
Influence d'une Espèce Invasive *Tamias* de Sibérie (*Tamias sibiricus*) sur les Tiques (*Ixodes ricinus*) et la Maladie de Lyme dans la Forêt de Soignes à Bruxelles

Hella Émilie

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme
de Master en Biologie des Organismes et Écologie

Promotrice : Sophie Vanwambeke (UCLouvain)

Année académique
2022-2023

Influence d'une Espèce Invasive Tamia de Sibérie (*Tamias sibiricus*) sur les Tiques (*Ixodes ricinus*) et la Maladie de Lyme dans la Forêt de Soignes à Bruxelles

Dans beaucoup de pays, dont la Belgique, la maladie de Lyme est un problème pour la santé publique. C'est une maladie vectorielle transmise par les tiques (*Ixodes ricinus*). En effet, elles transportent la bactérie *Borrelia burgdorferi* sensu lato et ses génoespèces. Cette bactérie se trouve dans le sang des hôtes, comme les rongeurs ou les oiseaux, dont les tiques se nourrissent pour continuer leur cycle de développement. Parmi les rongeurs, le Tamia de Sibérie (*Tamias sibiricus*) est une espèce invasive dans les forêts européennes. Celle-ci, ayant une grande prévalence à la bactérie, peut impacter la transmission de la maladie de Lyme et l'infection des tiques. Les objectifs de ce mémoire sont de comprendre l'influence du Tamia de Sibérie sur l'abondance des tiques dans la Forêt de Soignes en Belgique, ainsi que sur le nombre de tiques infectées par la bactérie *Borrelia burgdorferi* s.l et ses génoespèces, principalement *B. afzelii*. La présence d'un second hôte, le Chevreuil (*Capreolus capreolus*), et la végétation sont également prise en compte dans les analyses. Les expériences ont pris place dans une partie de la Forêt de Soignes bruxelloise et les tiques ont été récoltées à l'aide de la méthode de « flagging ». Dans cette forêt périurbaine, le Tamia de Sibérie exerce un impact positif sur l'abondance des larves mais pas celle des nymphes. Les essences des arbres avec lesquelles on rencontre le plus de tiques sont le Chêne pédonculé (*Quercus robur*) et le Hêtre commun (*Fagus sylvatica*), tandis que le type de sous-bois va dépendre de la présence des hôtes dans ceux-ci. Ensuite, le pourcentage de tiques infectées par la *Borrelia burgdorferi* s.l dans la Forêt de Soignes va dépendre de la présence des deux hôtes. Les tamias vont contaminer plus de tiques, tandis que la présence du chevreuil va réduire ce nombre. Pour finir, la génoespèce *B. afzelii* est plus fréquemment rencontrée dans cette forêt avec un pourcentage de 58.6 %, mais n'est pas influencée par la présence du rongeur. Celui-ci va dépendre de la communauté des hôtes et de leurs prévalences.

Influence of an Invasive Species Siberian Chipmunk (*Tamias sibiricus*) on Ticks (*Ixodes ricinus*) and Lyme Disease in the Sonian Forest in Brussels

In many countries, including Belgium, Lyme disease is a public health problem. It is a vector-borne disease transmitted by ticks (*Ixodes ricinus*). Indeed, they carry the pathogen *Borrelia burgdorferi* sensu lato and its genospecies. This pathogen is found in the blood of hosts, such as rodents or birds, on which the ticks feed to continue their development cycle. Among rodents, the Siberian chipmunk (*Tamias sibiricus*) is an invasive species in European forests. It has a high prevalence of the pathogen and can then impact on the transmission of Lyme disease and the infection of ticks. The objectives of this thesis are to understand the influence of the Siberian chipmunk on the abundance of ticks in the Sonian Forest in Belgium, as well as on the number of ticks infected with the pathogen *Borrelia burgdorferi* s.l and its genospecies, mainly *B. afzelii*. The presence of a second host, the roe deer (*Capreolus capreolus*), and the vegetation are also considered in the analyses. The experiments took place in a part of the Sonian Forest in Brussels and the ticks were collected using the flagging method. In this suburban forest, the Siberian chipmunk had a positive impact on the abundance of larvae but not on nymphs. The tree species with which ticks are most found are Common Oak (*Quercus robur*) and Common Beech (*Fagus sylvatica*), while the type of undergrowth will depend on the presence of the hosts in them. Secondly, the percentage of ticks infected with *Borrelia burgdorferi* s.l. in the Sonian Forest will depend on the presence of the two hosts. Chipmunks will infect more ticks, while the presence of roe deer will reduce this number. Finally, the genospecies *B. afzelii* is more frequently found in this forest with a percentage of 58.6 % but is not influenced by the presence of the rodent. This will depend on the host community and their prevalence.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont permise de mener à bien ce mémoire, de la reconnaissance sur le terrain à la dernière relecture.

Je remercie ma promotrice Sophie Vanwambeke de l'école de géographie à l'UCLouvain. Merci pour votre patience, votre encadrement et vos conseils, favorisant la bonne réflexion lors de ce mémoire.

Je remercie Clémence Salembier, avec qui j'ai réalisé l'ensemble de mes expériences. Merci pour ta bonne humeur à toute épreuve. Ce fut un plaisir de réaliser ce mémoire avec toi.

Je remercie Raphaël Rousseau pour sa bienveillance, son enthousiasme et son aide pour les analyses statistiques.

Je remercie Madeleine Guyot qui m'a appris à utiliser le logiciel ArcGis Pro et m'a aidée dans ma réflexion sur les tamias en Forêt de Soignes.

Je remercie Erik Matthysen et Dieter Heylen qui nous ont apportées leur expertise sur les tiques et les tamias tout au long du mémoire.

Je remercie Hans Van Dyck pour m'avoir guidée dans le choix de mon mémoire et d'avoir pris le temps de me conseiller.

Je remercie Jens Zarka et Käthe Robert pour m'avoir accueillie à l'Université d'Anvers et m'avoir guidée dans la préparation des tiques.

Je remercie l'équipe de Hein Sprong de Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM) aux Pays-Bas qui nous ont rapidement fourni les données des tiques infectées, nous permettant de ne pas prendre trop de retard dans les analyses.

Je remercie Frederik Vaes, Willy Van den Velde, Wilfrid Barth, Stéphane Vanwijnsberghe et les autres gardes forestiers de la Forêt de Soignes ainsi que l'administration de Bruxelles-Environnement pour nous avoir guidées tout au long des expériences de terrain. Vous n'hésitez pas à répondre à nos questions, à venir nous voir sur le terrain et à vous intéresser à nos trouvailles.

Je remercie Karin Gielen de Natuurpunt d'avoir pris le temps de m'envoyer les données d'observations des espèces dans la Forêt de Soignes.

Je remercie Marine Stoz qui a pris un temps précieux à relire attentivement mon travail et à donner son avis pointilleux.

Je remercie également ma copine pour ses conseils et son soutien moral, dans les bons comme dans les mauvais moments.

Pour finir, un tout grand merci à ma famille et mes amies de m'avoir soutenue tout au long de ce périple.

Table des matières

1	Introduction.....	7
1.1	La Forêt de Soignes.....	8
1.2	La tique (<i>Ixodes ricinus</i>)	8
1.3	La maladie de Lyme	13
1.4	Le Tamia de Sibérie (<i>Tamias sibiricus</i>).....	16
1.5	Les interactions entre les facteurs	20
2	Matériels et méthodes	22
2.1	Objectif du mémoire	22
2.2	Questions.....	22
2.2.1	La distribution et répartition du Tamia de Sibérie	22
2.2.2	L'abondance de tiques	23
2.2.3	L'abondance des tiques infectées par la bactérie <i>Borrelia burgdorferi</i> sensu lato.....	24
2.3	Hypothèses	25
2.4	Zone d'étude et sites de récolte.....	25
2.5	Récolte des données	28
2.5.1	Les tiques.....	28
2.5.2	Les données météorologiques	29
2.5.3	Les hôtes.....	30
2.5.4	La végétation	31
2.5.5	Le sol.....	31
2.5.6	Les autres données.....	32
2.6	Analyse statistique	32
2.6.1	Abondance des tiques	32
2.6.2	Abondance de tiques infectées par <i>Borrelia burgdorferi</i> sensu lato.....	35
2.6.3	Analyses des résultats	36
2.6.4	Le site outlier	36
2.6.5	Les modèles complets	38
3	Résultats.....	40
3.1	Analyse de la répartition du Tamia de Sibérie dans la Forêt de Soignes	40
3.2	Abondance des nymphes récoltées	48
3.2.1	Influence de la présence du Tamia de Sibérie.....	49
3.2.2	Influence de la présence des hôtes (Tamia de Sibérie et Chevreuil)	50
3.2.3	Influence de la végétation arborescente avec le Tamia de Sibérie.....	51
3.2.4	Influence du sous-bois avec le Tamia de Sibérie.....	53
3.2.5	Résumé	55

3.3	Abondance des larves récoltées.....	56
3.3.1	Influence de la présence du Tamia de Sibérie.....	56
3.3.2	Influence de la présence des hôtes (Tamia de Sibérie et Chevreuil)	57
3.3.3	Influence de la végétation arborescente avec le Tamia de Sibérie.....	58
3.3.4	Influence du sous-bois avec le Tamia de Sibérie	60
3.3.5	Résumé	62
3.4	Abondance des tiques infectées	63
3.5	Modèles complets	67
3.5.1	Modèle complet de l'abondance des nymphes récoltées	67
3.5.2	Modèle complet de l'abondance des larves récoltées.....	68
3.5.3	Modèle complet de l'abondance des tiques infectées	68
4	Discussion.....	69
4.1	Distribution du Tamia de Sibérie dans la Forêt de Soignes.....	69
4.2	Abondance des tiques	70
4.3	Abondance des tiques infectées	71
4.4	Le site outlier F1	74
4.5	Limites et perspectives d'amélioration	74
5	Conclusion	77
6	Bibliographie	78
7	Annexes.....	85

1 Introduction

La maladie de Lyme est une maladie vectorielle transmise par les tiques. Elle est présente dans beaucoup de pays d'Europe dont la Belgique. Les tiques sont des transporteurs de la bactérie *Borrelia burgdorferi* sensu lato, elle-même responsable de la maladie de Lyme. Cette bactérie se trouve dans le sang d'un bon nombre d'animaux, comme les rongeurs ou les oiseaux, qui s'avèrent être des hôtes potentiels pour le développement des tiques. On les retrouve donc principalement dans des habitats boisés, ce qui rend la Forêt de Soignes en Belgique intéressante pour son étude. En effet, cette maladie est fortement présente dans notre pays et malgré quelques études sur le sujet ainsi que des rapports annuels du nombre de piqûres grâce aux sites TiquesNet et Sciensano [1], peu d'informations ont été recueillies sur la densité de tiques dans la Forêt de Soignes.

