 et 465  $\text{wm}^{-2}$  (médiane 29), entre 10,5 °C et 26,9 °C (médiane 19,2 °C) pour la température de l'air et entre 0 km/h et 6 km/h (médiane 0km/h) pour la vitesse du vent. Aucune corrélation n'a été observée entre la réponse des 32 capteurs du Cyranose 320 et les valeurs de rayonnement ou de vitesse du vent (Figure 2.2). En comparaison, près de la moitié des capteurs montraient une corrélation supérieure à 0,5 avec l'heure de la journée ou la température (Figure 2.2), ce qui suggère que le Cyranose 320 est sensible à ces facteurs. On remarque également que les capteurs qui corrélaient fortement à l'heure de la journée et à la température ne sont pas les mêmes. Un exemple concret de cette différence est illustré avec les capteurs #5 et #31 qui expriment une corrélation supérieure à 0,6 dans le cas de la température, alors que la corrélation observée avec l'heure est inférieure à 0,25. Ainsi, les corrélations exprimées pour chaque capteur selon l'heure de la journée ne sont pas le reflet de variations diurnes dans les températures. Les corrélations positives entre la résistance induite dans les capteurs et la température de l'air traduiraient plutôt une dynamique saisonnière dans les profils olfactifs forestiers.



**Figure 2.2** Coefficients de corrélation de Spearman pour les 32 capteurs du Cyranose 320.

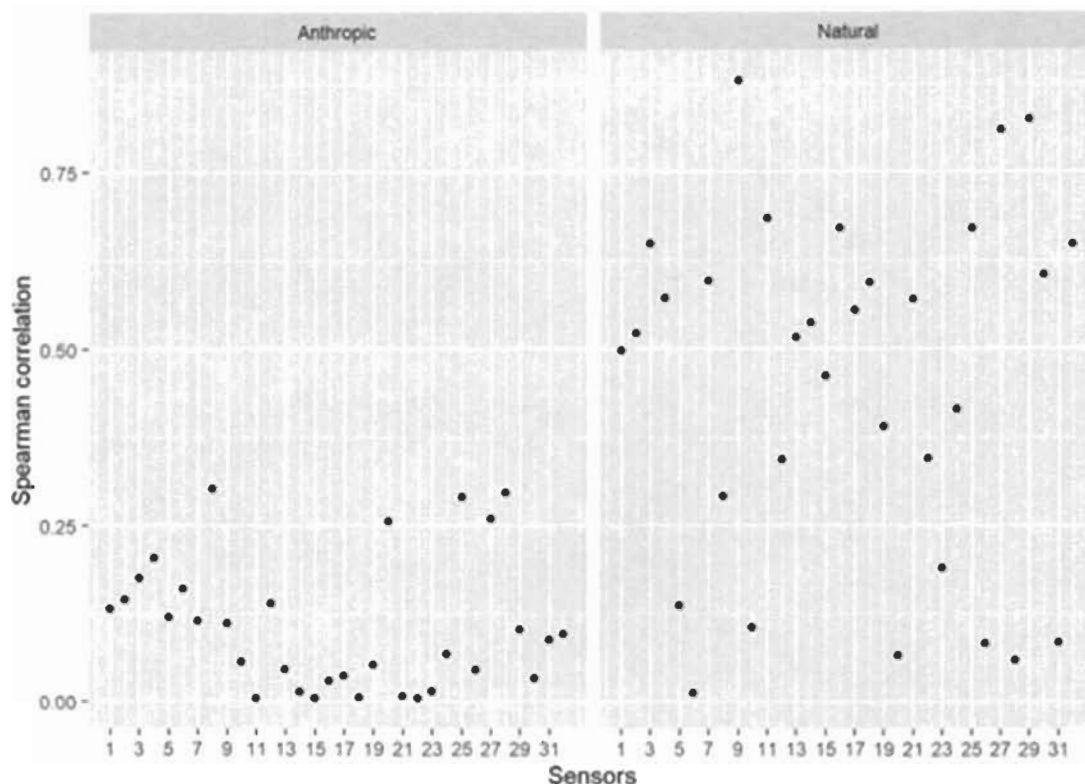
Les corrélations ont été calculées sur les 180 profils olfactifs échantillonnés en forêt au cours de la campagne de 2019, entre les résistances de chaque capteur et une des quatre variables environnementales: heure de la journée (Hour), lumière (Light), température de l'air (Température) et vitesse du vent (Wind).

#### 2.4.2 Cycle diurne des profils olfactifs

La campagne d'échantillonnage de 2019 a permis d'identifier l'influence du cycle diurne et de la saisonnalité sur les profils olfactifs. Pour appuyer ces observations, des chronoséquences de profils olfactifs ont été réalisées dans des milieux forestiers et des lieux intérieurs à l'abri des phénomènes naturels. Des corrélations de Spearman entre les résistances de chaque capteur du Cyranose 320 et l'heure de la journée ont permis de quantifier la réponse des 32 capteurs au cycle diurne. Les résultats montrent que les valeurs de plusieurs capteurs corréleront à l'heure de la journée pour les milieux forestiers



( $p > 0.5$ ), alors que ces corrélations ne sont pas observées dans les lieux intérieurs (Figure 2.3).

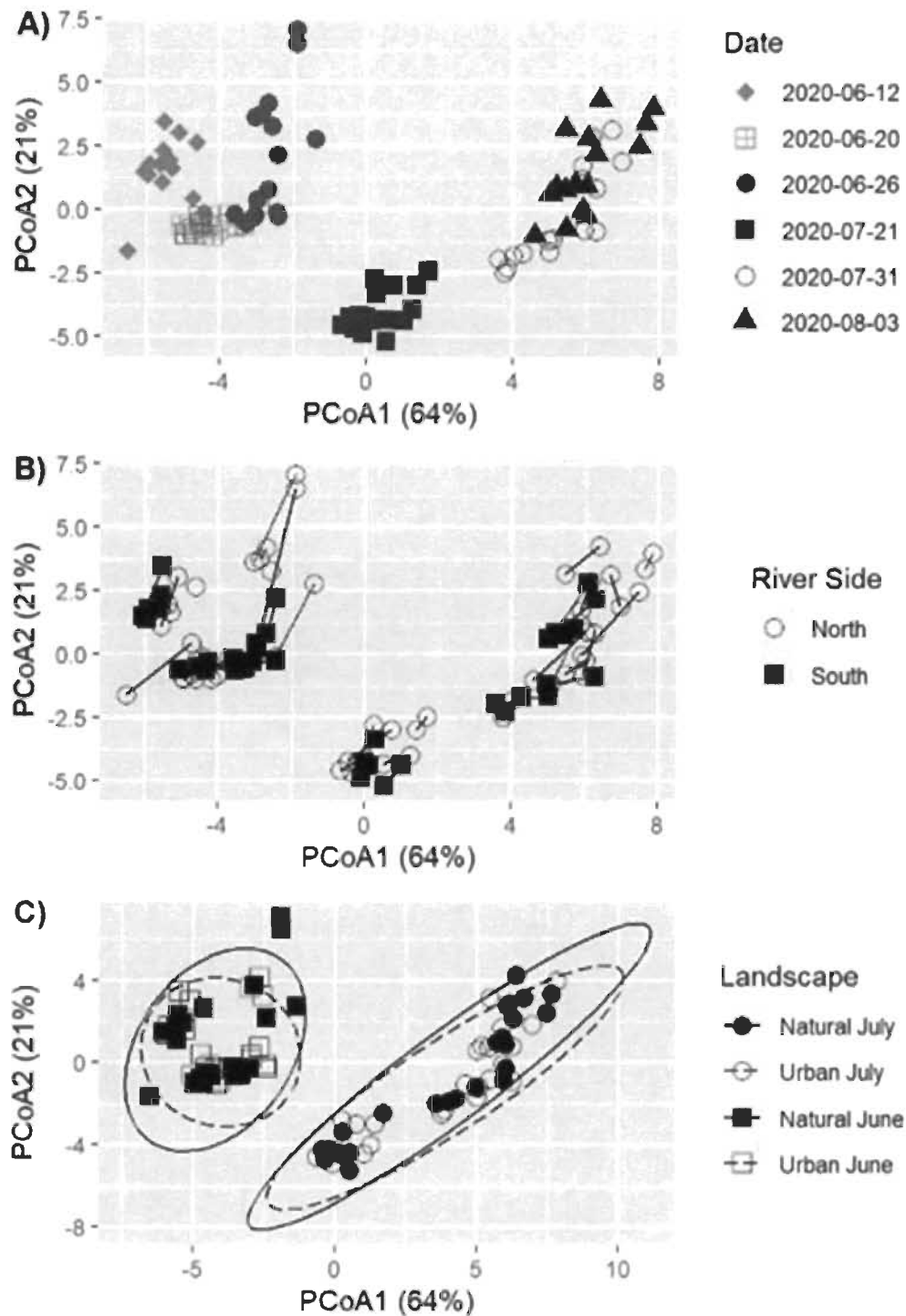


**Figure 2.3** Coefficient de corrélation de Spearman pour les 32 capteurs du Cyranose 320. Les corrélations avec l'heure de la journée ont été calculées sur les profils olfactifs échantillonnés à l'intérieur (graphique de gauche; Anthropic) et à l'extérieur (graphique de droite; Natural).

