

**Les activités humaines sont-elles un véhicule d'invasion de l'agrile du frêne (*Agrilus planipennis*) en Outaouais?**

Par : Laurence Godin  
300212710

BIO4009 - Projet de recherche  
Superviseur: Prof. Gabriel Blouin-Demers

Université d'Ottawa  
Département de biologie

24 avril 2024

## RÉSUMÉ

Les activités humaines sont à l'origine de plusieurs changements majeurs à l'environnement, dont la perte de biodiversité globale. L'introductions d'espèces exotiques envahissantes dues au transport de marchandises est une cause importante de perte de biodiversité. L'agrile du frêne (*Agrilus planipennis*) est un coléoptère envahissant provenant d'Asie qui décime les frênes (*Fraxinus*) des forêts et des zones urbaines du Canada et des États-Unis depuis plus de deux décennies. Sachant que cet insecte ne se déplace habituellement pas sur de longues distances par lui-même, j'ai testé l'hypothèse selon laquelle les activités humaines sont responsables de la dispersion de l'agrile du frêne dans la région de l'Outaouais. J'ai documenté le niveau d'infestation des frênes à 35 sites pour calculer un indice d'infestation. Ensuite, j'ai calculé la densité moyenne de la population humaine dans un rayon de 2 km pour chaque site pour évaluer si la densité de population a un impact sur le niveau d'infestation des frênes, mais il n'y avait pas de relation significative. Cependant, puisque des mesures ont été prises pour contrôler l'invasion dans les zones hautement urbaines, les arbres évalués étaient souvent plus jeunes ou avaient plusieurs troncs, ce qui a pu affecter le niveau d'infestation observé dans ces zones.

**Mots clés:** insectes exotiques envahissants, dommages aux frênes, indice d'infestation, arbres multi-troncs

## **ABSTRACT**

Human activities are responsible for several major changes to the environment, including the loss of global biodiversity. The introduction of exotic invasive species due to cargo transport and is an important cause of biodiversity loss. The Emerald ash borer (*Agrilus planipennis*) is an invasive beetle from Asia that has been decimating ash trees (*Fraxinus*) in forests and urban areas in Canada and the USA for over two decades. Knowing that this insect does not typically travel great distances on its own, I tested the hypothesis that human activities are responsible for the dispersal of the Emerald ash borer in the Outaouais region. I documented the level of infestation of ash trees at 35 sites to calculate an infestation index. I then calculated the human population density in a 2 km radius of each site to assess if population density has an impact on the infestation index of ash trees, but the relationship was not significant. Because measures were put in place to control this invasion in highly urbanized areas, however, the trees that were evaluated were often younger or had multiple trunks which can affect the observed level of infestation in these areas.

**Keywords:** invasive exotic insects, ash tree damage, infestation index, multi-stemmed tree

## REMERCIEMENTS

J'aimerais premièrement remercier mon superviseur Gabriel Blouin-Demers qui m'a fait confiance avec la conception de mon projet et qui s'est toujours rendu disponible pour me guider et m'aider avec la rédaction de ma thèse. J'aimerais ensuite remercier mes pairs: Karolyn McGovern, Sofia Pizzuto et Cecilia Eason, du laboratoire de Gabriel qui m'ont soutenue moralement et m'ont aidée lors de mes analyses, étant elles-mêmes dans le même bateau.

Je tiens à remercier Alexandre Cardinal et Véronique Martel qui ont rendu mon projet possible en me fournissant des données et de l'expertise pour entreprendre ma collecte de données. Un grand merci à ceux qui m'ont aidée lorsque j'ai rencontré des problèmes de voiture sur le terrain: Elie et Diane qui ont sorti ma voiture d'un fossé de sable et les mécaniciens de *Shawville Auto Service* qui ont changé mon pneu rapidement lorsque j'ai eu un pneu crevé. Finalement, j'aimerais remercier Sandy Boissonneault, Liam Flood et Anik Deschambault qui m'ont soutenue moralement tout au long de mon projet.

## TABLE DES MATIÈRES

<b>RÉSUMÉ</b> .....	2
<b>ABSTRACT</b> .....	3
<b>REMERCIEMENTS</b> .....	4
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	6
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	7
<b>INTRODUCTION</b> .....	8
<b>MÉTHODES</b> .....	12
<i>Collecte de données</i> .....	12
<i>Création de l'indice d'infestation</i> .....	12
<i>Analyse cartographique</i> .....	14
<i>Analyse statistique</i> .....	15
<b>RÉSULTATS</b> .....	16
<i>Frênes évalués et densité de population humaine</i> .....	16
<i>Effet de la densité de la population humaine sur l'indice d'infestation</i> .....	16
<b>DISCUSSION</b> .....	16
<i>Densité de la population humaine</i> .....	17
<i>Disponibilité et âge des frênes</i> .....	18
<i>Quantification des signes et symptômes pour l'indice d'infestation</i> .....	19
<i>Plusieurs troncs et troncs régénérés</i> .....	20
<i>Études futures et conclusions</i> .....	21
<b>RÉFÉRENCES</b> .....	22
<b>TABLEAUX</b> .....	26
<b>FIGURES</b> .....	31
<b>ANNEXE</b> .....	34

## **LISTE DES TABLEAUX**

**Tableau 1.** Tableau pour calculer l'indice d'infestation de chaque frêne. Les signes et symptômes sont listés dans la colonne de gauche et un score arbitraire est attribué en fonction de la gravité du signe/symptôme dans les deux colonnes de droite. Chaque catégorie contient deux photos qui sont des exemples de la gravité du signe/symptôme respectif. Chaque exemple est désigné du code suivant: AX.XXXXX. Le premier nombre : AX indique le ID de l'arbre et les nombres qui suivent : XXXXX est le code qui identifie le site.

## **LISTE DES FIGURES**

**Figure 1.** Carte représentant les divisions de recensement de la région de l'Outaouais qui sont utilisées dans le calcul de la densité de la population humaine pour chaque zone tampon de 2 km autour d'un site. Chaque division de recensement est identifiée par le nom, la densité de population humaine et la couleur qui dépend de la densité de la population humaine respective. Les sites visités sont illustrés par les points verts ( $n = 35$ ).

**Figure 2.** Régression linéaire de l'indice d'infestation en fonction du logarithme naturel de la densité de la population humaine dans un rayon de 2 km du site. La densité de la population humaine dans un rayon de 2 km, ayant une très grande variabilité, a été transformée en log pour mieux visualiser la relation avec l'indice d'infestation. La droite rouge représente la régression linéaire, les barres en gris représentent l'intervalle de confiance de 95% de la régression et chaque point désigne un frêne.

**Figure 3.** Diagramme de boîte à moustaches de la présence de plusieurs troncs principaux en fonction du logarithme naturel de la densité de la population humaine dans un rayon de 2 km du site. Chaque point désigne un frêne.

## INTRODUCTION

La biodiversité de notre planète subit un déclin élevé dû aux changements globaux causés par les activités humaines. Selon le *Living Planet Report 2022* du World Wildlife Fund, la biodiversité globale des mammifères, oiseaux, poissons, reptiles et amphibiens a diminué d'environ 68% depuis 1970. Le déclin de la biodiversité s'étend aussi aux espèces d'arbres. En effet, l'utilisation des terres, le niveau de dioxyde de carbone, ainsi que des perturbations comme les feux de forêts et les chablis sont des exemples de changements qui ont un impact sur la composition des forêts (McDowell et al., 2020). Un autre exemple important de changement global qui nuit à la biodiversité et la composition des forêts en Amérique du Nord est l'invasion par des insectes et pathogènes exotiques envahissants (Dukes et al., 2009; Lovett et al., 2016; McDowell et al., 2020). Les espèces exotiques envahissantes sont principalement introduites dans de nouveaux environnements en raison du commerce international. Ceci explique pourquoi la fréquence d'espèces introduites augmente en fonction de la proximité aux ports et aux points d'entrée d'immigration (Mack et al., 2000). Les forêts de la côte est de l'Amérique du Nord sont donc sévèrement affectées par l'invasion d'espèces exotiques envahissantes (Mack et al., 2000; Lovett et al., 2016).