Nous avons voulu, Clémence Salembier et moi-même, comprendre la dynamique des tiques et des bactéries *Borrelia*, agents pathogènes de la maladie de Lyme au sein de la Forêt de Soignes à Bruxelles. De plus, je me pencherai plus personnellement sur l'influence que peuvent exercer les rongeurs invasifs, comme le Tamia de Sibérie (*Tamias sibiricus*), sur ces agents pathogènes. Ce travail permettra donc d'en apprendre davantage plus sur les vecteurs et les réservoirs de la maladie de Lyme dans la capitale belge. En outre, avoir des données concrètes sur l'abondance des tiques permettra de sensibiliser la population sur le danger que peut représenter cette bactérie et ses transmetteurs.

Dans ce travail, je vais décrire les différents facteurs responsables de la présence des tiques et de leur infection. Je commencerai par introduire la Forêt de Soignes, puis je me concentrerai sur les tiques, leur taxonomie, leur cycle de développement, leurs caractéristiques et les conditions propices à leur survie. Ensuite, je parlerai de cette maladie, des bactéries dont elle provient, de ses symptômes et de la manière dont elle se transmet aux Hommes et aux animaux. Après la description de la maladie, je vais me pencher sur les hôtes porteurs de la bactérie et de leur rôle dans la transmission de la maladie de Lyme. Plus particulièrement, je parlerai du Tamia de Sibérie, une espèce invasive dans les forêts en Europe. Je ferai ensuite un petit point sur les différents facteurs, ainsi que leurs interactions, impactant la dynamique de la maladie. Je terminerai par énoncer mes questions de recherche ainsi que mes hypothèses attendues et j'expliquerai le Protocole expérimental utilisé pour répondre à ces questions.

1.1 La Forêt de Soignes

La Forêt de Soignes est une forêt périurbaine située à cheval sur les trois régions belges (37,7 % en Région de Bruxelles-Capitale, 56 % en Région flamande et 6,3 % en Région wallonne) qui s'étend sur une superficie d'environ 4 400 ha [2, 3]. La partie bruxelloise de la forêt représente 60 % des espaces verts présents dans la région Bruxelles-Capitale et est gérée principalement par ses gardes forestiers et l'administration Bruxelles Environnement. C'est un milieu important car il reprend des espaces de détente, de jeu et de sérénité pour les gens qui s'y promènent. En termes de chiffres, on estime la fréquentation à environ 750 000 visiteurs à l'année. En plus de cet aspect social, un plan de gestion forestier multifonctionnel a aussi pris place afin d'établir une protection de la faune et la flore au sein de la forêt (réserves naturelles, zones refuges pour animaux...) [2].

La Forêt de Soignes comporte une biodiversité faunistique assez variée. On peut y retrouver 52 espèces de mammifères. Parmi ces derniers, deux espèces sont considérées comme exotiques : le Tamia de Sibérie (*Tamias sibiricus*) et le Daim (*Dama dama*). De plus, la forêt contient environ 130 espèces d'oiseaux, 4 espèces de reptiles, 8 espèces d'amphibiens, 13 espèces de poissons et dans les alentours de 786 insectes différents. Du point de vue de la flore, les hêtraies acidophiles représentent une grande majorité de la surface avec 70 % de la couverture végétale de la forêt [2].

1.2 La tique (*Ixodes ricinus*)

Les tiques sont des acariens hématophages (animaux se nourrissant du sang d'autres animaux) et ectoparasites des vertébrés [4]. Elles font partie de l'embranchement des Arthropodes comprenant les Chélicérates formant le sous-embranchement des tiques. Elles possèdent des appendices articulés comme quatre paires de pattes, des antennes, des chélicères et des pédipalpes [5]. Les tiques sont comprises dans la classe des Arachnides qui possèdent une respiration aérienne à l'aide de trachées. Cette classe comprend les acariens avec le sous-ordre des *Ixodida*, appelées communément les tiques. Les *Ixodida* reprennent un nombre de 900 espèces de tiques dont environ 700 espèces sont qualifiées de tiques « dures » de la famille des *Ixodidae* et les 200 restantes sont des tiques « molles » de la famille des *Argasidae* [4]. Les tiques molles possèdent un tégument mou, tandis que les tiques dures vont avoir un exosquelette chitinisé mais extensible pouvant se gorger de sang [5]. Parmi les *Ixodidae*, le genre *Ixodes* regroupe à lui seul 243 espèces de tiques, qui sont réparties sur l'ensemble des continents. Ce

genre reprend l'espèce *Ixodes ricinus* qui est l'espèce de tiques la plus fréquemment rencontrée en Europe [4] (Figure 1).



Figure 1 : *Ixodes ricinus* [6]

Les tiques sont des arthropodes triphasiques, c'est-à-dire qu'ils passent par trois stades de métamorphoses afin de devenir des tiques adultes, mâles ou femelles. Ces stades sont les suivants : larves, nymphes et tiques adultes. Les larves sont plus petites et ne possèdent que trois paires de pattes (Hexapode) contrairement aux nymphes et aux adultes qui en ont quatre (Octopode) [4, 5]. De plus, les nymphes se distinguent des adultes femelles par l'absence d'un pore génitale [4] (Figure 2).



Figure 2 : Différents stades de métamorphoses des tiques [7]

Durant leur cycle de développement, il y a deux phases prédominantes dans le comportement des tiques. La première, appelée la phase « libre », prend en compte les moments de métamorphoses au stade supérieur, de ponte des œufs et de leur incubation. La deuxième, appelée la phase « parasitaire », comprend les moments où les tiques sont fixées à un hôte et se nourrissent de son sang [4].

La durée de leur cycle est assez variable. Elle dépendra de la durée de recherche d'un hôte propice, qui peut être plus ou moins longue en fonction du lieu où se trouve la tique, mais aussi de la durée des diapauses et donc de l'arrêt de son développement qui maintient son métabolisme à un niveau minimal. Quand les conditions sont défavorables, la tique ralentit son métabolisme et entre en diapause [4]. En moyenne, son cycle de vie dure de deux à trois ans dans la nature [8].

Ce cycle se déroule comme suit : les tiques femelles pondent leurs œufs au printemps. Ceux-ci éclosent et sont au stade de larves en été. Les larves vont se placer sur une végétation basse, à l'affût d'un petit mammifère ou d'un oiseau pour leur premier repas de sang, qui durera de trois à cinq jours. Ces petits mammifères sont généralement des rongeurs. Après leur premier repas, les larves se détachent de leur hôte et commencent leur métamorphose en nymphes pendant l'automne et l'hiver. Durant ces deux saisons, des périodes de diapauses sont présentes. Une fois les conditions environnementales plus propices, les nymphes reviennent ensuite sur la végétation pour trouver un nouvel hôte comme un mammifère de taille moyenne (renards, belettes, rongeurs, Hommes...), un oiseau ou un reptile (selon l'espèce des tiques). Les nymphes quittent leur hôte pour se transformer en tiques adultes, mâles ou femelles. Par la suite, les adultes vont trouver un nouvel hôte bien plus grand comme les ongulés (chevreuils, cerfs...) ou les Hommes afin de se préparer à la fécondation et de se nourrir. En effet, la reproduction des tiques se déroule sur les grands hôtes. Les femelles, après la fécondation, se nourrissent pendant six à huit jours du sang de l'hôte tandis que les mâles, eux, se laissent tomber et meurent. De fait, les mâles de l'espèce *Ixodes ricinus* ne se gorgent pas de sang. Pour finir, les femelles gorgées de sang se détachent de l'hôte et pondent entre 2000 à 3000 œufs dans un environnement adéquat, humide et chaud. Cette période de ponte peut durer de 5 à 20 jours. Une fois que les œufs sont prêts, ils vont éclore pour donner des larves. Chaque phase de métamorphose dure environ un mois [4, 9] (Figure 3).

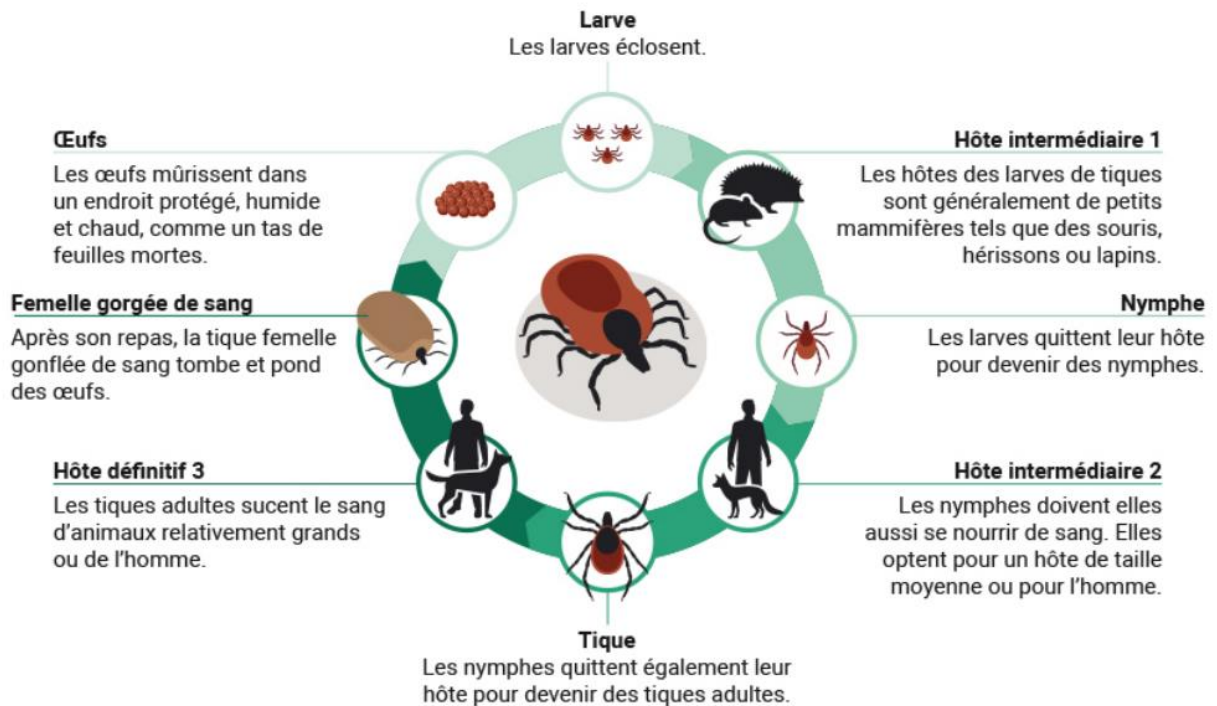


Figure 3 : Phases de développement des tiques [10]