### 2.4.3 Saisonnalité et spatialité des profils olfactifs

La campagne d'échantillonnage de 2020 visait à mieux comprendre l'organisation et la variabilité spatiale et temporelle des profils olfactifs de 16 parcelles forestières insérées dans des paysages urbains et naturels. Chaque parcelle a été visitée à six reprises sur une période de deux mois. L'analyse en coordonnées principales sur les valeurs ajustées pour l'heure de la journée révèle deux principaux axes d'organisation, chacun expliquant respectivement 64 % et 21 % de la variation dans les 94 profils olfactifs (Figure 2.4). Seuls les deux premiers axes qui expliquaient 85 % de la variation dans les

profils olfactifs ont été conservés pour les analyses subséquentes. Le premier axe sépare les forêts selon la date d'échantillonnage avec les profils olfactifs du début juin à gauche et les profils de fin août à droite dans le graphique d'ordination (Figure 2.4A). Le deuxième axe révèle l'organisation spatiale des profils olfactifs selon l'échelle géographique. Les forêts échantillonnées sur la rive nord du fleuve ont des valeurs en moyenne plus élevées sur le deuxième axe que les forêts de la rive sud. Par ailleurs, les profils olfactifs des paires de forêts sont plus similaires entre eux qu'avec les autres profils à une même date d'échantillonnage (Figure 2.4B). Ces résultats suggèrent la présence de forts gradients saisonniers et géographiques dans l'organisation des profils olfactifs en forêt, indépendamment du type de paysage.



**Figure 2.4** Analyse en coordonnées principales sur les profils olfactifs des parcelles forestières échantillonnées au cours de la campagne 2020. Ordination des parcelles selon A) la date, B) la proximité géographique et C) le type de paysage échantillonné pour chaque mois. Les forêts urbaines et naturelles étaient appariées dans chaque secteur géographique. Les paires sont représentées par un trait plein dans le graphique du centre (B).

#### **2.4.4 Hétérogénéité des profils olfactifs dans des paysages urbains et naturels**

Afin de tester l'hypothèse que le type de paysage (urbain vs naturel forestier) autour des forêts influence l'hétérogénéité des profils olfactifs, un test de dispersion multivarié a été réalisé sur les profils olfactifs issus de la seconde campagne d'échantillonnage. Ce test visait à évaluer si les profils olfactifs de forêts insérées dans un paysage urbain sont plus similaires entre eux que les profils olfactifs de forêts insérées dans un paysage naturel. Les échantillons de profils olfactifs ont été stratifiés par période d'échantillonnage afin de prendre en compte l'effet de saisonnalité. Quatre groupes ont ainsi été générés: les forêts urbaines en juin, les forêts urbaines en juillet, les forêts naturelles en juin et les forêts naturelles en juillet (Figure 2.4C). Le test de dispersion multivariée révèle que les forêts urbaines en juin montraient une hétérogénéité spatiale plus faible des profils olfactifs que les forêts naturelles en juillet ( $df = 90, F = 2,399, P = 0,07$ ). Aucune autre différence notable n'a pu être détectée, même si les forêts urbaines étaient systématiquement moins hétérogènes que les forêts naturelles à une même période (Figure 2.4C). Ces différences laissent néanmoins présager une homogénéisation du paysage olfactif dans les forêts urbaines alors que ce n'est pas nécessairement le cas en forêt naturelle.

### **2.5 Discussion**

#### **2.5.1 Influence des facteurs environnementaux sur les profils olfactifs**

L'analyse des données de la campagne de terrain en 2019 a montré que des facteurs environnementaux comme l'heure de la journée et la température influençaient les profils olfactifs en milieu forestier, contrairement à la vitesse du vent, la hauteur de l'échantillon ou le rayonnement solaire incident qui avaient peu d'influence. Les variables comme la vitesse du vent ou le rayonnement solaire étaient cependant testés localement autour du site d'échantillonnage et leurs mesures tendaient vers de faibles valeurs. En milieu naturel, les variations de température peuvent aussi s'accompagner de changement dans l'humidité de l'air. Dans les profils olfactifs échantillonnés, il est possible que l'influence de la température sur la vapeur d'eau dans l'air se soit traduite par la corrélation forte des capteurs #5 et #31 qui réagissent aux molécules polaires (Cyranose Practical Guide, 2013).

Dans certaines études préalables, il a été observé que des variations d'humidité ou de température peuvent affecter les profils olfactifs, car les capteurs du nez électronique sont sensibles à ces variations et les traitent comme des différences chimiques (Cyrano Practical Guide, 2013). Dans notre étude, la température dans la chambre d'échantillonnage du Cyrano 320 était contrôlée et constante ce qui suggère que la corrélation observée entre la température et les profils olfactifs pourrait être due à des variations provenant de processus biologiques propres aux forêts. Par exemple, les réactions photosynthétiques peuvent être interrompues en période de stress hydrique lorsque les stomates des plantes se ferment pour limiter les pertes en eau. De cette façon, les variations de température peuvent influencer les émissions de certains COV à travers les réactions photosynthétiques (Guenther *et al.*, 1991; Zemanchova et Brechler, 2010) et possiblement entraîner des différences de profils olfactifs. Des indicateurs comme la vitesse du vent, la hauteur des capteurs par rapport au sol et le rayonnement incident ne semblaient pas participer à la distinction des profils olfactifs. Il est possible que ces indicateurs aient été trop peu variables pour influencer les profils olfactifs.

### 2.5.2 Cycle diurne des profils olfactifs

Les corrélations détectées entre l'heure de la journée et les profils olfactifs en forêts, au contraire des lieux intérieurs, suggèrent l'influence de cycles naturels quotidiens. L'influence de l'heure peut être associée à un cycle diurne dans l'émission des COV émis par la végétation, tel qu'observé par Seco et ses collaborateurs (2011). Dans cette étude conduite en Espagne, les auteurs ont comparé l'émission de COV provenant de la végétation en été et en hiver à l'aide de mesures obtenues par spectrométrie de masse. Leurs données ont montré des cycles diurnes dans les émissions de COV, comme les isoprénoïdes, ainsi que les COV oxygénés et à chaîne courte (OxCOV) provenant de la végétation. Les variations observées semblaient associées à des processus biologiques, comme la photosynthèse, ou environnementaux comme des changements dans le régime local des vents (Seco *et al.*, 2011). Certains COV émis par la végétation, comme les isoprénoïdes et les terpènes, sont connus pour présenter des cycles diurnes (Staud et Bertin, 1997). L'ouverture des stomates en début de journée libère une rafale de COV

comme les acides carboxyliques (Niinemets et al., 2003). D'autres observations ont montré que les émissions d'isoprénoides variaient à l'échelle de l'heure pour certains arbres feuillus (Guenther 1993; Filellas et Peñuelas, 2006). Dans une étude qui visait à comprendre la variabilité spatiale des concentrations de COV et de leurs sources en milieu urbain, les auteurs ont observé que les pics d'émissions d'isoprénoides coïncidaient avec des activités humaines comme la densité d'automobiles sur les routes aux heures de pointe en hiver, mais que ces pics étaient atténués en été (Filella et Peñuelas, 2006). Le cycle diurne capté dans nos échantillons suggère que les variations observées dans les profils olfactifs des forêts proviennent des processus naturels journaliers.

### **2.5.3 Saisonnalité et spatialité des profils olfactifs**

Nos résultats suggèrent que le nez électronique Cyranose 320 était en mesure de discriminer les profils olfactifs forestiers à plusieurs échelles spatiales et temporelles. L'ordination des profils olfactifs selon la date d'échantillonnage (Figure 2.4A) montre une forte organisation temporelle saisonnière, indépendamment de l'effet de l'heure de la journée sur ceux-ci. Cette saisonnalité pourrait être associée à des processus phénologiques, tels que l'initiation décalée de la croissance, la sénescence, ou la floraison chez différentes espèces végétales, et ce pour différents étages de la canopée (Dudareva, 2004; Hewitt et Street, 1992).