L'agrile du frêne, *Agrilus planipennis*, est un insecte exotique envahissant très répandu dans l'est de l'Amérique du Nord. Cet insecte est arrivé d'Asie et ravage les frênes (*Fraxinus*) des forêts canadiennes depuis sa première découverte au Canada en 2002 (Cappaert et al., 2005). En effet, suite à sa détection en Amérique du Nord, l'agrile du frêne a décimé plus de 15 millions de frênes en seulement deux ans (Poland et McCullough, 2006). Cependant, Siegert et al. (2014) suggèrent que l'agrile du frêne s'est potentiellement établi en Amérique du Nord presque 10 ans avant sa première découverte, ce qui a pu donner une avance à cet insecte qui est passé inaperçu. De plus, l'invasion par l'agrile du frêne a été très coûteuse pour le Gouvernement du Canada. En

2010, les coûts pour contrôler l'insecte ainsi que la coupe des frênes infectés dans les zones urbaines se sont élevés à 524 millions de dollars canadien (taux de devise de 2010) (McKenney et al., 2012). Sachant maintenant le danger que pose cet insecte sur les frênes, comment cet insecte a-t-il pu s'introduire aussi facilement et en si grand nombre en Amérique du Nord?

Il y a plusieurs espèces et une grande distribution de frênes en Amérique du Nord. Ils sont particulièrement abondants aux États-Unis et au sud-est du Canada (Harlow et al., 1991; MacFarlane & Meyer, 2005). Au Canada, cinq espèces de frênes sont utilisées comme hôtes principaux par l'agrile du frêne. Ces arbres rendent plusieurs services écologiques comme la protection contre le vent, la régulation de la température ainsi que la réduction du ruissellement et de la pollution ce qui les a rendus très populaires en milieu urbain. De plus, ces arbres se retrouvent surtout en milieu riverain et sont donc très utiles pour réduire l'érosion et le lessivage de nutriments vers les cours d'eau (Gouvernement du Canada, 2024). Bref, la grande distribution de ces arbres a favorisé l'introduction rapide de l'agrile du frêne.

La biologie et les caractéristiques de cet insecte ont aussi favorisé son introduction rapide. L'agrile du frêne est un coléoptère foreur (Coleoptera: Buprestidae) qui se spécialise sur les frênes pour la reproduction et comme source de nourriture (Cappaert et al., 2005). Le cycle biologique débute avec la ponte des œufs par les adultes de juin à août sur l'écorce et les fissures du frêne et les larves émergent environ 10 jours plus tard. Les larves de cet insecte se nourrissent du phloème des frênes. Les larves creusent donc un chemin sous l'écorce et créent des galeries en forme de S de juin à octobre. Durant les mois d'hiver, les larves ont mué à leur stade prépupe et vont rester en hibernation jusqu'en avril-mai où elles se transforment en nymphe. Le cycle se termine de juin à août, les nymphes vont faire une dernière mue pour se transformer en adulte et enfin émerger du tronc, ce qui crée des trous en forme de D sur l'écorce des frênes (Ressources Naturelles Canada,

2015). Les larves se retrouvent donc logées sous l'écorce des frênes et c'est probablement de cette façon que cet insecte a pu échapper aux inspections d'insectes de cargos internationaux et s'est introduit en Amérique du Nord. En effet, de 1984 à 2000, le genre *Agrilus* a seulement été intercepté 38 fois dans les cargos internationaux ainsi que dans les palettes de bois qui servent d'emballage parmi les 565 000 inspections d'insectes qui ont été faites (Cappaert et al., 2005). De plus, cet insecte est capable de survivre aux hivers canadiens lors de son stade prépupe grâce à plusieurs mécanismes de tolérance au froid. En effet, durant l'hiver, il y a une plus grande concentration de glycérol, un glucide cryoprotectant, dans l'hémolymphe des prépupe et la cire cuticulaire augmente significativement la résistance de l'agrile du frêne au gel (Crosthwaite et al., 2011).

L'agrile du frêne s'est déplacé rapidement dans l'ensemble du pays. Cet insecte peut voler assez rapidement et sur de longues distances, en théorie, pour se déplacer (Taylor et al., 2004). Cependant, suite à la création de modèles de dispersion de cet insecte, on a pu voir que sa présence était fortement influencée par le réseau routier, ce qui suggère que l'activité humaine est le moyen de dispersion principal de cet insecte. En effet, Prasad et al. (2010) ont évalué des modèles de dispersion potentielle de l'agrile du frêne et ont conclu qu'il y a une plus forte chance que des frênes infectés par l'insecte se retrouvent à une distance de moins de 2 km d'une autoroute par rapport à ceux qui se retrouvent de 4-6 km de l'autoroute. Ces conclusions sont cependant basées sur des estimés de 2006. D'autres études ont essayé de modéliser la dispersion de cet insecte avec des données plus récentes, mais cette tâche ne s'est pas avérée facile. Evans (2016) a vu une dispersion beaucoup plus rapide de l'insecte qu'établie par Prasad et al. (2010), soit 57 km par an. Cependant, la plupart des études qui ont évalué cette distribution ont vu que la plupart des insectes se retrouvent à moins de 100 m de l'infestation principale, mais 1% des insectes se déplacent sur

de longues distances (Evans, 2016). Sachant que les larves de cet insecte peuvent survivre dans le bois coupé pour le chauffage (Petrice & Haack, 2006), Koch et al. (2012) se sont penché sur le déplacement du bois de chauffage par des campeurs comme mécanisme principal de dispersion de l'agrile du frêne en Amérique du Nord. Ces auteurs ont pu conclure que les campeurs qui apportent leur propre bois de chauffage peuvent être un vecteur de transport important, car même si seulement 1% du bois de chauffage transporté contient des individus vivants d'agrile du frêne, il y a des milliers de voyages de longues distances qui se produisent par année. Bref, la combinaison de certains individus d'agrile du frêne qui se déplacent sur de longues distances et des activités humaines comme le déplacement du bois de chauffage est ce qui semble avoir dispersé l'insecte aussi rapidement à travers l'est du continent.

Après maintenant 20 ans, certains écologistes en Amérique du Nord essaient toujours de limiter et de modéliser l'invasion de l'agrile du frêne (Evans, 2016; Gaudon & Smith, 2019; Butler et al., 2022). Au Canada, Butler et al. 2022 ont relâché trois parasitoïdes de l'agrile du frêne à plusieurs sites en Ontario, au Québec et au Nouveau Brunswick de 2013-2019, mais les parasitoïdes n'ont pas diminué la population d'agrile du frêne. Evans (2016) a aussi évalué la vitesse de dispersion de l'agrile du frêne en combinant de nouvelles données et celles d'études antérieures, mais il est encore très difficile de prédire la dispersion de cette espèce. Ces études récentes soulignent l'importance de continuer à étudier cette espèce, malgré le fait que l'invasion initiale par l'agrile du frêne date de plus de 20 ans. L'invasion n'est toujours pas sous contrôle et il est essentiel de mieux comprendre la dispersion de l'insecte pour pouvoir la limiter.

Je me suis donc penchée sur la dispersion de l'agrile du frêne ainsi que les dommages causés par cet insecte sur les frênes de la région de l'Outaouais. J'ai testé l'hypothèse que les activités humaines influencent fortement la dispersion de cet insecte. J'ai testé la prédiction que le

niveau d'infestation par l'agrile du frêne sera plus élevé aux sites avec une densité de population humaine plus élevée. J'ai supposé qu'une densité de population humaine plus élevée augmente les déplacements de bois de chauffage, qui est le mécanisme principal de dispersion de l'agrile du frêne.

## **MÉTHODES**

### *Collecte de données*

J'ai obtenu des données d'emplacement de sites en Outaouais qui contiennent des frênes par un technicien forestier de la région. Je me suis aussi renseignée auprès d'un entomologiste pour lister et mieux comprendre les signes/symptômes que l'agrile du frêne laisse sur les frênes. J'ai ensuite pu dresser une liste de signes et de symptômes qui sont importants à observer pour chaque arbre (annexe 1).