Les tiques possèdent une période d'activité différente en fonction de leur stade de développement. Les nymphes sont principalement actives au printemps et au début de l'été tandis que pour les adultes, on les retrouvera plutôt au printemps et en automne. En général, les humains seront surtout mordus par les nymphes. Comme le montre la figure 4, les piqûres des tiques apparaissent en mars jusqu'en octobre avec un pic dans le mois de juin. Cependant, cette période peut s'allonger si les conditions sont favorables pour les tiques [4]. Celles-ci prennent en compte des températures supérieures à 6°C (en dessous, les tiques resteront en diapause) et avec un taux d'humidité élevé de 80 % pour éviter la dessiccation et donc la perte d'eau chez ces acariens. On les retrouvera dans les milieux ouverts et semi-ouverts comme les forêts et les prairies, à même le sol ou dans la végétation basse pour les larves et les nymphes, et une végétation plus haute pour les adultes. Elles vont préférer des lieux possédant une litière épaisse et une bonne densité de végétation permettant au sol de rester humide même en période sèche [4, 11].

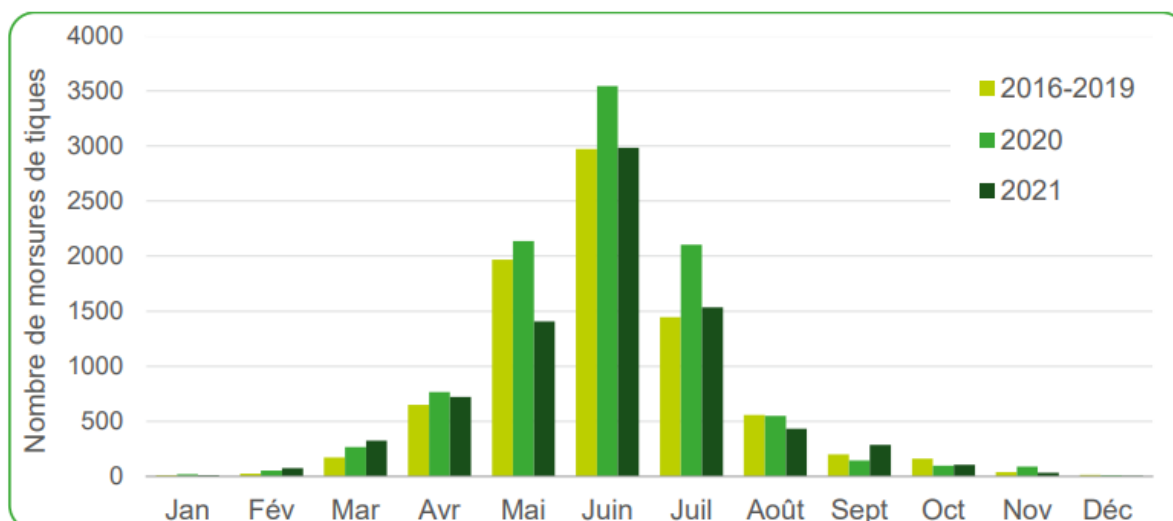


Figure 4 : Nombre de morsures de tiques en fonction des mois de 2016 à 2021 [1]

La tique *Ixodes ricinus* mesure en moyenne de 1 à 3 mm. Une fois gorgées de sang, les tiques peuvent atteindre jusqu'à dix fois leur taille à jeun [4]. Chez les femelles, le poids à jeun va de 20-80 mg et peut aller jusqu'à 450 mg après gorgement de sang [12].

Les tiques possèdent un rostre composé de deux palpes chélicères et d'un hypostome, le tout porté par le Capitulum positionné au-devant de la tête, qui permettra la pénétration à travers les tissus de l'hôte. Elles possèdent aussi deux glandes salivaires qui vont jouer un rôle important dans la transmission de la bactérie responsable de la maladie de Lyme, expliqué plus en détail dans la partie « La maladie de Lyme » [4]. Pour finir, elles sont pourvues d'organes sensoriels permettant la recherche d'un hôte potentiel, d'un partenaire sexuel ou encore pour analyser les conditions climatiques. Parmi ces organes sensoriels, nous avons les soies présentes sur l'ensemble du corps, les yeux (pas chez toutes les espèces) et l'organe de Haller. Cet organe, situé à l'extrémité de la première paire de pattes, est sensible à la température et à l'humidité de l'air avoisinant mais aussi à la présence des hôtes car il captera les phéromones émises par l'hôte cible ainsi que ses émissions de CO₂ et de chaleur. Cet organe lui permet d'ajuster son cycle de développement au moment propice [4] (Figure 5). Les mâles et femelles sont différents morphologiquement. En effet, la femelle, en buvant du sang, gonflera, au contraire du mâle qui possède une structure rigide sur la face dorsale de son idiosome, appelé le scutum [2].

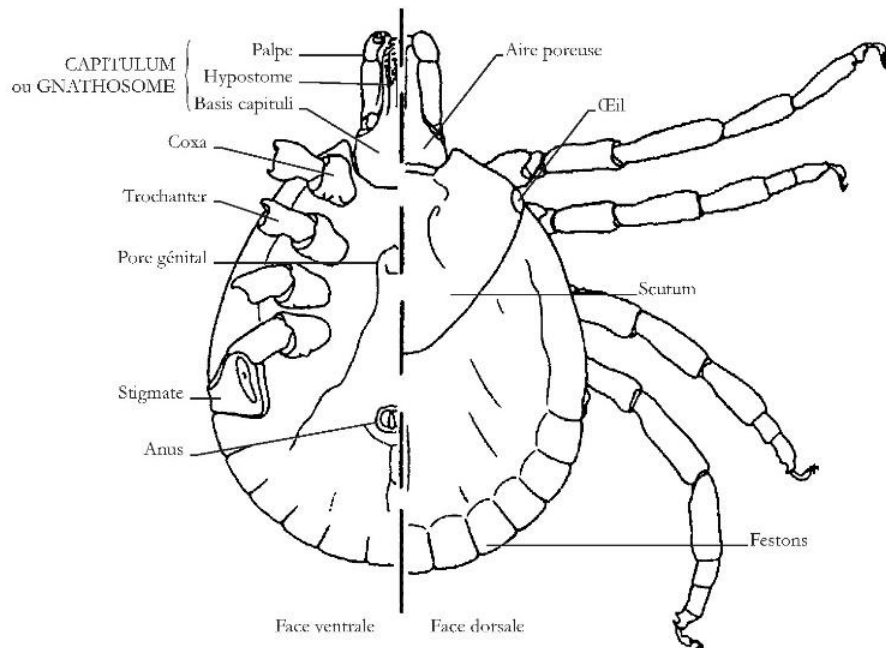


Figure 5 : Anatomie d'une tique [4]

1.3 La maladie de Lyme

La maladie de Lyme, aussi appelée la borréliose de Lyme, est une maladie vectorielle transmise par les tiques du genre *Ixodes*. Cette maladie est présente dans l'ensemble de l'hémisphère nord (des cas ont été avérés en Amérique du Nord, en Asie et en Europe) [4]. Cependant, quelques cas ont aussi été recensés en Australie et en Amérique du Sud [13, 14]. Cette répartition plus large de la maladie serait due aux oiseaux migrateurs qui entraîneraient des tiques infectées dans des pays plus lointains [15].

Les principales espèces du genre *Ixodes* étant responsables de la transmission de cette maladie sont *I. scapularis* et *I. pacificus* en Amérique du Nord, et *I. ricinus* et *I. persulcatus* en Europe et en Asie [4]. Les bactéries de la maladie de Lyme font partie du groupe de *Borrelia burgdorferi* sensu lato (s.l.) dont 20 espèces ont déjà été identifiées à ce jour. Ici, je ne vais mentionner que les neuf bactéries transmises en Europe et en partie par notre espèce de tiques d'intérêt, *Ixodes ricinus*. Parmi celles-ci, on peut retrouver *B. bissettii*, *B. finlandensis*, *B. lusitaniae*, *B. valaisiana* mais surtout *B. burgdorferi* sensu stricto (s.s.), *B. garinii*, *B. afzelii*, *B. spielmanii* et *B. bavariensis* qui sont pathogéniques pour les humains [4, 9].

Les symptômes de la maladie de Lyme sont décrits en trois stades. Le premier, intervenant généralement entre trois jours et trois mois après la piqûre de la tique, comprend un érythème migrant (Figure 6). Ce signe clinique correspond à une tache rouge s'agrandissant à partir de la piqûre. Cependant, on peut être infecté par la maladie sans avoir ce symptôme car l'érythème

n'est observé que chez 75 % des cas d'infection. D'autres symptômes peuvent aussi témoigner de la présence de l'infection comme la fatigue, des douleurs musculaires, des maux de tête et de la fièvre [17, 18, 19].



Figure 6 : Érythème migrant [16]

Une personne infectée peut atteindre le deuxième stade qui correspond à la dissémination de la bactérie dans tout le corps humain. Celui-ci prend place plusieurs semaines à plusieurs mois après la piqûre et est plus contraignant que le premier. En effet, des problèmes neurologiques comme une paralysie faciale, des atteintes aux articulations comme de l'arthrite, ainsi qu'une vision double peuvent apparaître. Dans certains cas, mais de manière beaucoup plus rare, il peut y avoir des atteintes au rythme cardiaque. Le troisième stade arrive des mois voire des années après la piqûre. Elle se déclare par des atteintes articulaires comme des douleurs et des gonflements des articulations, des lésions tardives de la peau et des troubles neurologiques chroniques [17, 18, 19].

Avec cette maladie, on doit donc être vigilant sur le long terme. En effet, les premiers symptômes ne sont pas à prendre à la légère et peuvent nous permettre de traiter l'infection avant qu'elle n'empire.