L'ordination des profils olfactifs montre également que les odeurs sont organisées à plusieurs échelles spatiales (Figure 2.4B). À l'échelle régionale, les profils olfactifs des forêts situées sur les rives nord et sud du fleuve Saint-Laurent se discriminent sur le premier axe de l'ordination (Figure 2.4B). À l'échelle locale, les sites forestiers géographiquement appariés (c.-à-d., urbain vs naturel) présentent des profils olfactifs plus similaires entre eux, indépendamment des effets saisonniers ou du contexte régional. Ces différences régionales rejoignent les conclusions de l'étude de Lamagna et ses collaborateurs (2008), où le Cyranose 320 était en mesure de différencier la qualité d'eau dans les sous-bassins d'une rivière. Dans notre étude, les parcelles forestières étaient situées à une distance moyenne de 15 km entre les deux rives du fleuve (minimum 4 km,

maximum 58 km). Sur la rive du côté nord, on retrouve la ville de Trois-Rivières qui compte environ 135 000 habitants. On y retrouve les commodités d'une petite ville ainsi que des industries papetières près du fleuve. La rive sud est bordée par la municipalité de Bécancour qui compte un peu plus de 10 000 habitants. L'utilisation des terres y est principalement agricole. La présence du fleuve Saint-Laurent pourrait aussi influencer sur le climat régional. À cette échelle, les masses d'air sont affectées par des facteurs météorologiques et par l'utilisation du territoire (Manteghi *et al.*, 2015). On peut présumer que ce sont donc ces effets régionaux sur les masses d'air qui ont été détectés par le nez électronique dans notre dispositif.

L'organisation hiérarchique des profils olfactifs à différentes échelles de détection rejoint le cadre conceptuel proposé par Henshaw (2013). Celui-ci propose que les paysages olfactifs soient divisés en trois niveaux. Le premier niveau décrit les odeurs dites de fond, qui s'organisent à très larges échelles. Le niveau intermédiaire correspond aux profils olfactifs associés à un type d'environnement, comme une forêt ou un champ agricole. Enfin, le troisième niveau décrit une échelle olfactive locale et éphémère. On l'associe souvent à un endroit particulier comme une boulangerie, ou une station-service. Dans le contexte de la présente étude, ce troisième niveau correspondrait aux profils olfactifs de chacun des peuplements forestiers échantillonnés. Tout comme les objets physiologiques (p. ex., paysage, forêt, arbre) ou acoustiques (p. ex., fond sonore, écoulement d'une rivière, chant d'oiseaux), les profils olfactifs sont organisés de manière hiérarchique, dans le temps et l'espace. La sélection d'habitats et la capacité d'adaptation des organismes dotés de systèmes sensoriels pourraient par conséquent être guidées par leurs habiletés à détecter ces différents niveaux d'organisations.

#### **2.5.4 Hétérogénéité des profils olfactifs dans des paysages urbains et naturels**

Le test de dispersion sur les groupes de paysages (Figure 2.4C) suggère que les profils olfactifs des parcelles forestières dans un paysage urbain ont tendance à être plus homogènes entre elles que ceux des parcelles insérées dans un paysage forestier. Ce résultat sous-entend une homogénéisation du profil olfactif des forêts urbaines.

Même si les parcelles forestières dans notre étude montrent des profils olfactifs différenciés dans le temps et l'espace, ceux pris dans les forêts urbaines ont tendance à être plus similaires entre eux que ceux pris dans les forêts dites naturelles, d'où la tendance à l'homogénéisation. Une première piste d'explication serait que les communautés végétales en forêts urbaines sont plus pauvres en espèces de plantes (c.-à-d., plus homogène) que les communautés en forêts naturelles, ce qui se traduirait par une hétérogénéité de profils olfactifs plus faible. Cette explication n'est pas supportée ni par nos données ni par la littérature sur le sujet. Nos inventaires de la végétation aux sites échantillonnés ne montraient pas de différences systématiques dans la composition en espèces des forêts. Par ailleurs, une synthèse récente de la littérature scientifique sur le sujet suggère plutôt que les milieux urbains sont sujets à une légère augmentation, plutôt qu'une diminution, de la diversité de plantes (Vellend *et al.*, 2017).

Une deuxième piste d'explication serait que les COV issus des activités anthropiques soient plus persistants que ceux issus de processus biologiques (Simpson et Volosciuk, 2019). Cela aurait pour effet de masquer les profils olfactifs propres aux forêts au profit des profils olfactifs urbains. Ainsi, la courte durée de vie des COV émis par la végétation serait plus propice à former des profils olfactifs uniquement locaux. À l'inverse, une persistance plus longue des COV de sources anthropiques avec des durées de vie allant de quelques jours à plusieurs semaines pourrait former des profils olfactifs plus persistants et spatialement homogènes. Il a d'ailleurs été recensé que la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique présente en milieu urbain pouvait diminuer la capacité d'émission de COV par la végétation (Fitzky *et al.*, 2019; Gratani et Varone, 2014).

## 2.6 Conclusion

L'étude d'autres attributs sensoriels, comme l'odeur, contribue à élargir les frontières de l'écologie du paysage. Puisqu'il s'agit d'une science très récente, il convient de bien comprendre les structures et l'organisation des paysages olfactifs avant de pouvoir s'attaquer à des questions sur la sélection ou l'évitement d'odeurs par les organismes vivants en nature. Le nez électronique Cyranose 320 a été en mesure de détecter des



variations spatiales et temporelles entre les paysages olfactifs de différentes parcelles forestières imbriquées dans un gradient d'urbanisation. À cet égard, nous avons proposé des rapprochements entre les paysages olfactifs et les COV émis par la végétation puisque plusieurs de ces composés sont odorants. L'hypothèse que les paysages olfactifs sont organisés à des échelles d'organisation spatiale et temporelle multiples pourrait aussi expliquer certains de nos résultats; par exemple la tendance à l'homogénéisation des profils olfactifs dans les forêts considérées comme urbaines. Davantage de recherches seront cependant nécessaires pour comprendre comment la structure de ces paysages olfactifs influence les organismes sur un territoire et l'importance des différentes échelles d'observation dans la perception qu'ils en font.

## 2.7 Remerciements

Les auteurs remercient le support financier du Fonds de recherche du Québec en Nature et technologies (FQRNT) ainsi que le support financier du Conseil de recherches en sciences naturelles et génie du Canada (CRSNG) à R.P.

## 2.8 Références

- Atkinson, R. (2000). Atmospheric chemistry of VOCs and NO<sub>x</sub>. *Atmospheric Environment*, 34 (12), 2063-2101.
- Balasubramanian, S., Panigrahi, S., Logue, C. M., Marchello, M., Doetkott, C., Gu, H., et al. (2004). Spoilage identification of beef using an electronic nose system. *Transactions of the Asae*, 47 (5), 1625-1633.
- Bourtsoukidis, E., Behrendt, T., Yañez-Serrano, A. M., Hellén, H., Diamantopoulos, E., Catão, E., et al. (2018). Strong sesquiterpene emissions from Amazonian soils. *Nature communications*, 9 (1), 2226.
- Cetin, E., Odabasi, M., & Seyfioglu, R. (2003). Ambient volatile organic compound (VOC) concentrations around a petrochemical complex and a petroleum refinery. *Science of the Total Environment*, 312 (1), 103-112.

- Chen, J., Saunders, S. C., Crow, T. R., Naiman, R. J., Brosofske, K. D., Mroz, G. D., et al. (1999). Microclimate in Forest Ecosystem and Landscape Ecology. Variations in local climate can be used to monitor and compare the effects of different management regimes. *BioScience*, 49 (4), 288-297.
- Cyranose Practical Guide, (2013) The Practical Guide to the Cyranose 320. Sensigent Technical Support. 76 p.
- de Blas, M., Navazo, M., Alonso, L., Durana, N., Gomez, M. C., & Iza, J. (2012). Simultaneous indoor and outdoor on-line hourly monitoring of atmospheric volatile organic compounds in an urban building. The role of inside and outside sources. *Science of the Total Environment*, 426, 327-335.
- Dudareva, N., Negre, F., Nagegowda, D., & Orlova, I. (2006). Plant Volatiles: Recent Advances and Future Perspectives. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 25 (5), 417-440.
- Dudareva, N., Pichersky, E., & Gershenzon, J. (2004). Biochemistry of plant volatiles. *Plant physiology*, 135 (4), 1893.
- Endler, J. A. (1993). Some General Comments on the Evolution and Design of Animal Communication Systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 340 (1292), 215-225.
- Farina, A. (2014). *Soundscape ecology principles, patterns, methods and applications*. Springer Science Business Media Dordrecht 2014. 326 p.
- Filella, I., & Peñuelas, J. (2006). Daily, weekly, and seasonal time courses of VOC concentrations in a semi-urban area near Barcelona. *Atmospheric Environment*, 40 (40), 7752-7769.
- Fitzky, A. C., Sandén, H., Karl, T., Fares, S., Calfapietra, C., Grote, R., et al. (2019). The Interplay Between Ozone and Urban Vegetation—BVOC Emissions, Ozone Deposition, and Tree Ecophysiology. [Review] *Frontiers in Forests and Global Change*, 2 (50).
- Frasnelli, J., & Proulx, R. (2019). Smellscapes: A Neurobiological and Ecological Perspective. In *Spatial Senses, Philosophy of Perception in an Age of Science* (1<sup>st</sup> ed.). Routledge. 354 p. <https://doi.org/10.4324/9781315146935>
- Gratani, L., & Varone, L. (2014). Atmospheric carbon dioxide concentration variations in Rome: relationship with traffic level and urban park size. *Urban Ecosystems*, 17 (2), 501-511.