Durant les mois de mai à août 2023, je me suis rendue et j'ai pris des données sur le niveau d'infestation par l'agrile du frêne à 35 sites en Outaouais qui sont représentés cartographiquement dans l'annexe 2. Les coordonnées de chaque site sont présentées dans l'annexe 4. Le nombre de frênes évalués à chaque site a dépendu de leur disponibilité et de leur accès. J'ai aussi pris plusieurs photos des signes/symptômes pour chaque arbre. En évaluant l'état des frênes, j'ai remarqué que plusieurs arbres semblaient avoir plus d'un tronc principal. J'ai donc aussi noté s'il y avait des troncs multiples pour chaque arbre. Finalement, j'ai mesuré le diamètre à la hauteur de la poitrine (DHP) de chaque arbre.

### *Création de l'indice d'infestation*

Pour évaluer le niveau d'infestation par l'agrile du frêne sur les frênes à chaque site, j'ai dû créer un indice qui me permettrait de standardiser le niveau d'infestation de chaque arbre. Cet indice est

obtenu en faisant la somme d'un score attribué en fonction de la gravité de certains signes/symptômes clés qui indiquent qu'un frêne est infecté par cet insecte. Pour ce faire, j'ai consulté des études précédentes qui ont attribué des scores d'infestation par l'agrile du frêne pour ensuite adapter ces méthodes en fonction des données que j'ai prises sur le terrain.

de Andrade et al. (2020) ont utilisé la condition de la canopée, le nombre de trous de pics, le nombre de trous en D, le nombre de fissures d'écorce ainsi que le nombre de pousses adventives pour déterminer le degré d'infestation des arbres par l'agrile du frêne. Finley et al. (2016) ont plutôt utilisé la mortalité des branches, les trous en D, les fissures verticales de l'écorce, les galeries visibles, l'activité des pics bois ainsi que les pousses adventives pour caractériser le niveau d'infestation.

En me basant sur les méthodes de ces deux études, j'ai décidé d'utiliser le niveau de gravité des signes/symptômes suivants comme indicateurs principaux d'infestation par l'agrile du frêne: galeries visibles, dommages sur l'écorce, éclaircissement du feuillage et pousses adventives. Je n'ai pas utilisé tous les signes/symptômes listés par ces études pour simplifier le calcul de l'indice. En effet, j'ai regroupé les trous en D, les fissures verticales ainsi que les trous de pics en une catégorie: dommages sur l'écorce, car en visualisant les données j'ai remarqué que ces signes/symptômes sont souvent vus ensemble et sont tous visibles sur l'écorce. J'ai cependant gardé les galeries visibles en une catégorie séparée, même si elle rapporte directement à la qualité de l'écorce, car ce signe est le plus définitif d'une infestation avancée par l'agrile du frêne (de Groot et al., 2006). J'ai aussi décidé d'inclure l'éclaircissement du feuillage comme un facteur, car celui-ci regroupe assez bien la mortalité des branches aussi et peut être un symptôme précoce d'une infestation par l'agrile du frêne (de Groot et al., 2006). J'ai finalement décidé d'inclure les pousses adventives, car elles sont une réponse au stress qu'impose l'agrile du frêne (de Groot et al., 2006)

et ce symptôme est listé pour les deux études antérieures. Cependant, je n'ai pas pu trouver d'étude similaire qui avait utilisé une matrice d'infestation ou qui décrit exactement la construction d'un indice d'infestation par l'agrile du frêne, d'où la nécessité de créer mon propre indice.

Mon indice d'infestation est présenté dans le tableau 1. J'ai donné des valeurs plutôt arbitraires pour chaque signe/symptôme avec l'aide d'études précédentes qui utilisent les signes et symptômes de cet insecte dans leur analyse. Sachant que Finley et al. (2016) ont utilisé la présence de galeries comme données binaires et le reste des signes/symptômes dans une analyse non-paramétrique, j'ai décidé de donner la plus grande importance à ce signe. En effet, j'ai attribué une valeur de 3 et 4 pour un niveau faible/modéré et élevé/très élevé, respectivement, pour les galeries visibles. Sachant que les trous en D est aussi un signe direct de l'infection par l'agrile du frêne et que d'autres symptômes sont regroupés dans « dommages sur l'écorce », j'ai décidé de lui attribuer une valeur double à celle des deux autres symptômes, soit de 1 et 2 pour un niveau faible/modéré et élevé/très élevé, respectivement. Pour l'éclaircissement du feuillage et les pousses adventives, je leur ai attribué une valeur de 0,5 et 1 pour un niveau faible/modéré et élevé/très élevé, respectivement, car ceux-ci sont des symptômes typiques en réponse au stress de l'infestation, mais ils peuvent être présents sans qu'il y ait nécessairement une infestation par l'agrile du frêne. L'indice d'infestation attribué pour chaque arbre est présenté dans l'annexe 3.

### *Analyse cartographique*

En prenant compte de l'analyse faite par Prasad et al. (2010) qui ont vu une probabilité 4,5 fois plus élevée qu'un arbre infecté par l'agrile du frêne se retrouve dans un rayon de 2 km d'une autoroute, j'ai créé des zones tampon avec un rayon de 2 km autour de chaque site d'échantillonnage dans ArcGIS Pro. Les divisions de recensement et l'emplacement des sites sont

illustrés dans la figure 1. Pour évaluer la densité de la population humaine dans chaque zone tampon, j'ai utilisé une couche avec des informations de la densité de la population humaine en 2021 à chaque division de recensement au Canada (Scott, 2023). La densité de la population humaine de chaque zone tampon de 2 km est présentée dans l'annexe 4.

### *Analyse statistique*

J'ai créé un modèle linéaire mixte dans le logiciel R version 4.3.2 qui utilise le logarithme naturel de l'indice d'infestation + 1 (puisque certaines valeurs sont 0) en tant que variable dépendante et la densité de la population humaine dans un rayon de 2 km pour chaque arbre à chaque site et le DHP en tant que variables indépendantes fixes. Le DHP a été ajouté comme variable fixe puisque c'est une variable continue. J'ai ajouté le site comme variable aléatoire puisque c'est une variable catégorique qui peut avoir un impact sur l'indice d'infestation pour une même densité de population. Je me suis assurée que ce modèle respectait les conditions d'applications d'un modèle linéaire mixte.

J'ai fait une analyse secondaire dans R puisque j'ai noté que plusieurs frênes semblaient avoir plusieurs troncs principaux et ceci n'était pas un signe ou symptôme de l'agrile du frêne attendu. J'ai fait un test de t qui suppose des variances égales du logarithme naturel de la densité de la population humaine dans le rayon de 2 km autour du site en fonction de la présence ou de l'absence de troncs multiples. J'ai utilisé le logarithme naturel de la densité de la population humaine pour normaliser la distribution des résidus et je me suis assurée que les variances étaient égales en observant la distribution des résidus et en exécutant le test de Breusch-Pagan.

## RÉSULTATS

### *Frênes évalués et densité de population humaine*

J'ai évalué 95 frênes à 35 sites et le nombre de frênes évalués par site a varié de 1 à 5. Le DHP calculé pour chaque frêne a varié de 2,7 cm (minimum) à 53,2 cm (maximum) avec une médiane de 12,2 cm et une moyenne de 14,2 cm. L'indice d'infestation calculé pour chaque frêne a varié de 0 (minimum) à 8 (maximum) avec une médiane de 1,5 et une moyenne de 2,6.

La densité de la population humaine calculée dans un rayon de 2 km de chaque site a varié de 1,2 personnes/km<sup>2</sup> (minimum) à 851,4 personnes/km<sup>2</sup> (maximum) avec une médiane de 26,9 personnes/km<sup>2</sup> et une moyenne de 149,6 personnes/km<sup>2</sup>.

### *Effet de la densité de la population humaine sur l'indice d'infestation*

Il n'y avait aucune relation significative entre l'indice d'infestation et la densité de la population ( $r^2 = 0,046$ ,  $p = 0,356$ , figure 2) ou le DHP ( $r^2 = 0,46$ ,  $p = 0,180$ ).