En Belgique, seulement trois espèces de bactéries de la famille de *Borrelia burgdorferi* s.l. et réalisant l'infection de la maladie de Lyme ont été identifiées : *B. afzelii*, *B. garinii* et *B. burgdorferi* s.s. [17, 18, 19]. Ces trois bactéries causent la borréliose de Lyme mais avec des symptômes principaux différents. La bactérie *B. afzelii* provoque principalement des manifestations cutanées, *B. garinii* des problèmes neurologiques et *B. burgdorferi* s.s. causera des soucis articulaires comme de l'arthrite [17, 18].

Ces bactéries sont présentes dans les hôtes dits « réservoirs » tels que les oiseaux et les rongeurs. Ces hôtes sont considérés comme compétents car ils peuvent transmettre l'agent pathogène aux tiques. En effet, les tiques, en plus d'être considérées comme des réservoirs de *Borrelia*, sont les uniques vecteurs des bactéries responsables de la maladie de Lyme [9]. Les hôtes sont différents en fonction de la bactérie : *B. garinii* se trouve principalement chez les oiseaux, *B. afzelii* chez les rongeurs et *B. burgdorferi* s.s. se retrouve chez les deux [9, 20].

Quand les larves se nourrissent de leur premier hôte, porteur de la bactérie, elles peuvent en devenir porteuses aussi : c'est la transmission systémique. Cependant, ces hôtes ne sont pas automatiquement porteurs de la maladie. Cela peut être quantifié par la prévalence de la bactérie chez cette espèce hôte, c'est-à-dire le pourcentage d'individus de cette même espèce portant la maladie à un instant donné. À la suite des métamorphoses, les nymphes et les tiques adultes seront aussi infectées. La bactérie se retrouvera dans les intestins du vecteur. Une fois que la tique s'accrochera à un nouvel hôte, la bactérie remontera jusqu'aux glandes salivaires afin de rentrer dans le sang de l'hôte. Les tiques transmettent alors les bactéries à des hôtes plus grands comme le renard ou encore les ongulés (chevreuil, cerf...) qui sont considérés comme non compétents et ne vont pas contracter de symptômes de cette maladie. Les Hommes, eux, sont des hôtes accidentels. En effet, les milieux forestiers ne font normalement pas partie de la niche écologique de l'espèce humaine, contrairement aux tiques. Celles-ci sont des hôtes opportunistes qui ne recherchent pas d'espèces d'hôte en particulier [4] (Figure 7). En plus de la transmission systémique, les tiques peuvent aussi s'auto-infecter. La bactérie *Borrelia* se transmet entre les nymphes infectées et les larves non infectées si elles se nourrissent à proximité l'une de l'autre sur l'hôte. Cette transmission sera favorisée par la présence de cluster de tiques sur un même vertébré [9].

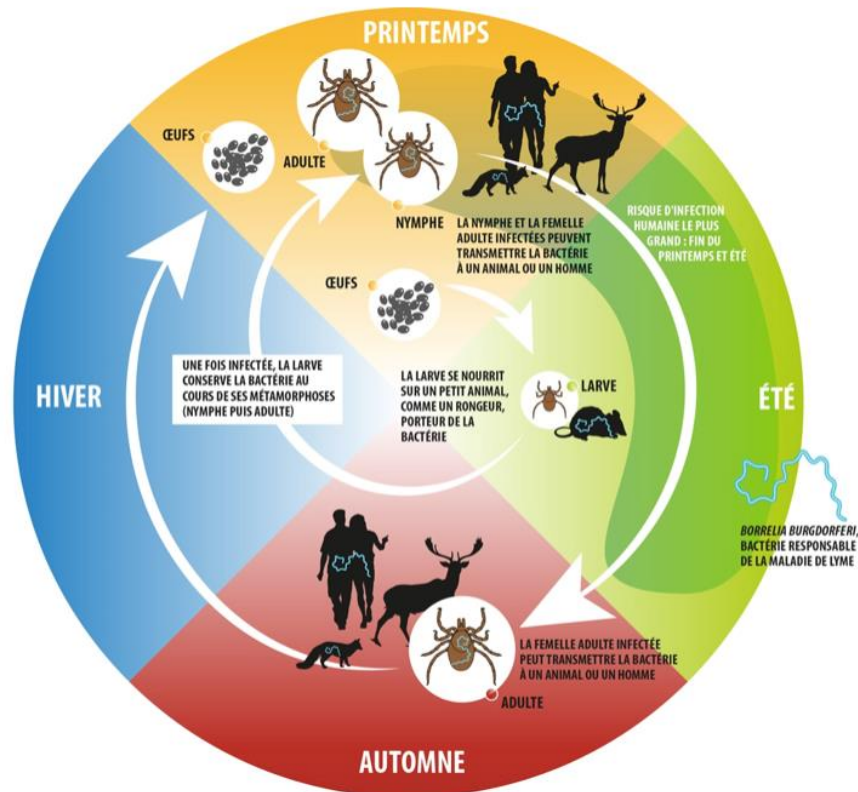


Figure 7 : Cycle de transmission de la bactérie *Borrelia burgdorferi sensu lato* [21]

1.4 Le Tamia de Sibérie (*Tamias sibiricus*)

Les hôtes réservoirs de la bactérie *Borrelia burgdorferi* s.l. sont principalement chez les oiseaux ou dans le groupe des rongeurs. Dans la Forêt de Soignes à Bruxelles, on retrouve 14 espèces de rongeurs telles que le Mulot sylvestre (*Apodemus sylvaticus*), le Campagnol roussâtre (*Myodes glareolus*), l'Écureuil roux (*Sciurus vulgaris*) et l'espèce invasive Tamia de Sibérie (*Tamias sibiricus*) [2]. Dans le cadre de cette étude, je me suis intéressée au cas d'une espèce invasive et de son influence sur l'abondance des tiques ainsi que sa prévalence.

Le Tamia de Sibérie (*Tamias Sibiricus Laxmann 1769*) (Figure 8), aussi appelé l'Écureuil de Corée, fait partie de la famille des *Sciuridae*. Ce petit rongeur est originaire de la Taïga allant de la mer Blanche jusqu'à la mer d'Okhotsk en Russie, la Sibérie, la région de la Mandchourie, le nord de la Mongolie, la Chine centrale et orientale, la Corée et l'île d'Hokkaido au Japon.

Cependant, cette espèce a été introduite à partir des années 1970 dans six pays européens : la France, la Belgique, l'Allemagne, l'Italie, les Pays-Bas et la Suisse [3, 23, 24, 25, 26].



Figure 8 : *Tamias de Sibérie (Tamias sibiricus)* [22]

Actuellement, trois populations de *Tamias* de Sibérie se sont développées en Belgique. La première se situe dans la Forêt de Calmeyn à La Panne, la deuxième dans la Forêt de Bijltjes près de Westerlo et la troisième dans la Forêt de Soignes à Bruxelles [23, 24, 27].

L'introduction des tamias a commencé en 1960 en Belgique, mais cette espèce s'est retrouvée en liberté dans la nature, soit car leurs propriétaires l'avaient intentionnellement relâchée, soit car elle s'était échappée de captivité [23, 27, 28, 29]. Le tamia a été observé pour la première fois dans la forêt bruxelloise en 1974 à côté des étangs des Enfants Noyés (*Vijvers van de Verdrongen Kinderen*) à Watermael-Boitsfort. Trois ans plus tard, un nouvel individu a été aperçu à 1 km de la première observation, dans la vallée de Vuylbeek et deux autres à Groenendael, dans la partie flamande de la forêt. Ce nombre a continué d'augmenter aux cours des années jusqu'à atteindre 1138 spécimens en 1989 [3, 30]. Van den Broeke (1999) a réalisé un nouvel échantillonnage des tamias en 1998 et en a observé un total de 1797 dans la Forêt de Soignes [30]. Une analyse plus complète de l'évolution et la dynamique des populations du *Tamias* de Sibérie au sein de la Forêt de Soignes sera considérée dans la suite de ce travail.

Le tamia est un petit rongeur rayé d'une taille adulte allant de 13 à 15 cm et pesant environ 100 g. Il possède un pelage brun/ocre/beige/roux avec cinq bandes noires dans le dos. Le sexe des tamias n'est pas différenciable car il n'y a pas de dimorphisme sexuel chez cette espèce [3, 23, 24, 26, 31]. Sa longévité varie entre deux à six ans dans la nature [23, 24, 25] et ils peuvent survivre à des conditions allant de -65°C (principalement dans son aire d'origine en

Russie et Asie) jusqu'à des maximas de 30°C. Quand les températures deviennent trop froides dans les conditions européennes, les tamias vont entrer en hibernation, ce qui durera entre deux à quatre mois. Quand les températures sont trop chaudes, ils vont ralentir leur activité, et donc leur métabolisme, en restant dans leur terrier [26]. À Bruxelles, on retrouve les tamias principalement dans des forêts périurbaines comme des forêts de conifères, de feuillus et des forêts mixtes ainsi que des parcs urbains [3, 23].

Les tamias sont des animaux omnivores : ils se nourrissent principalement de glands et de graines en automne et au printemps, et de baies, fruits secs, fleurs et insectes en été. L'hiver, ils hibernent et se nourrissent de leur réserve dans le terrier [3, 25, 26]. C'est un animal solitaire et diurne qui se déplace principalement au sol mais pouvant aussi se retrouver dans les arbres comme les écureuils [23, 25, 26]. Cette espèce reste dans les alentours de son terrier et est fidèle à son domaine vital bien que les tamias en changent régulièrement [23]. La majorité de ces rongeurs ne se dispersent pas, certains vont se disperser sur de courtes distances mais seulement quelques individus le feront sur de longues distances (le maxima relevé sur le terrain en France était de quelques centaines de mètres). Les juvéniles mâles vont se disperser en moyenne sur de plus grandes distances que les femelles [24, 32].

Les tamias sont des rongeurs polygames, c'est-à-dire que plusieurs mâles vont féconder une femelle. En effet, comme le domaine vital des mâles est plus grand que celui des femelles, il est normal qu'un mâle puisse se trouver sur le domaine de plusieurs femelles en même temps [23, 24, 25]. Les femelles peuvent produire deux cohortes de jeunes par an [23]. La maturité sexuelle est atteinte après 8 à 14 mois et la gestation dure en moyenne 31 jours [24, 26]. Les accouplements se déroulant en février-mars vont donner naissance à une première cohorte en avril-mai et ceux qui se déroulent en juin vont donner la deuxième en juillet-août [23, 25]. Cependant, en cas de ressources rares pour les tamias, seule la deuxième sera produite [24]. En général, chacune comporte entre trois et cinq jeunes [25]. Les petits restent dans le terrier pendant six à huit semaines avant d'émerger en juin pour la première cohorte et en septembre pour la deuxième [24, 26].