- Guenther, A., Zimmerman, P., Harley, P., Monson, R., & Fall, R. (1993). Isoprene and monoterpene emission rate variability: Model evaluations and sensitivity analyses. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 98 (D7), 12609-12617.
- Guenther, A. B., Monson, R. K., & Fall, R. (1991). Isoprene and monoterpene emission rate variability: Observations with eucalyptus and emission rate algorithm development. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 96 (D6), 10799-10808.
- Henshaw, V. (2013). *Urban Smellscapes: Understanding and Designing City Smell Environments*. New York, NY: Routledge. 256 p. doi: 10.4324/9780203072776
- Hewitt, C. N., & Street, R. A. (1992). A qualitative assessment of the emission of non-methane hydrocarbon compounds from the biosphere to the atmosphere in the U.K.: Present knowledge and uncertainties. *Atmospheric Environment Part A, General Topics*, 26 (17), 3069-3077.
- Holley, A. (2006). Système olfactif et neurobiologie. *Terrain* (47), 107-122.
- Hu, X., Mallikarjunan, P., & Vaughan, D. (2008). Development of non-destructive methods to evaluate oyster quality by electronic nose technology. *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety*, 2 (1), 51.
- Jari Oksanen, F. Guillaume Blanchet, Michael Friendly, Roeland Kindt, Pierre Legendre, Dan McGlinn, Peter R. Minchin, R. B. O'Hara, Gavin L. Simpson, Peter Solymos, M. Henry H. Stevens, Eduard Szoecs and Helene Wagner (2019). *vegan: Community Ecology Package*. R package version 2.5-6. <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>
- Kalita, P., Saikia, M. P., & Singh, N. H. (2015). Electronic-Nose Technology and its Application -A Systematic Survey. *IJREEICE*, 123-128.
- Kesselmeier, J., & Staudt, M. (1999). Biogenic Volatile Organic Compounds (VOC): An Overview on Emission, Physiology and Ecology. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 33 (1), 23-88.
- Lamagna, A., Reich, S., Rodríguez, D., Boselli, A., & Cicerone, D. (2008). The use of an electronic nose to characterize emissions from a highly polluted river. *Sensors & Actuators: B. Chemical*, 131 (1), 121-124.
- Lenard, M. (2019). *Urban Forests and Pollution. Tree for energy conservation*; at <https://trees-energy-conservation.extension.org/urban-forests-and-pollution/> (September 5<sup>th</sup> 2021)

- Manteghi, G., Lamit, H., & Ossen, D. (2015). Water Bodies an Urban Microclimate: A Review. *Modern Applied Science*, 9.
- Martin, C. A., Bolduc, P., Rainville, V., Rheault, G., Desrochers, L., Giacomazzo, M., et al. (2018). Importance of the study context in community assembly processes: a quantitative synthesis of forest bird communities. *Ecosphere*, 9 (3), e02142.
- McGann, J. P. (2017). Poor human olfaction is a 19th-century myth. *Science*, 356 (6338), eaam7263.
- Mendrey, K. (2014). The compost odor wheel. *BioCycle*, 55 (2), 34-35.
- Metzger, J. P. (2008). Landscape ecology: perspectives based on the 2007 IALE world congress. *Landscape Ecology*, 23 (5), 501-504.
- Niinemets, Ü., Loreto, F., & Reichstein, M. (2004). Physiological and physicochemical controls on foliar volatile organic compound emissions. *Trends in Plant Science*, 9 (4), 180-186.
- Niinemets, Ü., & Reichstein, M. (2003). Controls on the emission of plant volatiles through stomata: Differential sensitivity of emission rates to stomatal closure explained. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108 (D7).
- Persaud, K., & Dodd, G. (1982). Analysis of discrimination mechanisms in the mammalian olfactory system using a model nose. *Nature*, 299 (5881), 352-355.
- Porteous, J. D. (1985). Smellscape. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 9 (3), 356-378.
- QGIS.org, 2021. QGIS Geographic Information System. QGIS Association.
- Quercia, D., Schifanella, R., Aiello, L., & McLean, K. (2015). Smelly Maps: The Digital Life of Urban Smellscapes.
- Seco, R., Penuelas, J., Filella, I., Llusia, J., Molowny-Horas, R., Schallhart, S., et al. (2011). Contrasting winter and summer VOC mixing ratios at a forest site in the Western Mediterranean Basin: the effect of local biogenic emissions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11 (24), 13161-13179.
- Simpson, I., & Volosciuk, C. (2019). Changing Volatile Organic Compound Emissions in Urban Environments: Many Paths to Cleaner Air. World Meteorological Organisation.

- Staudt, M., Bertin, N., Hansen, U., Seufert, G., Cicciolij, P., Foster, P., et al. (1997). Seasonal and diurnal patterns of monoterpene emissions from *Pinus pinea* (L.) under field conditions. *Atmospheric Environment*, 31, 145-156.
- Vellend, M., Baeten, L., Becker-Scarpitta, A., Boucher-Lalonde, V., McCune, J.L., Messier, J., Myers-Smith, I.H. and Sax, D.F., 2017. Plant biodiversity change across scales during the Anthropocene. *Annual Review of Plant Biology*, 68, pp. 563-586.
- Wilson, D. A., & Stevenson, R. J. (2006). *Learning to smell: Olfactory perception from neurobiology to behavior*. Baltimore, MD, US: Johns Hopkins University Press.
- Zemankova, K., & Brechler, J. (2010). Emissions of biogenic VOC from forest ecosystems in central Europe: Estimation and comparison with anthropogenic emission inventory. *Environmental Pollution*, 158 (2), 462-469.
- Zheng, X.-Z., Lan, Y.-B., Zhu, J.-M., Westbrook, J., Hoffmann, W. C., & Lacey, R. E. (2009). Rapid Identification of Rice Samples Using an Electronic Nose. *Journal of Bionic Engineering*, 6 (3), 290-297.

## CHAPITRE III

### CONCLUSION GÉNÉRALE

#### 3.1 Contextualisation

L'étude des paysages olfactifs est relativement nouvelle et une meilleure connaissance de la structure de ces paysages s'avère fondamentale pour mieux les comprendre. L'objectif de cette recherche était d'étudier la structure des paysages olfactifs dans des milieux forestiers. L'utilisation d'un nez électronique pour quantifier et comparer les variations dans les gradients olfactifs dans l'environnement s'avère aussi une approche novatrice que nous avons utilisée.

Une campagne d'échantillonnage préliminaire visait à étudier l'effet des variables environnementales ponctuelles sur les profils olfactifs des forêts. Une revue de la littérature sur les COV émis par la végétation a montré que les phénomènes naturels quotidiens comme des variations de température dans l'air, le rayonnement incident de la lumière, le vent et de l'heure de la journée pourraient influencer les profils olfactifs en milieu forestier. Les résultats de cette campagne préliminaire ont permis d'étudier l'influence des phénomènes naturels quotidiens sur les paysages olfactifs et aussi l'apport de quelques variables environnementales sur ceux-ci.

Une seconde campagne d'échantillonnage s'est déroulée entre les mois de juin et août 2020 et visait à étudier l'influence des limites terrestres et d'un gradient d'urbanisation sur les paysages olfactifs forestiers. Des profils olfactifs ont été mesurés dans 8 forêts urbaines et 8 forêts considérées naturelles à six reprises durant cette période. Les données récoltées ont permis de tester la fragmentation spatiale et temporelle des paysages olfactifs.

### 3.2 Résultats principaux

L'analyse des profils olfactifs de la campagne préliminaire a montré l'influence de certaines variables environnementales. Parmi celles-ci, la température de l'air et l'heure de la prise de données étaient fortement corrélées à la réponse des capteurs ( $r > 0.5$ ; Chapitre II – Figure 2.2). L'influence de la température dans la variation des profils olfactifs semble plutôt associée à des variations saisonnières dans l'environnement. La littérature suggère que des variations de température au niveau journalier peuvent aussi influencer les émissions de COV par la végétation (Guenther *et al.*, 1991). Dans notre étude, les variations quotidiennes de température semblent être négligeables pour discriminer les profils olfactifs. Par ailleurs, le résultat d'une analyse procrustéenne a montré une similitude entre les profils olfactifs pris près du sol ou sur un trépied (Coefficient de détermination Procruste= 0.96). Cela laisse croire que la hauteur de la prise d'échantillon a très peu d'impact sur le résultat des profils olfactifs échantillonnés.