La moyenne du logarithme naturel de la densité de la population humaine était significativement plus élevée ( $t = -3,9565$ ,  $df = 93$ ,  $p < 0,001$ ) pour le groupe de frênes qui ont plusieurs troncs principaux (moy = 1,99) que pour les frênes qui n'ont qu'un seul tronc principal (moy = 1,10, figure 3).

## DISCUSSION

Il est possible qu'aucune relation n'existe entre la densité de la population humaine et l'infestation par l'agrile du frêne, mais il y a aussi plusieurs raisons potentielles pourquoi je n'ai pas été capable d'observer une relation significative entre les deux variables étudiées s'il en existe une.

### *Densité de la population humaine*

Les données de densité de population humaine que j'ai obtenues de la couche ArcGIS ne prennent pas en compte les subdivisions de recensement, ce qui a été potentiellement problématique pour mon analyse. En effet, les données de densité de population étaient calculées en fonction du nombre de personnes recensées divisé par la superficie en km<sup>2</sup> de la division de recensement principale, ce qui donne une moyenne de personnes par km<sup>2</sup>. Ceci est potentiellement problématique puisque cela uniformise la densité de population et ne prend donc pas en compte les municipalités qui peuvent être plus densément peuplées. Par exemple, quelques sites évalués se situaient près de Shawville, une municipalité qui est une subdivision du Pontiac. En 2021, Shawville, ayant une superficie de 5,38 km, comptait 1668 habitants et la densité de population de cette superficie est donc de 310,1 personnes par km<sup>2</sup> (Statistiques Canada, 2022). Cependant, la division principale du Pontiac comptait seulement 1,2 personnes par km<sup>2</sup> en 2021 (Scott, 2023), car cette division est très vaste, ce qui est très loin de la densité de la municipalité de Shawville. Donc, si les subdivisions de recensement étaient incluses dans la couche, la moyenne de la densité de la population dans un rayon de 2 km de plusieurs sites aurait été plus représentative de la réalité sur le terrain.

En raison de données limitées sur les déplacements de bois de chauffage, j'ai dû faire la supposition que la densité de la population humaine était un bon indicateur des déplacements de bois de chauffage. En effet, la densité de la population humaine est un facteur important dans la dispersion de l'agrile du frêne (Muirhead et al., 2006; Barlow et al., 2014). Muirhead et al. (2006) ont vu une relation importante entre la taille de la population humaine et la dispersion de l'agrile du frêne, mais il y a plusieurs autres mécanismes qui doivent être pris en compte pour bien représenter la dispersion de l'agrile du frêne. Depuis qu'on a identifié les déplacements de bois de

chauffage comme une cause importante de dispersion de l'agrile du frêne, plusieurs restrictions ont été mises en place pour limiter la dispersion de cet insecte. Cependant, ces restrictions ne sont pas toujours respectées, c'est pourquoi la sensibilisation aux problèmes de dispersion d'insectes envahissants est nécessaire pour que les gens obéissent aux restrictions (Barlow et al., 2014). Il est donc possible que la conscientisation du problème amène les gens à obéir davantage aux restrictions dans les régions plus densément peuplées ce qui diminue potentiellement la relation entre la densité de la population humaine et le mouvement de bois de chauffage infecté.

### *Disponibilité et âge des frênes*

J'ai seulement pu évaluer 1 à 5 frênes par site puisqu'il y avait une disponibilité et/ou une accessibilité limitée, ce qui n'est pas nécessairement représentatif de la population de frênes au site. Depuis le début de l'invasion par l'agrile du frêne dans la région en 2010, plusieurs frênes sont morts et 70 000 frênes ont été coupés seulement à la ville de Gatineau (Pineda, 2018), ce qui a grandement réduit leur population. Il y a donc plusieurs sites où j'ai eu du mal à trouver des frênes à évaluer. De plus, il y a aussi quelques sites où je pouvais voir des frênes, mais ils étaient sur une propriété privée séparée d'une clôture, donc inaccessibles.

Un autre impact de la coupe de frênes infectés est que beaucoup des frênes évalués étaient souvent très jeunes et ceci aurait pu avoir un impact sur le niveau d'invasion. Le DHP médian de tous les frênes évalués est de 12,2 cm. On peut estimer l'âge approximatif d'un frêne grâce au tableau fourni par The Morton Arboretum qui montre l'âge approximatif d'un arbre en fonction de l'espèce du DHP (The Morton Arboretum, 2015). L'âge approximatif médian des frênes évalués, si on suppose que la plupart sont des frênes blancs, est d'environ 6 ans. La moitié des arbres évalués n'étaient donc pas présents lorsque l'insecte est apparu dans la région en 2010 et n'ont pas été affectés par la première vague d'invasion. Donc, s'il ne reste plus de frênes matures

à envahir, les populations d'agrile du frêne vont diminuer (Crawford, 2017). Les populations de jeunes frênes ne devraient pas connaître le même niveau d'infestation par l'agrile du frêne que les plus vieux. Pour essayer de contrôler ceci, j'ai inclus le DHP comme variable fixe dans mon modèle statistique.

### *Quantification des signes et symptômes pour l'indice d'infestation*

Il y a potentiellement une perte d'information puisque j'ai évalué les signes et symptômes de l'agrile du frêne sur les frênes de façon catégorique (bas/modéré et élevé/très élevé). En effet, il n'était pas possible pour moi d'identifier certains signes et symptômes de façon continue comme de Andrade et al. (2020) qui ont pu compter le nombre de pousses adventives ou de trous en D puisque je n'avais aucun équipement qui me permettait d'observer l'arbre jusqu'au sommet. J'ai plutôt suivi Finley et al. (2016) qui ont choisi deux niveaux (*low* et *high*) pour identifier l'infestation par l'agrile du frêne.

Pour simplifier le calcul de mon indice d'infestation, j'ai choisi et/ou regroupé les signes et symptômes qui semblaient les plus pertinents. J'ai seulement inclus les galeries visibles, la perte de feuillage et les pousses adventives en tant que catégorie seule et j'ai regroupé les trous en D, les fissures verticales de l'écorce et les trous de pics en une seule catégorie. J'ai donc inclus quatre catégories de signes et symptômes (six au total) sur 10 des signes et symptômes que j'ai pris en note sur le terrain. Bref, en raison de la simplification de la prise de données et du calcul de l'indice d'infestation, il est possible que le niveau d'infestation par l'agrile du frêne ne soit pas assez bien représenté.

### *Plusieurs troncs et troncs régénérés*

Lorsque j'ai pris mes données sur le terrain, j'ai remarqué que plusieurs frênes semblaient avoir plusieurs troncs principaux et/ou les troncs semblaient s'être régénérés d'une ancienne souche coupée, ce qui m'a encouragé à noter ce trait. J'ai aussi remarqué que je voyais souvent ces traits aux sites qui étaient plus urbains. J'ai donc décidé de faire une analyse secondaire malgré le fait que cela ne faisait pas partie de mon hypothèse initiale. Grâce à cette analyse, j'ai pu voir que les arbres avec plusieurs troncs principaux se retrouvent aux sites qui sont plus densément peuplés. Y a-t-il des avantages pour un arbre de se régénérer en plusieurs troncs ? Les arbres multi-troncs ou régénérés sont-ils mieux défendus en réponse au stress causé par une plus grande pression d'infestation par l'agrile du frêne?

Il y a malheureusement peu d'informations sur l'origine des arbres multi-troncs dans la littérature et il reste à voir si ce trait est effectivement une réponse à une pression plus élevée de l'infestation par l'agrile du frêne. Tanentzap et al. (2012) ont évalué les avantages de ce trait chez les arbres. Ils ont conclu qu'un arbre avec plusieurs troncs avait un avantage de croissance dans des environnements avec de la lumière sporadique et que ceci est le mécanisme principal de la germination des arbres multi-troncs. Ils ont aussi conclu que ce trait n'était pas une stratégie de protection contre l'herbivorie par des cerfs. Cependant, cette stratégie en tant que réponse à l'herbivorie artificielle a été observée par Gelviz-Gelvez et al. (2017) chez les semis de chênes, mais ceci reste à voir pour les frênes. Donc, les frênes avec des multi-troncs sont-ils simplement apparus en raison du manque de lumière aux sites plus urbains ou est-ce une stratégie en réponse à l'infestation par l'agrile du frêne?