Le tamia est en compétition avec le Campagnol roussâtre et le Mulot sylvestre car ce sont des rongeurs habitant dans la même niche écologique. Cependant, et contrairement à ce que l'on pense, le tamia n'est pas en compétition avec l'Écureuil roux étant donné que les écureuils vivent majoritairement dans les arbres et les tamias sur le sol [23, 24]. Les principaux prédateurs des petits rongeurs de Corée en Forêt de Soignes sont des animaux diurnes comme le Chat (*Felis silvestris*), la Buse variable (*Buteo buteo*), l'Épervier d'Europe (*Accipiter nisus*) et les

mustélidés comme le Martre des pins (*Martes martes*), l'Hermine (*Mustela erminea*) et la Belette d'Europe (*Mustela nivalis*) [3, 23, 24, 26]. Le Renard roux (*Vulpes vulpes*) est un prédateur limité car, étant un chasseur nocturne, il ne peut chasser les tamias qu'au lever ou coucher de soleil [30].

Ce rongeur est considéré comme envahissant dans nos forêts. En effet, c'est une espèce généraliste et flexible pouvant s'adapter à son environnement. Il est omnivore et peut donc se nourrir de nombreux aliments différents. De plus, il a un potentiel de reproduction élevé, une croissance rapide ainsi qu'une bonne longévité [23, 26]. Cependant, il possède aussi une faible capacité de dispersion de la part des juvéniles, une sédentarité des adultes et une maturité sexuelle tardive qui ne sont pas des caractéristiques propices à l'établissement d'une espèce dans un nouvel environnement [25, 26]. En Belgique, comme le Tamia de Sibérie est considéré comme une espèce envahissante, il n'est pas soumis à une gestion permettant sa conservation ou son élimination. En effet, très peu d'études sur l'impact du tamia dans nos forêts ont été réalisées. En ce moment, on n'a aucune certitude sur un éventuel impact négatif ou non de ceux-ci sur la faune et la flore des forêts périurbaines [27]. Le seul impact pouvant retenir notre attention est celui sur la santé publique. En effet, les tamias sont considérés comme des réservoirs de *Borrelia burgdorferi* s.l car ils hébergent dans leur sang trois de ses génoespèces : *B. burgdorferi* s.s, la *B. afzelii* et *B. garinii* [29].

Il est reconnu que l'introduction d'une nouvelle espèce dans un nouvel environnement va venir modifier la dynamique d'une maladie et, dans notre cas, la maladie de Lyme. Dans son étude sur les tamias et tiques en Forêt de Sénart en France, Marsot a obtenu des résultats indiquant que les tamias infectent huit fois plus de tiques que le Mulot sylvestre et le Campagnol roussâtre. Cette plus grande contribution à l'infection des tiques provient de sa grande taille, de sa plus longue longévité et de son taux de prévalence aux bactéries plus élevé. De plus, contrairement aux écureuils, les tamias se déplacent plus fréquemment sur le sol et donc dans la végétation basse, lieux où les tiques attendent le passage d'un hôte [28, 33, 34]. L'abondance des tiques présentes sur les tamias est aussi liée au sexe. En effet, les mâles ont tendance à être parasités par plus de tiques que les femelles. La raison n'est pas leur taille, car pour rappel, les tamias n'ont pas de dimorphisme sexuel, mais plutôt par la différence dans leur comportement. Les mâles vont davantage bouger que les femelles étant donné que leur domaine vital est plus grand [33]. Les tamias vont donc augmenter les risques de transmission de la maladie de Lyme car ils vont avoir tendance à être parasités par un plus grand nombre de tiques, mais aussi car ils sont infestés par plus de génoespèces que les autres rongeurs indigènes en France. En effet, les

tamias vont produire plus de nymphes infectées par la bactérie *B. burgdorferi* s.s., *B. afzelii* et *B. garinii* que les autres rongeurs qui n'infecteront qu'avec la bactérie *B. afzelii* [28, 29, 33, 34]. Dans des études réalisées par Vourc'h en 2007, Pisanu en 2014 et Marsot en 2011, la prévalence des tamias testés portant l'ADN des bactéries du genre *Borrelia burgdorferi* s.l. était de 33 % tandis que celle des écureuils roux variait entre 18 % et 29 %, et celle des campagnols était de 16 % en Europe [34, 35, 36].

1.5 Les interactions entre les facteurs

La transmission de *Borrelia* à l'humain fait appel à un système multifactoriel complexe. En effet, différents facteurs entrent en compte dans la dynamique de cette maladie, que ce soit positivement ou négativement. Pour commencer, les conditions environnementales ont un impact direct tout au long du cycle de vie des tiques et principalement lors de leur phase « libre ». Comme expliqué précédemment, les tiques se développent dans des conditions spécifiques (au-dessus de 6°C et 80 % d'humidité relative en moyenne). Donc, s'il y a une augmentation de la température ainsi qu'une diminution du taux de précipitations à la suite du réchauffement climatique dans nos régions, la survie et l'activité des tiques risquent de se dégrader [9, 11, 37]. De plus, les facteurs environnementaux ont aussi un impact indirect sur les tiques et donc sur la maladie, avec la modification des conditions de vie des hôtes ainsi que de la végétation présente dans nos forêts [9, 11]. Les tiques vivent préférentiellement dans des forêts de hêtres ou de chênes mais si les conditions climatiques changent, la végétation aussi. Cela amènera à des groupements forestiers plus xérophiles/sec ou, inversement, à des groupements hygrophiles/humide qui réduiront la densité de tiques [2, 38].

L'introduction de nouvelles espèces dans un milieu naturel où des tiques sont présentes peut avoir un impact sur la prévalence à la bactérie chez ces dernières, décrit selon deux grands effets dans plusieurs études. Premièrement, l'effet de « dilution » survient quand l'introduction d'hôtes non compétents va venir diluer le taux d'infection de la bactérie. Dans ce cas-ci, les tiques vont avoir un plus grand choix d'hôtes avec moins d'espèces compétentes, ce qui réduira le taux d'infection des tiques et donc la transmission de la maladie aux Hommes. Inversement, l'effet « d'accumulation » se produit lors de l'introduction d'une espèce compétente. Il y aura donc plus d'hôtes porteurs de la bactérie et la prévalence chez les tiques augmentera naturellement. En résumé, l'augmentation de la diversité de la faune dans un milieu naturel diminuera les risques de transmission de la maladie (effet de dilution), sauf si on introduit des espèces compétentes (effet d'accumulation) [9, 37, 39, 40]. Dans le cas de la Forêt de Soignes,

le *Tamias* de Sibérie est une espèce exotique et un hôte compétent de la bactérie. On pourrait s'attendre à avoir un effet d'accumulation et donc un plus grand risque de transmission de la maladie. Cependant, ce n'est pas toujours aussi simple dans la nature [9]. En effet, les fluctuations dans les communautés d'hôtes, que ce soit par la compétition ou les conditions environnementales, vont venir impacter la transmission de la bactérie. Pourtant, quand plusieurs hôtes compétents sont présents au même endroit, chaque espèce va pouvoir contribuer à un effet de « secours » qui consiste en la maintenance de la maladie à une prévalence constante chez les tiques malgré les fluctuations dans les populations des hôtes [39, 40].

Par exemple, Julie Dutraive a mis en évidence qu'il y avait une association positive entre la densité de tiques et celle des chevreuils. Si la densité de ces hôtes augmentait, alors il y avait une augmentation de la densité de tiques et inversement. Cette association est logique car, même si les chevreuils ne sont pas des hôtes compétents à la maladie, ils sont importants pour le cycle de vie des tiques en intervenant dans la reproduction mais aussi dans leur expansion vers des zones plus lointaines. Ce déplacement des hôtes, et donc des tiques, mènera à la propagation sur de longues distances de la bactérie [41]. Cependant, les relations vecteurs-hôtes-bactérie peuvent être complexes. En effet, Cagnacci et Bolzoni ont démontré dans leurs études que la hausse de la densité de chevreuil augmentait dans un premier temps, le nombre de tiques jusqu'à atteindre un seuil. Par la suite, un nombre plus important de chevreuils aura tendance à « divertir » les tiques dans leur recherche d'hôtes ce qui amènerait à un effet de dilution dans la transmission de la bactérie. Effectivement, s'il y a trop de chevreuils, moins de tiques vont se nourrir sur les rongeurs et devenir porteur de la bactérie. De plus, il risque d'y avoir une compétition de territoire entre ces rongeurs et les chevreuils à la suite d'une dégradation de la végétation par le grand nombre de cervidés [42, 43].

Pour finir, les humains peuvent contracter différents symptômes à la suite d'une piqûre de tiques mais ils vont aussi avoir un impact sur cette transmission des *Borrelia*. Par exemple, l'Homme, à la suite de son activité et de sa présence, va perturber les écosystèmes en les polluant, les fragmentant ou en introduisant des espèces exotiques qui peuvent être des hôtes compétents de la bactérie [37]. De plus, certains métiers comme gardes forestiers ou agriculteurs exposent les travailleurs de façon intense aux piqûres de tiques [37, 38].

2 Matériels et méthodes

2.1 Objectif du mémoire

Le premier objectif de ce mémoire sera de réaliser une analyse spatiale et temporelle de la distribution du Tamia de Sibérie (*Tamias sibiricus*) dans la Forêt de Soignes en Région Bruxelles-Capitale. Le deuxième sera de comprendre l'influence de la présence de ce rongeur sur le nombre de tiques récoltées au sein de la forêt, ainsi que sur le nombre de tiques infectées par la bactérie *Borrelia burgdorferi* s.l et ses génoespèces. Je parlerai principalement de *B. afzelii* car elle est principalement transportée par les rongeurs. De plus, le Chevreuil (*Capreolus capreolus*) va aussi être pris en compte afin d'analyser l'interaction entre ces deux hôtes sur l'abondance et l'infection des tiques. Par la même occasion, cette étude également va mettre en évidence les différents types de végétation propices au cycle de vie des tiques mais aussi permettra d'amener des informations concernant l'écologie spatiale de ceux-ci à Bruxelles. En effet, ce mémoire est réalisé en association avec une autre étudiante, Clémence Salembier, qui s'intéresse à la différence de végétation et de leur influence sur les tiques. Les relevés de terrain, afin d'acquérir les données de densité des tiques et du nombre de tiques infectées en forêt, ont été réalisés conjointement avec Clémence, tandis que les analyses se sont faites individuellement afin de répondre à nos questions de recherche respectives.