La comparaison des chronoséquences prises dans des lieux couverts ou non couverts a montré l'influence des processus naturels et de l'aspect temporel qui existe dans l'organisation des paysages olfactifs (Chapitre II – Figure 2.3). La réponse des capteurs du Cyranose 320 a montré une corrélation avec l'heure de la journée dans les forêts, alors que ce n'était pas le cas pour les lieux couverts. Dans cette expérience, plusieurs capteurs avaient une corrélation avec le paysage forestier supérieur à 0.75 alors que dans le cas des chronoséquences prises dans des milieux couverts, les coefficients de corrélation n'excédaient pas 0.40. Ces fluctuations liées à l'heure et détectées dans les forêts pourraient être associées à un cycle diurne dans les paysages olfactifs des milieux naturels. Un tel cycle diurne est observé avec les différentes émissions de COV par la végétation (Seco *et al.*, 2011). Par exemple, certaines émanations de COV se produisent le matin à l'ouverture des stomates (Niinemets *et al.*, 2003). À l'inverse, comme la synthèse de plusieurs COV dépend de la lumière, leurs émissions sont bloquées la nuit. Les similitudes entre les profils olfactifs des différentes paires de forêts à une même date (Chapitre II – Figure 2.4B) suggèrent aussi une forte influence temporelle. Ce résultat est repris avec la projection de l'analyse en coordonnées principales des profils olfactifs

(Chapitre II – Figure 2.4) qui propose que la variation expliquée par l'axe des abscisses (64 %) représente les différences temporelles entre les échantillons.

Le nez électronique Cyranose 320 a aussi pu différencier les profils olfactifs selon leur localisation géographique à des échelles locales et régionales. Sur l'axe des ordonnées de la Figure 2.4B (Chapitre II), les profils olfactifs échantillonnés au nord du fleuve Saint-Laurent avaient des valeurs systématiquement plus élevées que ceux échantillonnés sur la rive sud, ce qui présume des différences régionales entre les profils olfactifs sont discernables entre les rives. L'utilisation des terres qui diffère entre les deux rives est une piste d'explication retenue. La présence de la ville de Trois-Rivières sur la rive nord avec ses commerces et ses industries diffère de la rive sud où peu de gens habitent et où la vocation des terres est principalement agricole. À l'échelle des rives, en plus de la présence du fleuve qui sépare les forêts échantillonnées, des différences dans les masses d'air auraient pu contribuer à créer cet effet de rive qu'on peut observer entre les profils olfactifs (Manteghi *et al.*, 2015). À l'échelle locale, des différences ont été recensées entre les paires de forêts, et ce, malgré qu'ils étaient appariés entre elles (Chapitre II – Figure 2.4B), ce qui suggère que les paysages olfactifs se distinguent aussi sur le plan spatial. Un test par arbre de classification a tenté de distinguer chaque forêt échantillonnée, mais les différentes forêts étaient mélangées les unes avec les autres en raison d'un trop faible nombre d'échantillons pour cette précision. Néanmoins, les secteurs forestiers géographiquement plus éloignés étaient correctement identifiés dans cet arbre de classification. Un plus grand nombre d'échantillons aurait été nécessaire pour confirmer cette analyse. Une organisation multiéchelle des odeurs pourrait expliquer les différences spatiales entre nos résultats. Les différentes échelles se déclinaient en des composantes de fonds plutôt régionales (dans notre cas à l'échelle de la rive), des composantes intermédiaires à l'échelle d'un quartier ou d'une rue (dans notre cas entre les paires de forêts) et enfin des composantes locales liées à un lieu ou un bâtiment plus spécifique (Henshaw, 2013). Dans notre expérience, les odeurs de fonds correspondent à celles détectées à l'échelle des rives (c.-à-d. plus régionale), les odeurs intermédiaires correspondent à celles détectées à l'échelle des paires de forêts et les odeurs à l'échelle locale correspondent à l'odeur des différentes parcelles forestières.



L'influence des limites terrestres sur les profils d'odeurs a été étudiée par un test de dispersion qui visait à comparer la diversité d'odeurs présentes dans les forêts urbaines et celles dites naturelles. Pour ce test, les profils olfactifs ont été stratifiés selon le mois d'échantillonnage pour tenir compte de la saisonnalité en plus des différents types de paysages urbains ou naturels. Les résultats ont montré que les profils olfactifs des forêts urbaines avaient une tendance systématique à être plus homogènes que ceux échantillonnés dans les forêts dites naturelles. Cela suggère une homogénéisation des paysages olfactifs en milieu urbain alors que ce ne serait pas nécessairement le cas en forêt naturelle. La composition des forêts échantillonnées variait d'un site à l'autre rendant ainsi le dispositif complètement aléatoire. Des relevés de végétation dans les forêts échantillonnées ont montré des compositions différentes entre les sites, ce qui suggère que la tendance observée entre les profils olfactifs des forêts considérées urbaines et naturelles n'est pas due à leur composition. Une première piste d'hypothèse qui expliquerait ce phénomène est que les COV qui créent certaines odeurs en milieu urbain (c.-à-d. les pesticides, les produits nettoyeurs ou d'hygiène selon McDonald *et al.*, 2018) n'étaient pas présents dans les milieux urbains échantillonnés. Cela aurait ainsi créé une faible variabilité dans les molécules odorantes détectées et donc dans les profils olfactifs. Une seconde piste d'explication explorée suppose que des caractéristiques liées aux milieux urbains comme une plus grande quantité de CO<sub>2</sub> pourraient aussi influencer les émissions de COV de la végétation à la baisse dans ces milieux (Fitzky *et al.*, 2019; Gratani et Varone, 2014). Le Cyranose 320 aurait alors pu capter ponctuellement une plus grande variété de COV dans les forêts naturelles ce qui expliquerait la tendance à l'homogénéisation observée.

### 3.3 Conclusion

L'étude des paysages olfactifs est une sous-discipline de l'écologie des paysages moins développée que d'autres champs d'études des paysages sensoriels. Les connaissances apportées avec cette recherche sont un premier pas pour étudier la structure des paysages olfactifs. Nos résultats suggèrent que les paysages olfactifs forestiers sont multiéchelles et qu'ils sont fortement influencés par des variations

temporelles. Dans les forêts, des phénomènes naturels comme le cycle diurne de la végétation pourraient influencer les profils d'odeurs à l'échelle de la journée, alors que des variations phénologiques dans le développement de la végétation pourraient avoir un impact à l'échelle des saisons. Ces derniers résultats montrent l'importance de l'aspect temporel dans les profils olfactifs échantillonnés dans les milieux exposés aux phénomènes naturels, en plus des différences spatiales que nous avons quantifiées. L'étude de différentes parcelles de forêts réparties dans un gradient d'urbanisation a aussi montré une tendance systématique à l'homogénéisation des profils olfactifs dans les profils olfactifs des forêts considérées urbaines comparés à ceux échantillonnés dans des forêts dites naturelles.

L'utilisation d'un nez électronique semble être une avenue prometteuse pour prendre des mesures répétées et égales des odeurs, même en milieu naturel. Notre expérimentation avec le nez électronique Cyranose 320, avec ses capteurs en polymère de carbone, a montré une distinction entre les différents environnements forestiers échantillonnés. Le manque de connaissances quant à la sensibilité et la spécificité des capteurs rend cependant l'analyse des résultats complexes.