J'ai pensé que cette réponse était en raison des femelles de cet insecte qui préfèrent potentiellement un tronc plus grand pour pondre leurs œufs, car ceci pourrait indiquer qu'il y a

plus de ressources pour les larves. J'ai ensuite pensé que les multi-troncs sont généralement plus petits, ce qui pourrait expliquer le phénomène. Cependant, Rigsby et al. (2014) ont vu qu'il n'y avait aucune préférence de ponte par les femelles de l'agrile du frêne en fonction du DHP dans tous leurs modèles. Donc, cette réponse ne semble pas être due au fait que les femelles sélectionnent des troncs plus gros.

### *Études futures et conclusions*

Bien que l'hypothèse initiale n'ait pas été supportée, mon étude a apporté des informations importantes sur le niveau d'infestation par l'agrile du frêne de plusieurs sites en Outaouais ainsi que des avenues de recherches futures. Il serait intéressant de poursuivre ma recherche en se concentrant sur les frênes multi-troncs pour déterminer si ceci est une réponse de plasticité phénotypique due à l'infestation par l'agrile du frêne. Étudier ceci pourrait également nous informer si ce trait apporte seulement une protection physique selon la stratégie de dilution ou s'il y a aussi une réponse plastique chimique qui pourrait aussi détourner l'agrile du frêne lorsque le frêne se régénère. Il serait aussi intéressant d'inclure plusieurs variables autres que la densité de la population humaine comme indicateur de dispersion de l'agrile du frêne pour mieux expliquer la variation de l'indice d'infestation en ayant un modèle plus complet. Bref, après plus de 20 ans, l'agrile du frêne reste toujours problématique en Amérique du Nord et il y a beaucoup de lacunes dans la littérature en ce qui concerne les modes de dispersion de l'agrile du frêne ainsi que les populations de frênes suite à l'invasion par ce coléoptère exotique envahissant. Il est crucial de poursuivre la recherche dans ce domaine pour limiter les populations d'agrile du frêne et préserver nos frênes indigènes.

## RÉFÉRENCES

- Barlow, L-A., Cecile, J., Bauch, C. T., & Anand, M. (2014). Modelling interactions between forest pest invasions and human decisions regarding firewood transport restrictions. *PLoS One*, 9(4). e90511. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0090511>
- Butler, S., Dedes, J., Jones, G., Hughes, C., Ladd, T., Martel, V., Ryall, K., Sweeney, J., & MacQuarrie, C. J. K. (2022). Introduction and establishment of biological control agents for control of emerald ash borer (*Agrilus planipennis*) in Canada. *The Canadian Entomologist*, 154(1), 1-20. DOI:10.4039/tce.2022.32
- Cappaert, D., McCullough, D. G., Poland, T. M., & Siegert, N. W. (2005). Emerald ash borer in North America: a research and regulatory challenge. *American Entomologist*, 51(3). 152-165. <https://doi.org/10.1093/ae/51.3.152>
- Crawford, B. (2017). Ottawa's emerald ash borer infestation is in decline, but that's not necessarily good news. *Ottawa Citizen*. <https://ottawacitizen.com/news/local-news/ottawas-emerald-ash-borer-infestation-is-in-decline-but-thats-not-necessarily-good-news#:~:text=After%20eight%20years%20and%2050%2C000,left%20for%20it%20to%20eat>
- Crosthwaite, J. C., Sobek, S., Lyons, D. B., Bernards, M. A., & Sinclair, B. J. (2011). The overwintering physiology of the emerald ash borer, *Agrilus planipennis* Fairmaire (Coleoptera: Buprestidae). *Journal of Insect Physiology*, 57(1). 166-173. <https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2010.11.003>
- de Andrade, R. B., Abell, K., Duan, J. J., Shrewsbury, P., & Gruner, D. S. (2020). Protective neighboring effect from ash trees treated with systemic insecticide against emerald ash borer. *Pest Management Science*, 77(1). 474-481. <https://doi.org/10.1002/ps.6041>
- de Groot, P., Biggs, W. D., Lyons, D. B., Scarr, T., Czerwinski, E., Evans, H. J., Ingram, W., & Marchant, K. (2006). *A visual guide to detecting Emerald ash borer damage*. Natural Resources Canada. <https://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/26856.pdf>
- Dukes, J. S., Pontius, J., Orwig, D., Garnas, J. R., Rodgers, V. L., & Brazeel, N. (2009). Responses of insect pests, pathogens, and invasive plant species to climate change in the forests of northeastern North America: What can we predict. *Canadian Journal of Forest Research*, 39(2). 231+. <https://doi.org/10.1139/X08-171>
- Evans, A. M. (2016). The speed of invasion: rates of spread for thirteen exotic forest insects and diseases. *Forests*, 7(5). 99. <https://doi.org/10.3390/f7050099>
- Finley, K., Chhin, S., & Nzokou, P. (2016). Effects of climate on the radial growth of white ash infested with emerald ash borer. *Forest Ecology and Management*, 379(1). 133-145. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.08.008>

- Gaudon, J. M., & Smith, S. M. (2019). Augmentation of native North American natural enemies for the biological control of the introduced emerald ash borer in central Canada. *BioControl*, 65(1). 71-79. <https://doi.org/10.1007/s10526-019-09986-6>
- Gelviz-Gelvez, S. M., Flores, J., & Badano, E. I. (2017). Persistent cotyledons and multiple-stem resprouting as strategies of oak seedlings for tolerating herbivory damage. *Plant Ecology and Evolution*, 150(3). 240-246. DOI: 10.5091/plecevo.2017.1348
- Gouvernement du Canada. (2024). *Agrile du frêne (fiche d'information)* <https://ressources-naturelles.canada.ca/forets/feux-insectes-perturbations/principaux-insectes/13396>
- Harlow, W. M., Harrar, E. S., Hardin, J. W. & White, F. M. (1991). Textbook of dendrology (8th edition). McGraw-Hill.
- Koch, F. H., Yemshanov, D., Magarey, R. D., & Smith, W. D. (2012). Dispersal of invasive forest insects via recreational firewood: a quantitative analysis. *Journal of economic entomology*, 105(2). 438-450. <https://doi.org/10.1603/EC11270>
- Lovett, G. M., Weiss, M., Liebhold, A. M., Holmes, T. P., Leung, B., Fallon-Lambert, K., Orwig, D. A., Campbell, F. T., Rosenthal, J., McCullough, D. G., Wildova, R., Ayres, M. P., Canham, C. D., Foster, D. R., LaDeau, S. L., & Weldy, T. (2016). Nonnative forest insects and pathogens in the United States: Impacts and policy options. *Ecological applications*, 26(5). 1437-1455. <https://www.jstor.org/stable/24818127>
- MacFarlane, D. W., & Meyer, S. P. (2005). Characteristics and distribution of potential ash tree hosts for emerald ash borer. *Forest Ecology and Management*, 213(1-3). 15-24. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.03.013>
- Mack, R. N., Simberloff, D., Lonsdale, W. M., Evans, H., Clout, M., & Bazzaz, F. A. (2000). Issues in ecology: biotic invasions: causes, epidemiology, global consequences, and control. *Ecological applications*, 10(3). 689-710. <https://doi.org/10.2307/2641039>
- McDowell, N. G., Allen, C. D., Anderson-Teixeira, K., Aukema, B. H., Bond-Lamberty, B., Chini, L., Clark, J. S., Dietze, M., Grossiord, C., Hanbury-Brown, A., Hurtt, G. C., Jackson, R. B., Johnson, D. J., Kueppers, L., Lichstein, J. W., Ogle, K., Poulter, B., Pugh, T. A. M., Seidl, R., Turner, M. G., Uriarte, M., Walker, A. P., & Xu, C. (2020). Pervasive shifts in forest dynamics in a changing world. *Science*, 368(6494). eaaz9463. <https://doi.org/10.1126/science.aaz9463>
- McKenney, D.W., Pedlar, J.H., Yemshanov, D., Lyons, D.B., Campbell, K.L., & Lawrence, K. (2012). Estimates of the potential cost of emerald ash borer (*Agrilus planipennis* Fairmaire) in Canadian municipalities. *Arboriculture and Forestry*, 38(1), 81-91. <http://dx.doi.org/10.48044/jauf.2012.014>
- Muirhead, J. R., Leung, B., van Overdijk, C., Kelly, D. W., Nandakumar, K., Marchant, K. R., & MacIsaac, H. J. (2006). Modelling local and long-distance dispersal of invasive emerald