Ce mémoire a été réalisé en collaboration avec l'administration de Bruxelles-Environnement et les gardes forestiers de la Forêt de Soignes dans le but de leur proposer une étude avec des données concrètes sur les tiques, permettant de sensibiliser les habitants sur le danger que peut représenter la bactérie *Borrelia burgdorferi* s.l, surtout quand on n'y fait pas attention.

2.2 Questions

2.2.1 La distribution et répartition du Tamia de Sibérie

Question 1 : Comment la distribution du Tamia de Sibérie dans la Forêt de Soignes a-t-elle évolué au cours du temps depuis leur introduction en 1974 à côté des étangs des Enfants Noyés ?

2.2.2 L'abondance de tiques

2.2.2.1 Les Hôtes

Question 2 : La présence du Tamia de Sibérie (*Tamias sibiricus*), une espèce invasive en Europe, exerce-t-elle une influence sur le nombre de tiques (nymphes et larves) dans la Forêt de Soignes à Bruxelles ?

Hypothèse 0 : Il n'y a pas de différence dans le nombre de tiques récoltées entre les sites avec et sans Tamia.

Hypothèse 1 : Les sites avec Tamia comportent moins de tiques que les sites ne comportant pas de Tamia.

Hypothèse 2 : Les sites avec Tamia comportent plus de tiques que les sites ne comportant pas de Tamia.

Question 3 : La présence d'hôtes, le Tamia de Sibérie (*Tamias sibiricus*) et le Chevreuil (*Capreolus capreolus*), exerce-t-elle une influence sur le nombre de tiques (nymphes et larves) dans la Forêt de Soignes à Bruxelles ?

Hypothèse 0 : Il n'y a pas de différence de nombre de tiques récoltées entre les sites avec Tamia et sans Tamia, entre les sites avec Chevreuil et sans Chevreuil ainsi qu'entre leur interaction.

Hypothèse 1 : Les sites avec Tamia comportent moins de tiques que les sites ne comportant pas de Tamia, de même pour les sites avec Chevreuil et sans Chevreuil.

Hypothèse 2 : Les sites avec Tamia comportent plus de tiques que les sites ne comportant pas de Tamia, de même pour les sites avec Chevreuil et sans Chevreuil.

Hypothèse 3 : Les sites comportant à la fois des Tamia et des Chevreuil comportent plus de tiques que les sites sans hôtes potentiels.

Hypothèse 4 : Les sites comportant à la fois des Tamia et des Chevreuil comportent moins de tiques que les sites sans hôtes potentiels.

2.2.2.2 Le milieu végétatif en association avec les hôtes

Question 4 : Le milieu végétatif arborescent (essence et peuplement) et la présence d'hôtes exercent-ils une influence sur le nombre de tiques (nymphes et larves) dans la Forêt de Soignes à Bruxelles ?

Hypothèse 0 : Il n'y a pas de différence de nombre de tiques récoltées entre les différents types de végétation arborescente, la présence des hôtes ainsi que leur interaction.

Hypothèse 1 : Il y a une différence significative dans le nombre de tiques récoltées entre les différents types de végétation arborescente.

Hypothèse 2 : Il y a une différence significative dans le nombre de tiques récoltées entre les sites avec et sans hôtes.

Hypothèse 3 : Il y a une différence significative dans le nombre de tiques récoltées en fonction de l'interaction entre le type de végétation arborescente et la présence des hôtes.

Question 5 : Le milieu végétatif herbacé et arbustif (le sous-bois) et la présence d'hôtes exercent-ils une influence sur le nombre de tiques (nymphes et larves) dans la Forêt de Soignes à Bruxelles ?

Hypothèse 0 : Il n'y a pas de différence de nombre de tiques récoltées entre les différents types de sous-bois, la présence des hôtes ainsi que leur interaction.

Hypothèse 1 : Il y a une différence significative dans le nombre de tiques récoltées entre les différents types de sous-bois.

Hypothèse 2 : Il y a une différence significative dans le nombre de tiques récoltées entre les sites avec et sans hôtes.

Hypothèse 3 : Il y a une différence significative dans le nombre de tiques récoltées en fonction de l'interaction entre le type de sous-bois et la présence des hôtes.

2.2.3 L'abondance des tiques infectées par la bactérie *Borrelia burgdorferi* sensu lato.

Question 6 : La présence du Tamia de Sibérie (*Tamias sibiricus*) et du chevreuil (*Capreolus Capreolus*) exerce-t-elle une influence sur le nombre de tiques infectées par la bactérie *Borrelia burgdorferi* s.l dans la Forêt de Soignes à Bruxelles ?

Hypothèse 0 : Il n'y a pas de différence dans le nombre de tiques infectées par *Borrelia* entre les sites avec Tamia et sans Tamia, ainsi que pour la présence du chevreuil.

Hypothèse 1 : Les sites avec Tamia comportent moins de tiques infectées par *Borrelia* que les sites ne comportant pas de Tamia, de même pour les sites avec chevreuils.

Hypothèse 2 : Les sites avec Tamia comportent plus de tiques infectées par *Borrelia* que les sites ne comportant pas de Tamia, de même pour les sites avec chevreuils.

Hypothèse 3 : Les sites comportant à la fois des Tamia et des Chevreuil comportent plus de

tiques infectées que les sites sans hôtes potentiels.

Hypothèse 4 : Les sites comportant à la fois des *Tamias* et des Chevreuil comportent moins de tiques infectées que les sites sans hôtes potentiels.

Question 7 : La présence du *Tamias* de Sibérie (*Tamias sibiricus*) exerce-t-elle une influence sur le nombre de tiques infectées par la bactérie *Borrelia Afzelii* dans la Forêt de Soignes à Bruxelles ?

Hypothèse 0 : Il n'y a pas de différence dans le nombre de tiques infectées par *B. Afzelii* entre les sites avec *Tamias* et sans *Tamias*.

Hypothèse 1 : Les sites avec *Tamias* comportent moins de tiques infectées par *B. Afzelii* que les sites ne comportant pas de *tamias*.

Hypothèse 2 : Les sites avec *Tamias* comportent plus de tiques infectées par *B. Afzelii* que les sites ne comportant pas de *tamias*.

2.3 Hypothèses

Au cours de ce mémoire et de mes analyses, je m'attends à récolter plus de tiques (nymphes et larves) dans les zones où le *Tamias* de Sibérie est présent et là où il a le plus d'hôtes en général. De fait, les tiques ont besoin des hôtes pour avancer dans leur cycle de développement. Ensuite, je m'attends à ce que le milieu végétatif, que ce soit l'essence des arbres ou le type de sous-bois, exerce une influence sur le nombre de tiques récoltées, de même pour l'interaction du milieu végétatif avec les hôtes. De plus, je m'attends à un nombre de tiques infectées par la bactérie *Borrelia burgdorferi* s.l plus important dans les zones avec des hôtes car c'est en se nourrissant sur ceux-ci que les tiques deviennent porteuses de la bactérie. Pour finir, je m'attends à un nombre de tiques infectées par *B. afzelii* plus important dans les sites avec des *tamias* car cette génoespèce est principalement transportée par les rongeurs.

2.4 Zone d'étude et sites de récolte

Pour répondre à ces questions, nous avons choisi de travailler sur la Forêt de Soignes et plus précisément, sur une zone de la partie bruxelloise de la forêt. Dans cette zone, nous avons choisi 18 sites au total, reprenant des sites avec différents types de sous-bois et la présence/absence de l'hôte d'intérêt, le *Tamias* de Sibérie. Pour ce faire, six types de sous-bois ont été choisis : Végétation en cours de régénération (A), Poacée (B), Ronce (C), Feuille morte (D), Herbe (E)

et Fougère (F) (Tableau 1). Le sous-bois en régénération est composé principalement de pousse du Frêne commun (*Fraxinus excelsior*), Érable sycomore (*Acer pseudoplatanus*) ou Hêtre commun (*Fagus sylvatica*) tandis que le sous-bois Poacée comprend la Grande Luzule (*Luzula sylvatica*). De plus, la présence ou absence du *Tamia* a été analysée grâce à des cartes et des observations en provenance de Waarnemingen.be, le site Web de Natuurpunt/Natagora et Stichting Natuurinformatie, ainsi que nos observations sur le terrain. Une analyse spatiale sur ce rongeur dans la zone d'étude est disponible dans la suite de ce mémoire, dans la rubrique « Analyse de la répartition du *Tamia* de Sibérie en Forêt de Soignes ».

Tableau 1 : Type de sous-bois choisi pour l'expérience

En régénération	Poacées	Ronces
		
Photo prise le 29 juin 2022 sur le site A1	Photo prise le 20 mai 2022 sur le site B3	Photo prise le 29 avril 2022 sur le site C2
Feuilles mortes	Herbe	Fougères
		
Photo prise le 29 avril 2022 sur le site D1	Photo prise le 19 juillet 2022 sur le site E3	Photo prise le 2 juin 2022 sur le site F1

La figure 9 représente la zone d'étude avec les différents sites de récoltes. Les lettres donnent l'information sur le type de sous-bois et le chiffre (ou la forme sur la carte) sur la présence ou non du *Tamias* de Sibérie. Pour chacun des six types de sous-bois, un site comporte des tamias et les deux autres sites n'en comportent pas. Un récapitulatif des caractéristiques des sites de récolte se retrouve dans le tableau 2.