De futurs travaux de recherche pourraient tenter de comparer les résultats des nez électroniques avec ceux obtenus par des méthodes analytiques communément utilisées comme la chromatographie en phase gazeuse. Cela permettrait de mieux comprendre les différences reconnues entre les types d'environnements par les nez électroniques. En parallèle, des observations sur la variabilité des odeurs naturelles par rapport aux sources anthropiques pourraient montrer une autre perspective de l'organisation des paysages olfactifs. À cet égard, le lecteur intéressé peut consulter l'annexe A qui traite d'une analyse exploratoire sur cette perspective de recherche sur une perception anthropique appliquée nos données. Enfin, des méthodes de mesure de l'olfaction à l'échelle des communautés pourraient être explorées pour en apprendre davantage sur la réaction des organismes aux variations dans les paysages olfactifs. Les résultats de mon étude proposent un premier cadre pour expliquer l'organisation spatiale et temporelle des

paysages olfactifs et, par le fait même, tentent de repousser les frontières de l'écologie des paysages plus souvent étudiés sous l'angle des paysages physiologiques.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aaltonen, H., Pumpanen, J., Pihlatie, M., Hakola, H., Hellén, H., Kulmala, L., et al. (2011). Boreal pine forest floor biogenic volatile organic compound emissions peak in early summer and autumn. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151 (6), 682-691.
- Asensio, D., Peñuelas, J., Filella, I., & Llusià, J. (2007). On-line screening of soil VOCs exchange responses to moisture, temperature and root presence. *Plant and Soil*, 291 (1), 249-261.
- Atema, J. (1996). Eddy Chemotaxis and Odor Landscapes: Exploration of Nature with Animal Sensors. *Biological Bulletin*, 191 (1), 129-138.
- Atkinson, R. (2000). Atmospheric chemistry of VOCs and NO<sub>x</sub>. *Atmospheric Environment*, 34 (12), 2063-2101.
- Balasubramanian, S., Panigrahi, S., Logue, C. M., Marchello, M., Doetkott, C., Gu, H., et al. (2004). Spoilage identification of beef using an electronic nose system. *Transaction of the Asae*, 47 (5), 1625-1633.
- Bax, C., Sironi, S. & Capelli, L. (2020). How Can Odors Be Measured? An Overview of Methods and Their Applications. *Atmosphere*, 11, 92.
- Becerra, J.-A., & Villa, A.-L. (2020). Techno-Economic Evaluation of d-Limonene and  $\alpha$ -Pinene Separation from Citrus and Turpentine Oils. *Chemical Engineering & Technology*, 43 (11), 2295-2306.
- Bourtsoukidis, E., Behrendt, T., Yañez-Serrano, A. M., Hellén, H., Diamantopoulos, E., Catão, E., et al. (2018). Strong sesquiterpene emissions from Amazonian soils. *Nature communications*, 9 (1), 2226.
- Burkle, L. A., & Runyon, J. B. (2016). Drought and leaf herbivory influence floral volatiles and pollinator attraction. *Global Change Biology*, 22 (4), 1644-1654.
- Burkle, L. A., & Runyon, J. B. (2017). The smell of environmental change: Using floral scent to explain shifts in pollinator attraction. *Applications in Plant Sciences*, 5 (6).
- Calogirou, A., Larsen, B. R., & Kotzias, D. (1999). Gas-phase terpene oxidation products: a review. *Atmospheric Environment*, 33 (9), 1423-1439.

- Cetin, E., Odabasi, M., & Seyfioglu, R. (2003). Ambient volatile organic compound (VOC) concentrations around a petrochemical complex and a petroleum refinery. *Science of the Total Environment*, 312 (1), 103-112.
- Clark, L. H., Julie; and Werner, Scott.J. (2014). *The Chemical Senses in Birds*. USDA National Research Center- Staff Publications. 16-18.
- Comité Européen de Normalisation. (2003). Standard EN13725. Air Quality- Determination of Odour Concentration by Dynamic Olfactometry; CEN: Brussels, Belgium, 2003.
- de Blas, M., Navazo, M., Alonso, L., Durana, N., Gomez, M. C., & Iza, J. (2012). Simultaneous indoor and outdoor on-line hourly monitoring of atmospheric volatile organic compounds in an urban building. The role of inside and outside sources. *Science of the Total Environment*, 426, 327-335.
- Dragonieri, S., Schot, R., Mertens, B. J. A., Le Cessie, S., Gauw, S. A., Spanevello, A., et al. (2007). An electronic nose in the discrimination of patients with asthma and controls. *The Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 120 (4), 856-862.
- Dravnieks, A. (1982). Odor Quality: Semantically Generated Multidimensional Profiles are Stable. *Science*, 218 (4574), 799-801.
- Dudareva, N., Negre, F., Nagegowda, D., & Orlova, I. (2006). Plant Volatiles: Recent Advances and Future Perspectives. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 25 (5), 417-440.
- Dudareva, N., Pichersky, E., & Gershenzon, J. (2004). Biochemistry of plant volatiles. *Plant physiology*, 135 (4), 1893.
- Endler, J. A. (1993). Some General Comments on the Evolution and Design of Animal Communication Systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 340 (1292), 215-225.
- Farina, A., (2006). *Principles and methods in landscape ecology toward a science of landscape*. Springer Science Business Media Dordrecht 2006. 430 p.
- Farré-Armengol, G., Filella, I., Llusia, J., Niinemets, Ü., & Peñuelas, J. (2014). Changes in floral bouquets from compound-specific responses to increasing temperatures. *Global Change Biology*, 20 (12), 3660-3669.
- Farré-Armengol, G., Peñuelas, J., Li, T., Yli-Pirilä, P., Filella, I., Llusia, J. & Blande, J. D. (2016). Ozone degrades floral scent and reduces pollinator attraction to flowers. *New Phytologist*, 209, 152-160.

- Filella, I., & Peñuelas, J. (2006). Daily, weekly, and seasonal time courses of VOC concentrations in a semi-urban area near Barcelona. *Atmospheric Environment*, 40 (40), 7752-7769.
- Fitzky, A. C., Sandén, H., Karl, T., Fares, S., Calfapietra, C., Grote, R., et al. (2019). The Interplay Between Ozone and Urban Vegetation—BVOC Emissions, Ozone Deposition, and Tree Ecophysiology. [Review] *Frontiers in Forests and Global Change*, 2 (50).
- Frasnelli, J., & Proulx, R. (2019). Smellscapes: A Neurobiological and Ecological Perspective. In *Spatial Senses, Philosophy of Perception in an Age of Science* (1<sup>st</sup> ed.). Routledge. 354 p. <https://doi.org/10.4324/9781315146935>
- Gillies, M. T. (1980). The role of carbon dioxide in host-finding by mosquitoes (Diptera: Culicidae): a review. *Bulletin of Entomological Research*, 70 (4), 525-532.
- Gratani, L., & Varone, L. (2014). Atmospheric carbon dioxide concentration variations in Rome: relationship with traffic level and urban park size. *Urban Ecosystems*, 17 (2), 501-511.
- Guenther, A., Hewitt, C., Erickson, D., Fall, R., Geron, C., Graedel, T., et al. (1995). A global model of natural volatile organic compound emissions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 100 (D5), 8873-8892.
- Guenther, A., Zimmerman, P., Harley, P., Monson, R., & Fall, R. (1993). Isoprene and monoterpene emission rate variability: Model evaluations and sensitivity analyses. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 98 (D7), 12609-12617.
- Guenther, A. B., Monson, R. K., & Fall, R. (1991). Isoprene and monoterpene emission rate variability: Observations with eucalyptus and emission rate algorithm development. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 96 (D6), 10799-10808.
- Haber, W. (2004). Landscape ecology as a bridge from ecosystems to human ecology. *Ecological Research*, 19 (1), 99-106.
- Henshaw, V. (2013). *Urban Smellscapes: Understanding and Designing City Smell Environments*. New York, NY: Routledge. 256p. doi: 10.4324/9780203072776
- Henshaw, V., Medway, D., Warnaby, G., & Perkins, C. (2016). Marketing the 'city of smells'. *Marketing Theory*, 16 (2), 153-170.

- Hewitt, C. N., & Street, R. A. (1992). A qualitative assessment of the emission of non-methane hydrocarbon compounds from the biosphere to the atmosphere in the U.K.: Present knowledge and uncertainties. *Atmospheric Environment Part A, General Topics*, 26 (17), 3069-3077.
- Ho, K. F., Lee, S. C., Guo, H., & Tsai, W. Y. (2004). Seasonal and diurnal variations of volatile organic compounds (VOCs) in the atmosphere of Hong Kong. *Science of The Total Environment*, 322 (1), 155-166.
- Holley, A. (2006). Système olfactif et neurobiologie. *Terrain* (47), 107-122.
- Jacobs, L. F., Arter, J., Cook, A., Sulloway, F. J., & Louis, M. (2015). Olfactory Orientation and Navigation in Humans. *PLoS ONE*, 10 (6).
- Jia, C., Batterman, S., & Godwin, C. (2008). VOCs in industrial, urban and suburban neighborhoods, Part 1: Indoor and outdoor concentrations, variation, and risk drivers. *Atmospheric Environment*, 42 (9), 2083-2100.
- Jones, C. E., Kato, S., Nakashima, Y., & Kajii, Y. (2014). A novel fast gas chromatography method for higher time resolution measurements of speciated monoterpenes in air. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7 (5), 1259-1275.
- Lamagna, A., Reich, S., Rodríguez, D., Boselli, A., & Cicerone, D. (2008). The use of an electronic nose to characterize emissions from a highly polluted river. *Sensors & Actuators: B. Chemical*, 131 (1), 121-124.
- Lamb, B., Guenther, A., Gay, D., & Westberg, H. (1987). A national inventory of biogenic hydrocarbon emissions. *Atmospheric Environment* (1967), 21 (8), 1695-1705.
- Laska, M., Fendt, M., Wieser, A., Endres, T., Hernandez Salazar, L. T., & Apfelbach, R. (2005). Detecting danger—or just another odorant? Olfactory sensitivity for the fox odor component 2,4,5-trimethylthiazoline in four species of mammals. *Physiology & Behavior*, 84 (2), 211-215.
- Le Bon, A.-M., Tromelin, A., Thomas-Danguin, T., & Briand, L. (2008). Les récepteurs olfactifs et le codage des odeurs. *Cahiers de Nutrition et de Dietetique*, 43 (6), 282-288.
- Legouis, R. (1995). Les mécanismes de transduction du signal olfactif. *Annales de l'Institut Pasteur/Actualites*, 6 (4), 249-255.
- Liu, J., & Taylor, W. (2002). *Integrating Landscape Ecology into Natural Resource Management*. Cambridge: Cambridge University Press.