- ash borer *Agrilus planipennis* (Coleoptera) in North America. *Diversity and Distributions*, 12(1). 71-79. <https://doi-org.proxy.bib.uottawa.ca/10.1111/j.1366-9516.2006.00218.x>
- Petrice, T. R., & Haack, R. A. (2006). Effects of cutting date, outdoor storage conditions, and splitting on survival of *Agrilus planipennis* (Coleoptera: Buprestidae) in firewood logs. *Journal of Economic Entomology*, 99(3), 790-796. <https://doi.org/10.1603/0022-0493-99.3.790>
- Pineda, A. (2018). Agrile du frêne: Gatineau est la première ville à raser tous ses frênes. *Le Devoir : Environnement*. <https://www.ledevoir.com/environnement/530893/agrile-du-frene-gatineau-est-la-premiere-ville-a-raser-tous-ses-frenes>
- Poland, T. M., & McCullough, D. G. (2006). Emerald ash borer: Invasion of the urban forest and the threat to North America's ash resource. *Journal of Forestry*, 104(3), 118-124. <https://doi.org/10.1093/jof/104.3.118>
- Prasad, A. M., Iverson, L. R., Peters, M. P., Bossenbroek, J. M., Matthews, S. N., Sydnor, T. D., & Schwartz, M. W. (2010). Modelling the invasive emerald ash borer risk of spread using a spatially explicit cellular model. *Landscape Ecology*, 25(1), 353-369. <https://doi.org/10.1007/s10980-009-9434-9>
- Purcell, L. (2018). *How old is my tree?*. Purdue University Landscape Report. (Issue: 18-04). <https://www.purduelandscape-report.org/article/how-old-is-my-tree/>
- Ressources Naturelles Canada. (2015). L'agrile du frêne: cela vous dit quelque chose? (No. de catalogue: Fo113-1/97-2015F-PDF). [https://publications.gc.ca/collections/collection\\_2015/rncan-nrcan/Fo113-1-97-2015-fra.pdf](https://publications.gc.ca/collections/collection_2015/rncan-nrcan/Fo113-1-97-2015-fra.pdf)
- Rigsby, C. M., Muilenburg, V., Tarpey, T., Herms, D. A., & Cipollini, D. (2014). Oviposition preferences of *Agrilus planipennis* (Coleoptera: Buprestidae) for different ash species support the mother knows best hypothesis. *Annals of the Entomological Society of America*, 107(4). 773-781. <https://doi-org.proxy.bib.uottawa.ca/10.1603/AN13185>
- Scott, D (david.scott@tldsb.on.ca\_TLDSB). (2023). "CensusDivision\_21" [Polygon Layer]. Scale Not Given. Canada population density in sq/km by census division. <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=8a7ed9466e3044a8bceba2408a54271e>. Accédé le 5 avril 2024.
- Siegert, N. W., McCullough, D. G., Liebhold, A. M., & Telewski, F. W. (2014). Dendrochronological reconstruction of the epicentre and early spread of emerald ash borer in North America. *Diversity and Distributions*, 20(7). 847-858. <https://doi.org/10.1111/ddi.12212>

- Statistiques Canada. (2022). *Focus on geography series, 2021 census of population: Shawville, municipalité.* <https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2021/as-sa/fogs-spg/Page.cfm?Lang=E&topic=1&dguid=2021A00052484010>.
- Tanentzap, A. J., Mountford, E. P., Cooke, A. S., & Coomes, D. A. (2012). The more stems the merrier: advantages of multi-stemmed architecture for the demography of understory trees in a temperate broadleaf woodland. *Journal of Ecology*, *100*(1). 171-183. <https://www.jstor.org/stable/41333097>
- Taylor, R. A. J., Bauer, L. S., Miller, D. L., & Haack, R. A. (2004). Emerald ash borer flight potential. *In* Emerald ash borer research and technology development meeting, Romulus, Michigan, p. 15-16. <https://bugwoodcloud.org/resource/files/6246.pdf>
- The Morton Arboretum. (2015). Estimated age of urban trees by species and diameter (DBH). [https://content.govdelivery.com/attachments/INSTATE/2015/01/12/file\\_attachments/355000/TMAestimatetreeDBH\\_Age.pdf](https://content.govdelivery.com/attachments/INSTATE/2015/01/12/file_attachments/355000/TMAestimatetreeDBH_Age.pdf)
- WWF. (2022). *Living Planet Report 2022 - Building a nature-positive society*. [https://wwf.ca/wp-content/uploads/2022/10/lpr\\_2022\\_full\\_report\\_en.pdf](https://wwf.ca/wp-content/uploads/2022/10/lpr_2022_full_report_en.pdf)

## TABLEAUX

**Tableau 1.** Tableau pour calculer l'indice d'infestation de chaque frêne. Les signes et symptômes sont listés dans la colonne de gauche et un score arbitraire est attribué en fonction de la gravité du signe/symptôme dans les deux colonnes de droite. Chaque catégorie contient deux photos qui sont des exemples de la gravité du signe/symptôme respectif. Chaque exemple est désigné du code suivant: AX.XXXXX. Le premier nombre : AX indique le ID de l'arbre et les nombres qui suivent : XXXXX est le code qui identifie le site.

	Score en fonction de la gravité du signe/symptôme	
Signe/Symptôme	Faible / Modéré	Élevé / Très élevé