Tableau 2 : Récapitulatif des caractéristiques des sites de récolte

SITES	Régénération	Poacée	Ronce	Feuille	Herbe	Fougère
Tamias	A1	B1	C1	D1	E1	F1
Sans Tamias	A2	B2	C2	D2	E2	F2
Tamias	A3	B3	C3	D3	E3	F3

Zone d'étude dans la Forêt de Soignes et les sites de récolte de tiques

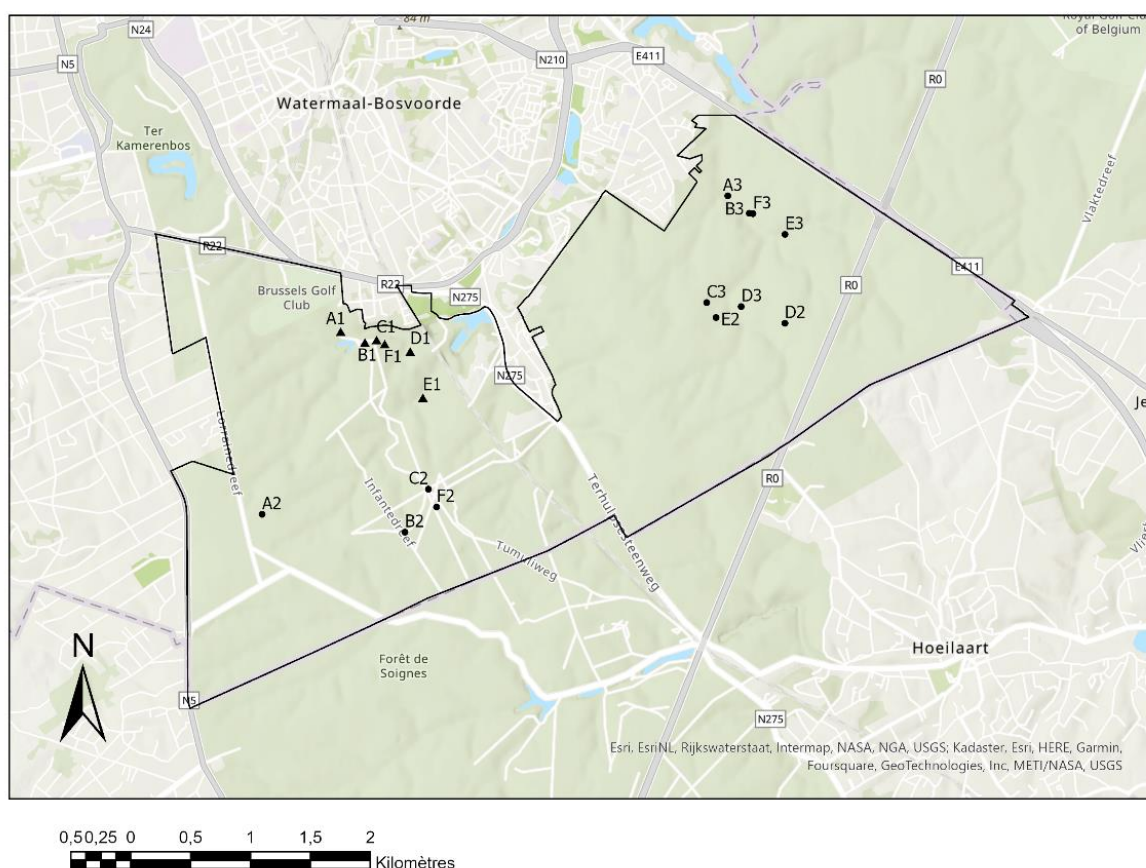


Figure 9 : Zone d'étude dans la Forêt de Soignes avec les sites de récolte des tiques (les formes triangles correspondent aux sites avec des tamias et rondes sans tamias)

2.5 Récolte des données

Sur les 19 semaines prévues pour l'expérience, les prélèvements sur le terrain se sont déroulés pendant deux jours toutes les deux semaines. Ceci fait un total de 9 récoltes de tiques pour chaque site et un nombre de 162 données de comptage dans le tableau final.

En plus du type de sous-bois et de la présence ou non du *Tamias* de Sibérie, les données prélevées sur le terrain pour chaque site sont les suivantes : le numéro du site, la date, l'heure du début et de fin de la récolte, la présence de chevreuils, la zone, la saison, la taille de sous-bois, la température, l'humidité, l'essence des arbres principaux, le type de peuplement forestier, le type de sol, le drainage, l'altitude, la distance du chemin, la couverture nuageuse et s'il s'agit d'une réserve naturelle ou non.

2.5.1 Les tiques

Pour récolter les tiques, nous avons utilisé la technique du « *flagging* » [44]. Cette technique consiste à faire glisser un drap de flanelle blanc d'une grandeur de 1 m² sur une distance de 10 m au sein de notre site d'intérêt (Figure 10). Les tiques, qui sont à l'affût d'une proie pour s'y nourrir, vont venir s'y accrocher. Cette opération est répétée six fois afin de récolter une grande proportion de la population de tiques présente sur le site. En effet, elles sont sensibles aux mouvements de la végétation et vont sortir se mettre à l'affût après quelques passages. Les tiques sont prélevées du drap de flanelle avec une pince et sont conservées dans des tubes d'éthanol. Toutes les semaines de récolte, les tiques ont été prélevées au même endroit dans le site, sauf si la végétation y était trop abîmée/aplatie. Dans ce cas-là, nous décalions notre zone de *flagging* de quelques mètres au sein du site.



Figure 10 : La technique du *flagging*

Comme les tiques sont sensibles à la température et à l'humidité, il était préférable de réaliser les prélèvements le matin à partir de 7 h car s'il faisait trop chaud, les tiques risquaient de ne pas sortir. Pour randomiser les prélèvements, nous avons changé l'ordre de passage de nos sites toutes les semaines afin de ne pas être contraintes par les conditions de chaleur et humidité.

En laboratoire, les tiques récoltées ont été analysées avec un microscope optique Leica L2 (Figure 11) afin de définir l'espèce et le stade du tique (larve, nymphe ou adulte).

Pour identifier les tiques infectées par la bactérie de la maladie de Lyme ainsi que ces génoespèces, nous avons collaboré avec le Professeur Erik Matthysen, Dieter Heylen, Käthe Robert et Jens Zarka de l'Université d'Anvers. Après avoir numéroté les micro-tubes PCR, nous avons y avons placé chaque nymphe et tique adulte séparément. Par la suite, les échantillons de tiques ont été envoyés à l'équipe du chercheur hollandais Hein Sprong du National Institute for Public Health and the Environment aux Pays-Bas (*Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu – RIVM*) afin d'identifier ceux qui sont infectées par la bactérie *Borrelia burgdorferi* sensu lato et ses génoespèces. Pour ce faire, l'ADN a été extrait des tiques par lyse alcaline avant de réaliser une PCR quantitative (qPCR) sur les fragments des gènes *OspA* et *flagelline FlaB*. Ces deux gènes vont permettre de détecter les génoespèces de la *Borrelia*. Avec les lysats positifs à la qPCR, les génoespèces ont été déterminé par amplification et séquençage basé sur la variable 5S-23S (rrfA-rrlB) de la région espaceur intergénique (IGS). Les séquences ADN ont été analysées en comparant avec des brins de références sur GenBank [45].



Figure 11 : Microscope optique Leica L2

2.5.2 Les données météorologiques

Les données météorologiques (température et humidité) ont été mesurées à l'aide de l'enregistreur Hobo (Figure 12), placé dans le jardin d'un garde forestier, Monsieur Willy Van de Velde, en bordure de forêt, près des étangs des Enfants Noyés. Les données ont pu être extraites et analysées avec le logiciel HOBOWare. Cependant, un problème est survenu lors de l'enregistrement de l'humidité, indiquant une humidité constante de 1 durant toute la période de l'enregistrement. Les données d'humidité présentes dans le tableau de données proviennent donc de la station météorologique de Uccle et ont été extraites du site météoiel.fr. [46].



Figure 12 : Enregistreur Hobo

La couverture nuageuse correspond au pourcentage de nuages lors de la récolte de tiques. Ce pourcentage est noté sous forme de gamme de valeur (0 %, 0-19 %, 20-39 %, 40-59 %, 60-79 %, 80-99 % et 100 %)

2.5.3 Les hôtes

Les données utilisées pour les hôtes sont des observations en provenance de Waarnemingen.be, le site Web de Natuurpunt/Natagora et Stichting Natuurinformatie. Ces données ne peuvent être reproduites sans autorisation. De plus, j'ai aussi utilisé trois articles sur le *Tamia* de Sibérie dans la Forêt de Soignes [3, 30, 47]. Ces données représentent le nombre d'observations rapportées du *Tamia* de Sibérie et du Chevreuil dans la zone d'étude et elles ont été traitées avec le logiciel d'analyse géographique *ArcGis Pro*.

Les cartes générées pour l'analyse de la distribution du *Tamia* de Sibérie vont contenir des tessellations de densité ainsi que des cartes d'emprise géométrique minimale (*Convex Hull*). D'une part, les tessellations ont été formées en réalisant un « *Spatial Join* » des points d'observation des espèces sur un quadrillage de 100 m et 500 m de côté. Celles-ci mettent en avant la présence et la densité d'une espèce au sein de la zone d'étude. D'autre part, les *Convex Hull* ont été formées selon la méthode de l'enveloppe convexe, qui permet de générer une forme englobant l'ensemble des points d'observations d'une espèce.

La figure 13 représente une tessellation avec le nombre de chevreuils observés dans la zone d'étude lors des 5 dernières années. Elle permet d'indiquer la présence de ce cervidé dans les sites de récoltes. On retrouve donc des chevreuils dans les sites A1, B1, C2, D1 et E1, dont une grande partie comprennent aussi des tamias.