- Livermore, A., & Laing, D. G. (1996). Influence of Training and Experience on the Perception of Multicomponent Odor Mixtures. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 22 (2), 267-277.
- López-Guillén, G., Valle-Mora, J., Cazares, C. L., & Rojas, J. C. (2009). Response of *Anastrepha obliqua* (Diptera: Tephritidae) to visual and chemical cues under seminatural conditions. *Journal of economic entomology*, 102 (3), 954.
- Madany Mamlouk, A., Chee-Ruiter, C., Hofmann, U. G., & Bower, J. M. (2003). Quantifying olfactory perception: mapping olfactory perception space by using multidimensional scaling and self-organizing maps. *Neurocomputing*, 52 (C), 591-597.
- Manteghi, G., Lamit, H., & Ossen, D. (2015). Water Bodies an Urban Microclimate: A Review. *Modern Applied Science*, 9.
- Martin, C. A., Bolduc, P., Rainville, V., Rheault, G., Desrochers, L., Giacomazzo, M., et al. (2018). Importance of the study context in community assembly processes: a quantitative synthesis of forest bird communities. *Ecosphere*, 9 (3), e02142.
- Masello, J. F., Montano, V., Quillfeldt, P., Nuhlíčková, S., Wikelski, M., & Moodley, Y. (2015). The interplay of spatial and climatic landscapes in the genetic distribution of a South American parrot. *Journal of Biogeography*, 42 (6), 1077-1090.
- McDonald, B., de Gouw, J., Gilman, J., Jathar, S., Akherati, A., Cappa, C., et al. (2018). Volatile chemical products emerging as largest petrochemical source of urban organic emissions. *Science (New York, N.Y.)*, 359, 760-764.
- Mendrey, K. (2014). The Compost Odor Wheel. *BioCycle*, 55 (2), 34-35.
- Metzger, J. P. (2008). Landscape ecology: perspectives based on the 2007 IALE world congress. *Landscape Ecology*, 23 (5), 501-504.
- Negus, V. (1958). *The comparative anatomy and physiology of the nose and paranasal sinuses*. London: E & S Livingstone. 402 p.
- Niinemets, Ü., Loreto, F., & Reichstein, M. (2004). Physiological and physicochemical controls on foliar volatile organic compound emissions. *Trends in Plant Science*, 9 (4), 180-186.
- Niinemets, Ü., & Reichstein, M. (2003). Controls on the emission of plant volatiles through stomata: Differential sensitivity of emission rates to stomatal closure explained. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108 (D7).



- Peñuelas, J., Asensio, D., Tholl, D., Wenke, K., Rosenkranz, M., Piechulla, B., et al. (2014). Biogenic volatile emissions from the soil. *Plant, Cell & Environment*, 37 (8), 1866-1891.
- Pernollet, J.-C., Sanz, G., & Briand, L. (2006). Les récepteurs des molécules odorantes et le codage olfactif. *Comptes rendus – Biologies*, 329 (9), 679-690.
- Persaud, K., & Dodd, G. (1982). Analysis of discrimination mechanisms in the mammalian olfactory system using a model nose. *Nature*, 299 (5881), 352-355.
- Pijanowski, B. C., Villanueva-Rivera, L. J., Dumyahn, S. L., Farina, A., Krause, B. L., Napoletano, B. M., et al. (2011). Soundscape Ecology: The Science of Sound in the Landscape. *BioScience*, 61 (3), 203-216.
- Potier, S. (2016). *Ecologie sensorielle des rapaces : vision et olfaction*.
- Raguso, R. A., & Pichersky, E. (1995). Floral volatiles from *Clarkia breweri* and *C. concinna* (Onagraceae): Recent evolution of floral scent and moth pollination. *Plant Systematics and Evolution*, 194 (1), 55-67.
- Ray, A. (2015). Reception of odors and repellents in mosquitoes. *Current Opinion in Neurobiology*, 34, 158-164.
- Reed, J., & Dobson, A. (1993). Behavioural constraints and conservation biology: Conspecific attraction and recruitment. *Trends in ecology & evolution*, 8, 253-256.
- Rinne, J., Taipale, R., Markkanen, T., Ruuskanen, T. M., Hellen, H., Kajos, M., et al. (2007). Hydrocarbon fluxes above a Scots pine forest canopy: measurements and modeling. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7 (12), 3361-3372.
- Seco, R., Peñuelas, J., Filella, I., Llusia, J., Molowny-Horas, R., Schallhart, S., et al. (2011). Contrasting winter and summer VOC mixing ratios at a forest site in the Western Mediterranean Basin: the effect of local biogenic emissions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11 (24), 13161-13179.
- Shepherd, G. M. (2004). The Human Sense of Smell: Are We Better Than We Think? (Human Sense of Smell). *PLoS Biology*, 2 (5), e146.
- Simon, V., Luchetta, L., & Torres, L. (2001). Estimating the emission of volatile organic compounds (VOC) from the French forest ecosystem. *Atmospheric Environment*, 35 (s1), S115-S126.

- Tamogami, S., Rakwal, R., & Agrawal, G. K. (2008). Interplant communication: Airborne methyl jasmonate is essentially converted into JA and JA-Ile activating jasmonate signaling pathway and VOCs emission. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 376 (4), 723-727.
- Turner, B. L., Lambin, E. F., & Reenberg, A. (2007). The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104 (52), 20666-20671.
- Weldon, P.J. (1990). Responses by vertebrates to chemicals from predators. In: MacDonald DW, Müller-Schwarze D, Natynczuk SE, editors. *Chemical signals in vertebrates*, vol. 5. Oxford: Oxford University Press. p. 500– 521
- Wilson, A. D. (2012). Review of Electronic-nose Technologies and Algorithms to Detect Hazardous Chemicals in the Environment. *Procedia Technology*, 1 (C), 453-463.
- Wilson, D. A., & Stevenson, R. J. (2006). *Learning to smell: Olfactory perception from neurobiology to behavior*. Baltimore, MD, US: Johns Hopkins University Press.
- Xiao, J. (2018). Smell, Smellscape And Place-making: A Review Of Approaches To Study Smellscape. Dans : Aletta, F., & Xiao, J. (Éds.). (2018). *Handbook of Research on Perception-Driven Approaches to Urban Assessment and Design*. Hershey, PA, USA: IGI Global, pp 240-258.
- Xiao, J., Aletta, F., Radicchi, A., McLean, K., Shiner, L. E., & Verbeek, C. (2021). Recent Advances in Smellscape Research for the Built Environment. [Perspective] *Frontiers in Psychology*, 12 (2729).
- Yu, H., Guenther, A., Gu, D., Warneke, C., Geron, C., Goldstein, A., et al. (2017). Airborne measurements of isoprene and monoterpene emissions from southeastern U.S. forests. *Science of the Total Environment*, 595 (C), 149-158.
- Zemankova, K., & Brechler, J. (2010). Emissions of biogenic VOC from forest ecosystems in central Europe: Estimation and comparison with anthropogenic emission inventory. *Environmental Pollution*, 158 (2), 462-469.
- Zhang, S., Cai, L., Koziel, J. A., Hoff, S. J., Schmidt, D. R., Clanton, C. J., et al. (2010). Field air sampling and simultaneous chemical and sensory analysis of livestock odorants with sorbent tubes and GC-MS/olfactometry. *Sensors & Actuators: B. Chemical*, 146 (2), 427-432.
- Zheng, X.-Z., Lan, Y.-B., Zhu, J.-M., Westbrook, J., Hoffmann, W. C., & Lacey, R. E. (2009). Rapid Identification of Rice Samples Using an Electronic Nose. *Journal of Bionic Engineering*, 6 (3), 290-297.