**Galleries visibles**

**3**

Ex: A2.26072



Ex: A3.12945



**4**

Ex: A1.13993



Ex: A3.12910



**Dommages sur l'écorce**  
(Trous en D / Fissures  
verticales / Trous de  
pics)

**1**

Ex: A2.12911



Ex: A1.16157



**2**

Ex: A1.129102



Ex: A2.13736



**Éclaircissement du  
feuillage**

**0,5**

Ex: A1.17027



Ex: A2.12926



**1**

Ex: A1.13172



Ex: A1.19169



**Pousses adventives**

**0,5**

Ex: A2.15332



Ex: A3.16173



**1**

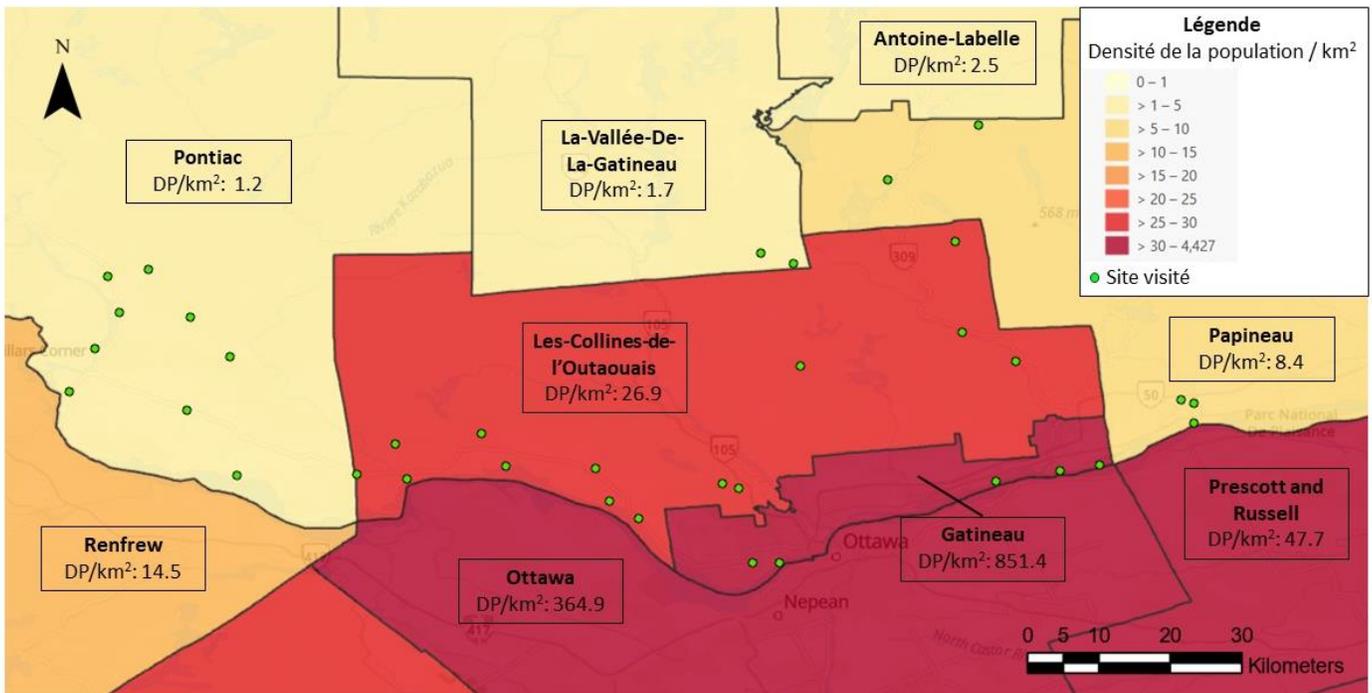
Ex: A1.18020



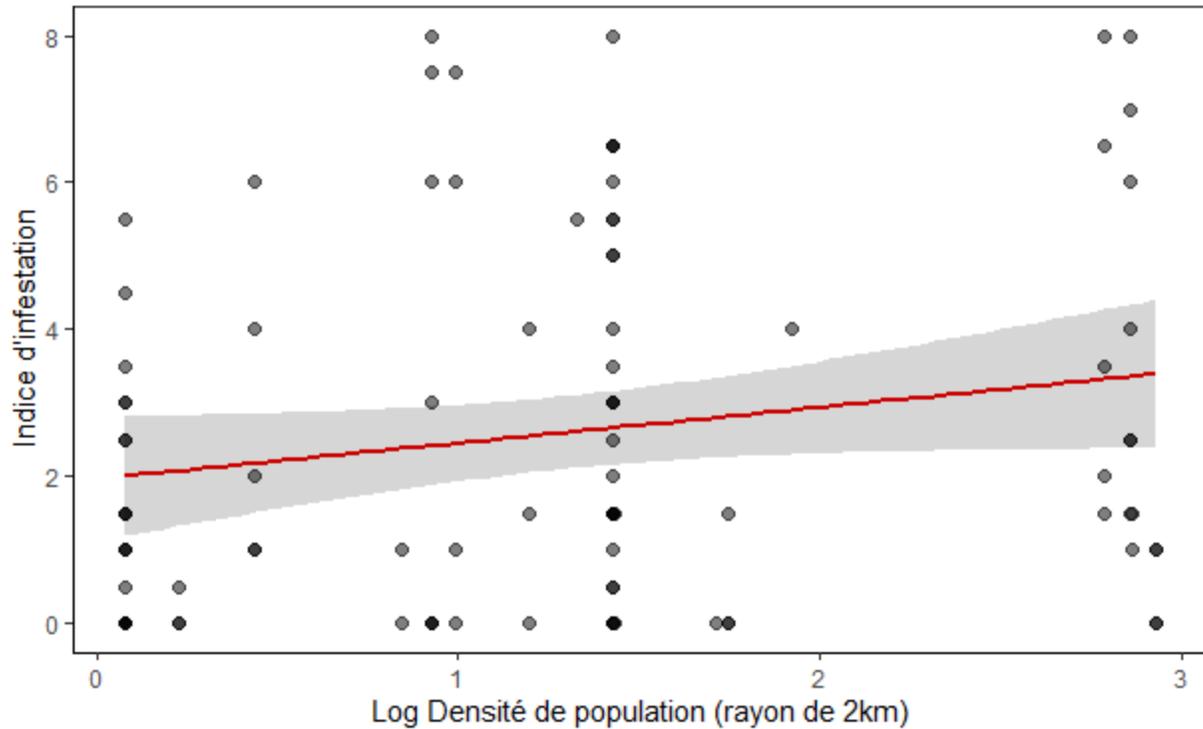
Ex: A5.15330



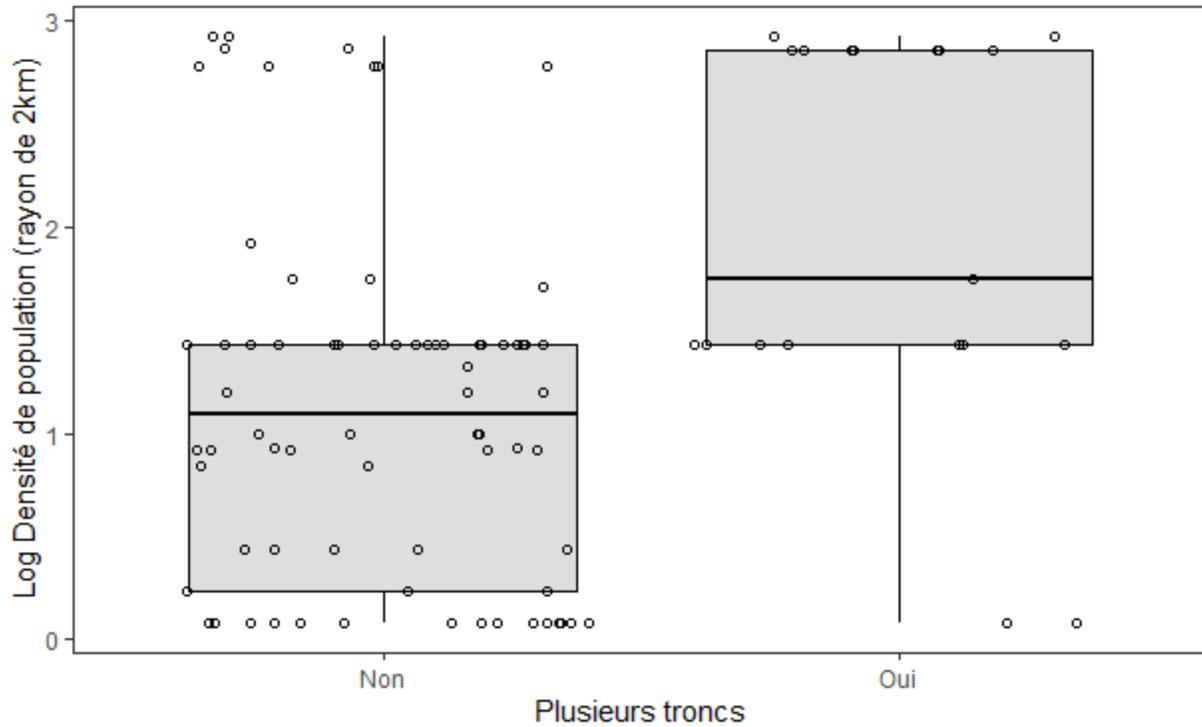
## FIGURES



**Figure 1.** Carte représentant les divisions de recensement de la région de l'Outaouais qui sont utilisées dans le calcul de la densité de la population humaine pour chaque zone tampon de 2 km autour d'un site. Chaque division de recensement est identifiée par le nom, la densité de population humaine et la couleur qui dépend de la densité de la population humaine respective. Les sites visités sont illustrés par les points verts (n = 35).



**Figure 2.** Régression linéaire de l'indice d'infestation en fonction du logarithme naturel de la densité de la population humaine dans un rayon de 2 km du site. La densité de la population humaine dans un rayon de 2 km, ayant une très grande variabilité, a été transformée en log pour mieux visualiser la relation avec l'indice d'infestation. La droite rouge représente la régression linéaire, les barres en gris représentent l'intervalle de confiance de 95% de la régression et chaque point désigne un frêne.



**Figure 3.** Diagramme de boîte à moustaches de la présence de plusieurs troncs principaux en fonction du logarithme naturel de la densité de la population humaine dans un rayon de 2 km du site. Chaque point désigne un frêne.

## ANNEXE

### Annexe 1

Tableau 1 - Tableau listant les signes et symptômes de l'agrile du frêne à identifier sur chaque frêne sur le terrain (de Groot et al., 2006).

<b>Signes de l'insecte sur le frêne</b>
(1) Galeries en forme de S sous l'écorce
(2) Trous de sortie en forme de D sur l'écorce
(3) Feuilles avec perforations (mangées)
<b>Symptômes du frêne souvent causés par l'insecte</b>
(4) Présence de pic-bois / trous de pics
(5) Pousses adventives à la base du tronc
(6) Déformations de l'écorce (fentes verticales)
(7) Feuillage jaune
(8) Éclaircissement du feuillage
(9) Branches mortes
(10) Production élevée de samares

## Annexe 2

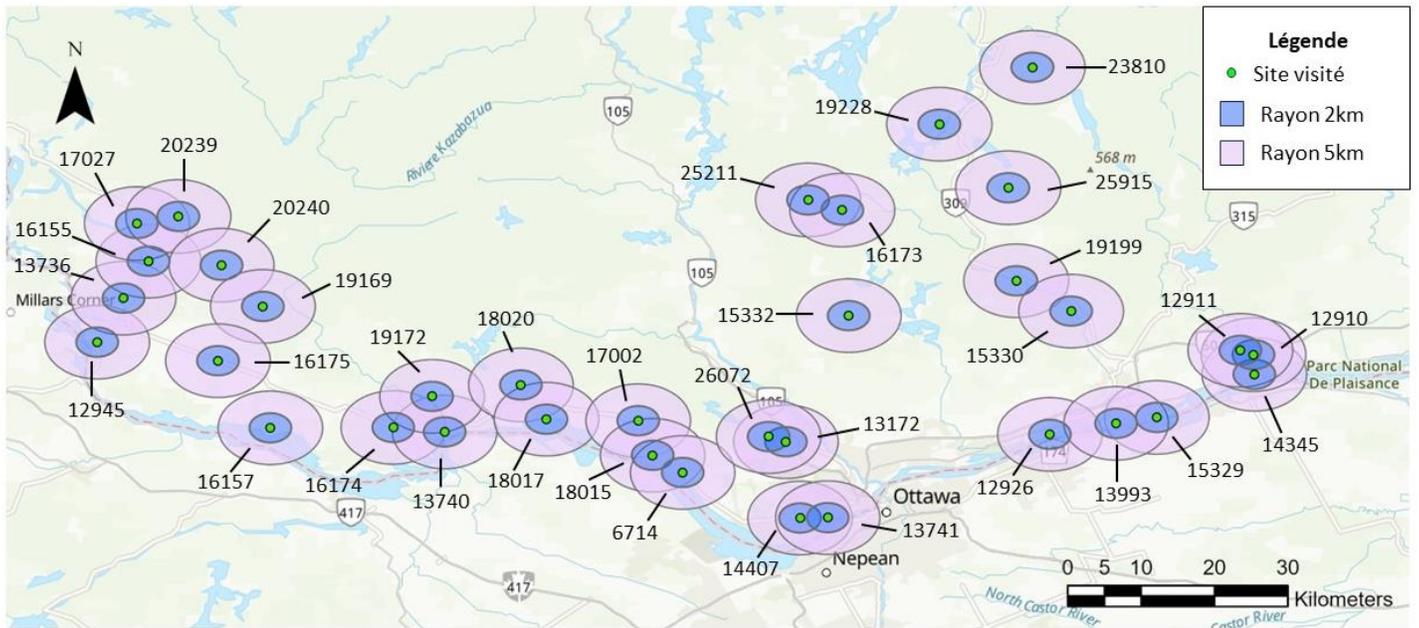


Figure 1 – Carte de la région de l’Outaouais identifiant chaque site avec une zone tampon d’un rayon de 2 km et une zone tampon d’un rayon de 5 km.

### Annexe 3

Tableau 2 - Tableau illustrant l'indice d'infestation de tous les arbres à chaque site.

Site	Arbre ID	Indice	Site	Arbre ID	Indice
12926	A1	2,5	15332	A1	1,5
	A2	7		A2	3,5
	A3	2,5		A3	5,5
	A4	1,5		A4	8
	A5	6	25915	A1	0
15329	A1	6,5	19199	A1	0,5
	A2	1,5		A2	0,5
	A3	3,5		A3	3
	A4	2	15330	A1	6
	A5	8		A2	2,5
13993	A1	4		A3	6,5
	A2	8		A4	1,5
14345	A1	5,5		A5	6,5
12910	A1	6	23810	A1	1
	A2	7,5		A2	0
	A3	8	19228	A1	0
12911	A1	0		A2	0
	A2	3	25211	A1	0
14407	A1	1		A2	0
	A2	1		A3	0,5
	A3	0	16173	A1	1
	A4	0		A2	0
13741	A1	1		A3	7,5
	A2	1,5		A4	6
16174	A1	1,5	12945	A1	1
	A2	4		A2	4
	A3	0		A3	6
13740	A1	4		A4	2
19172	A1	0		A5	1
	A2	1,5	13736	A1	1
	A3	0		A2	5,5
18020	A1	4		A3	1,5
	A2	3		A4	3
18017	A1	1,5	16155	A1	0
	A2	0		A2	1,5
17002	A1	1,5		A3	0
	A2	1		A4	0
18015	A1	1,5	17027	A1	0,5

	A2	0	20239	A1	1
	A3	0	20240	A1	4,5
6714	A1	0		A2	1,5
13172	A1	3		A3	1
26072	A1	5		A4	0
	A2	5		A5	0
	A3	2	19169	A1	2,5
	A4	5,5		A2	3,5
	A5	6,5	16175	A1	2,5
			16157	A1	3

#### Annexe 4

Tableau 3 - Tableau qui illustre les coordonnées et la densité de la population moyenne dans une zone tampon de 2 km de chaque site.

Site	Longitude	Latitude	Densité de population humaine (zone tampon 2 km)
12926	-75,4922721	45,5156228	716,88
15329	-75,3613867	45,5363817	607,67
13993	-75,4112	45,5291	719,48
14345	-75,2420433	45,5891333	21,18
12910	-75,2430418	45,6131861	8,4
12911	-75,259175	45,6184283	8,4
14407	-75,7980967	45,4133517	851,4
13741	-75,7642	45,4138	733,09
16174	-76,2959717	45,5241017	15,75
13740	-76,2331	45,5186	83,68
19172	-76,24847	45,562125	26,9
18020	-76,13976	45,576075	26,9
18017	-76,1085067	45,53422	27,135
17002	-75,9961485	45,5323756	26,9
18015	-75,9785017	45,490085	55,69
6714	-75,941786	45,4690374	51,87
13172	-75,8153611	45,5066716	26,9
26072	-75,8365552	45,5129532	26,9
15332	-75,7385183	45,6608633	26,9
25915	-75,5432017	45,8172907	26,9
19199	-75,5334217	45,703485	26,9
15330	-75,4662867	45,66642	26,9
23810	-75,513702	45,964608	6,955
19228	-75,6275883	45,8949867	8,4
25211	-75,7882308	45,8023997	1,7
16173	-75,746425	45,7899717	9,87
12945	-76,65842	45,6284183	2,74
13736	-76,6262	45,6823	1,2
16155	-76,5956133	45,72741	1,2
17027	-76,6098083	45,7735267	1,2
20239	-76,5590432	45,7821877	1,2
20240	-76,5062117	45,7225313	1,2
19169	-76,4556083	45,672135	1,2
16175	-76,5105833	45,6057717	1,2

16157

-76,4464067

45,5236833

1,2