## ANNEXE A

### COMPARAISON ENTRE DES PROFILS OLFACTIFS FORESTIERS ET ANTHROPIQUES

#### A.1 Mise en contexte

L'étude des paysages olfactifs dans des parcelles forestières insérées dans un paysage urbain ou forestier a montré une tendance à l'homogénéisation dans les forêts urbaines alors que ce n'était pas le cas dans les forêts dites plus naturelles (Chapitre II – sous-section 2.4.4). Les mesures prises par le nez électronique Cyranose 320 ont permis d'interpréter quantitativement l'organisation spatiale et temporelle des profils olfactifs. Cependant, les ordinations présentées dans l'étude principale étaient spécifiques au contexte des paysages olfactifs en milieu forestier. La méthode d'ordination de l'étude principale suggère que le premier axe d'organisation était plutôt relié à la saisonnalité alors que le deuxième axe était plutôt relié aux différences géographiques.

En incluant d'autres mesures de mélanges odorants d'origine anthropique, la variabilité des profils olfactifs des paysages forestiers serait mieux contextualisée. La présente section du mémoire explore la similarité des profils olfactifs des parcelles forestières échantillonnées en les comparant à d'autres profils olfactifs provenant de différentes sources.

#### A.2 Méthodes

En parallèle de la campagne d'échantillonnage 2020 dans des parcelles forestières urbaines et naturelles, 53 profils d'odeurs ont été pris près afin de représenter un panel d'odeurs. Ces profils olfactifs comprennent les alcools ( $n = 8$ ) comme les boissons alcoolisées, l'alcool isopropylique ou des teintures. Une autre catégorie regroupe des émissions issues de la combustion ( $n = 12$ ), comme la fumée de cigarette, un fumoir pour

aliment et des gaz d'échappement de voiture. Les profils olfactifs d'huiles essentielles (n = 11), de produits de pharmacie (n = 9) et de nourriture (n = 8) ont également été échantillonnés. La dernière catégorie regroupe des profils olfactifs reliés au sol ou à la terre (n = 5) avec des échantillons de gazon fraîchement coupé et de matière organique comme de la terre à jardin.

Les mesures de profils olfactifs ont été prises entre les mois de mai et octobre 2020 dans des habitations comme à l'extérieur. Le cycle d'échantillonnage du Cyranose 320 était le même que celui employé pour les expériences en milieu forestier (Chapitre II – sous-section 2.3.1). La prise d'échantillon se faisait le plus près possible de la substance à échantillonner pour l'isoler des autres odeurs environnantes.

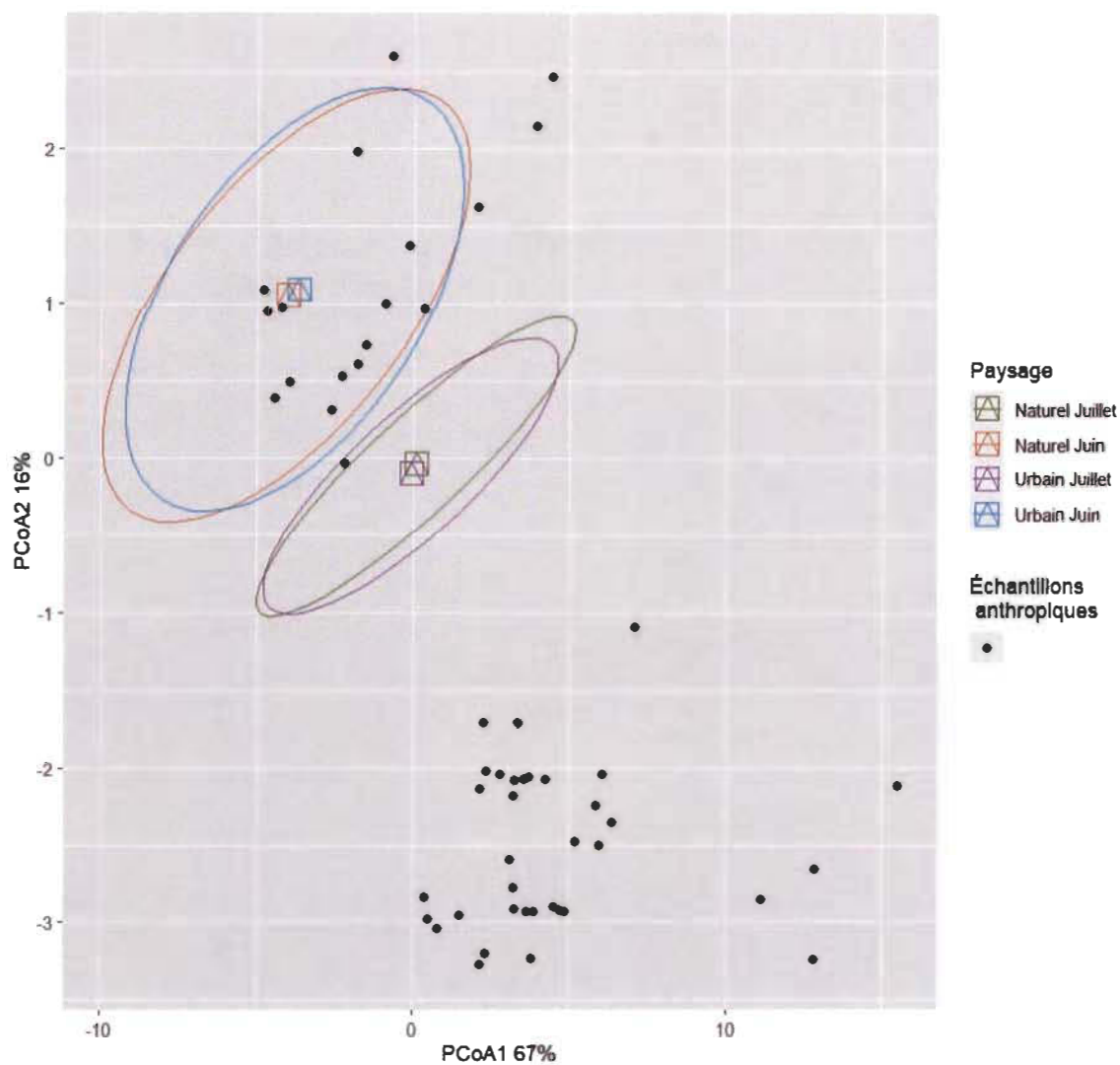
Les données des différentes forêts urbaines et naturelles pour les mois de juin et juillet 2020 ont été ajoutées aux données anthropiques pour créer une seule base de données. L'analyse des profils olfactifs a été faite sur les résidus d'un modèle linéaire bivarié entre les résistances des capteurs et l'heure de la journée afin de retirer l'influence de l'heure d'échantillonnage sur les données prises à l'extérieur. De la même manière que pour l'expérience sur l'hétérogénéité des profils olfactifs dans les paysages urbains ou naturels, une analyse en coordonnées principales a été réalisée (Chapitre II – section 2.4).

### **A.3 Résultats et discussion**

Des profils olfactifs de diverses sources anthropiques ont été analysés pour les comparer à ceux des parcelles forestières. Les deux axes d'organisation des différents profils olfactifs sont illustrés dans la figure A.1 issus d'une analyse en coordonnées principales sur les différents groupes de profils olfactifs. Les axes X et Y reprennent respectivement 67 % et 16 % de la variabilité entre les données.

Dans l'analyse en coordonnées principales (Figure A.1), certains profils olfactifs d'origines anthropiques se rapprochent des centroïdes des parcelles de forêts, alors que d'autres diffèrent complètement. Cette analyse suggère que les odeurs associées aux forêts

forment un sous-ensemble des paysages olfactifs. Ces résultats montrent une organisation légèrement différente des profils olfactifs forestiers lorsqu'ils sont complétés par d'autres profils olfactifs provenant de sources contrastées. Une distinction des profils olfactifs forestiers par rapport à certaines sources d'odeurs anthropiques ressort de cette analyse, alors que ce n'était pas le cas dans l'étude principale (Chapitre II – Figure 2.4). Il se pourrait que la concentration et la nature de certains composés chimiques influencent cette distribution. De plus amples recherches alliant les profils olfactifs détectés par un nez électronique couplé à des analyses par chromatographie en phase gazeuse pourraient permettre d'améliorer notre interprétation des profils olfactifs et de la sensibilité des capteurs des nez électroniques comme le Cyranose 320.



**Figure A.1** Analyse en coordonnées principales de profils olfactifs forestiers comparés à des groupes de référence de sources anthropiques. Chaque pictogramme représente le centroïde d'un groupe échantillonné. Parmi ces groupes, il y a les paysages forestiers urbains et naturels pour les mois de juin et juillet 2020. Les points correspondent à des profils olfactifs échantillonnés sur des sources anthropiques.