Tessellation de la répartition du Chevreuil (*Capreolus capreolus*) les 5 dernières années (2017-2022) dans la zone d'étude

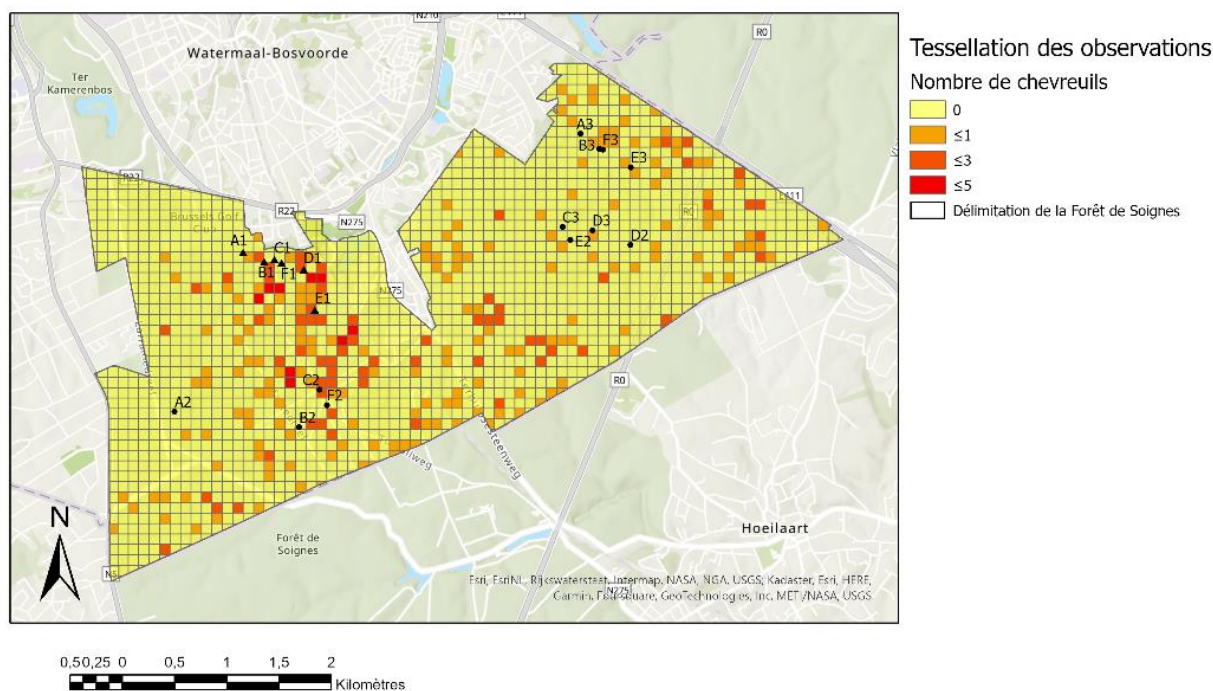


Figure 13 : Tessellation de la répartition du Chevreuil de 2017 à 2022 dans la zone d'étude

2.5.4 La végétation

La taille du sous-bois a été mesurée avec un mètre ruban, du sol au sommet de la plus grande végétation correspondant au type de sous-bois présente sur le site. La taille n'ayant pas été mesurée durant les deux premières semaines de récoltes, ces données sont manquantes.

Le type de peuplement recouvrant les différents sites a été identifié grâce aux cartes « Typologie des objectifs de gestion » fournies par l'administration Bruxelles-Environnement et les gardes forestiers de la Forêt de Soignes bruxelloise (Annexe 1 – Cartes 1 et 2).

L'essence des arbres principaux rencontrés sur chaque site a été identifiée à l'aide de nos connaissances et du livre « Flore forestière française, Tome 1 » [48].

2.5.5 Le sol

Les données relatives au type de sol et à son drainage proviennent du document « Plan de gestion de la forêt de Soignes bruxelloise » de l'administration Bruxelles-Environnement et des gardes forestiers (Annexe 2 – Cartes 1 et 2) [2].

2.5.6 Les autres données

La distance au chemin est mesurée avec un mètre ruban de 10 m, allant du bord du chemin jusqu'au point le plus proche de la zone de *flagging*.

La catégorisation des sites dans une zone de réserve naturelle se base sur des cartes 1 et 2 provenant de « Typologie des objectifs de gestion », en annexe (Annexe 1 – Cartes 1 et 2).

L'altitude a été mesurée avec le logiciel ArcGis Pro et les outils d'analyses « *Spatial Analysis* ».

2.6 Analyse statistique

Avant de commencer les analyses statistiques, il est important de tester la colinéarité, avec le coefficient de Pearson, entre les variables explicatives pour identifier les variables liées (Annexe 3 – Figures 1 et 2). Si la valeur du coefficient de Pearson dépasse le seuil de 0.6-0.8, alors les variables sont liées l'une avec l'autre et il y aura des problèmes dans les analyses. Dans ce cas-ci, il est préférable de ne pas les associer dans un même modèle statistique et de choisir la variable à utiliser (indiquée en gras). Pour éviter un problème avec la variable « Taille du sous-bois » pour laquelle les données manquantes empêchent l'analyse de la colinéarité, les valeurs manquantes ont été remplacées par la moyenne de la taille du sous-bois du même site lors des semaines suivantes.

Les variables colinéaires sont les suivantes :

- La date et la **saison** ;
- **L'heure de début** et de fin de récolte ;
- Les **tamias**, les chevreuils, la zone et la réserve naturelle ;
- Le type de peuplement et **l'essence des arbres principaux** ;
- La **réserve naturelle** et le type de sol.

2.6.1 Abondance des tiques

Pour les analyses statistiques sur le nombre de tiques récoltées dans la Forêt de Soignes, je vais me focaliser uniquement sur les données de larves et de nymphes. En effet, les données sur les larves sont intéressantes car les rongeurs tels que les tamias sont des hôtes potentiels lors de leur première métamorphose. Les nymphes ont un intérêt biologique pour l'espèce et pour la santé publique. Elles peuvent être porteuses de *Borrelia*, acquise lors du repas sanguin au stade larvaire, et la transmettre aux humains. Les tiques adultes ne se retrouvent qu'en petit nombre

dans la nature. À titre de comparaison, 4 296 larves, 498 nymphes et seulement 24 tiques adultes ont été récoltées en Forêt de Soignes lors de cette expérience (Figures 14, 15 et 16).

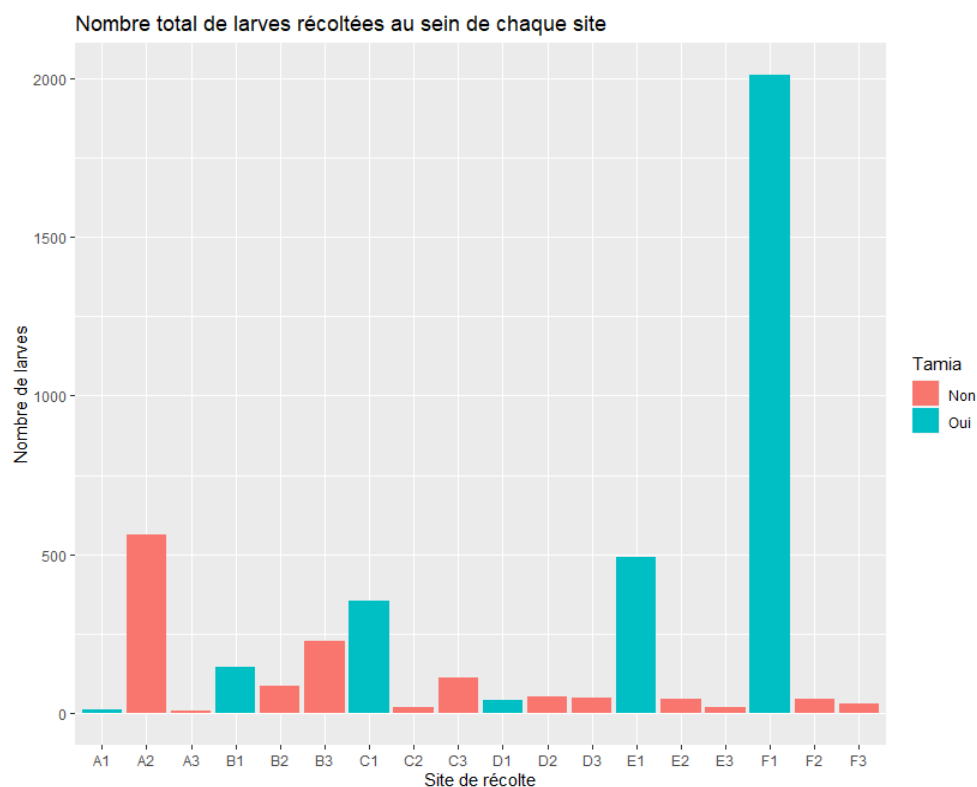


Figure 14 : Nombre total de larves récoltées au sein de chaque site d'expérience

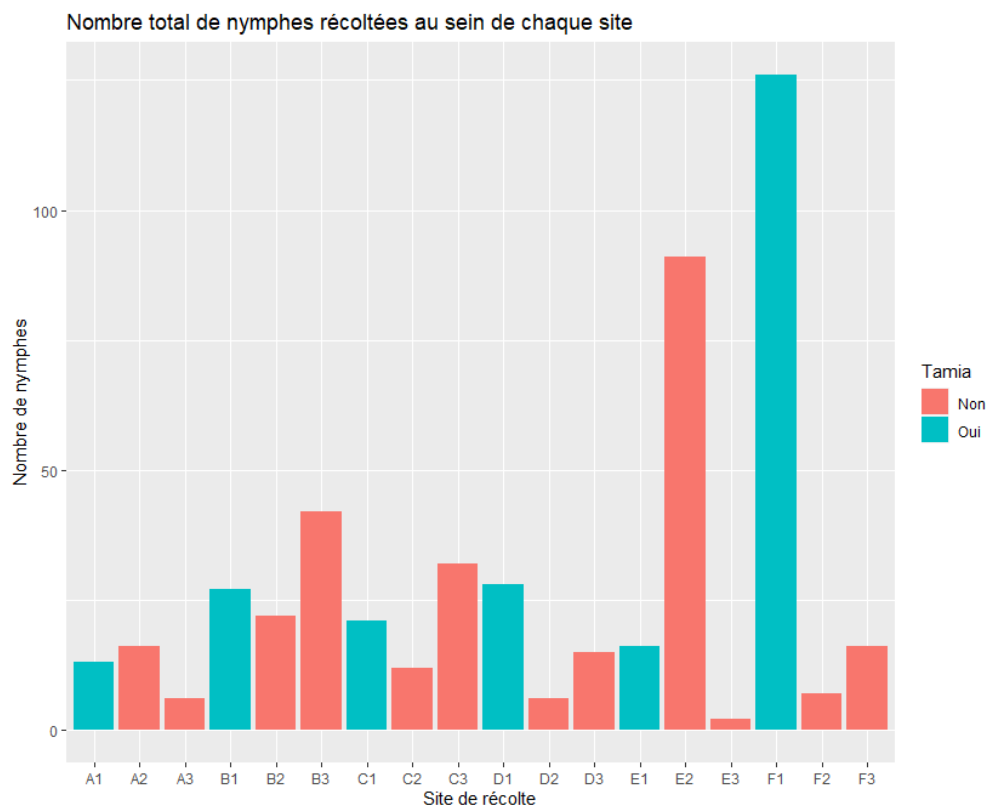


Figure 15 : Nombre total de nymphes récoltées au sein de chaque site d'expérience

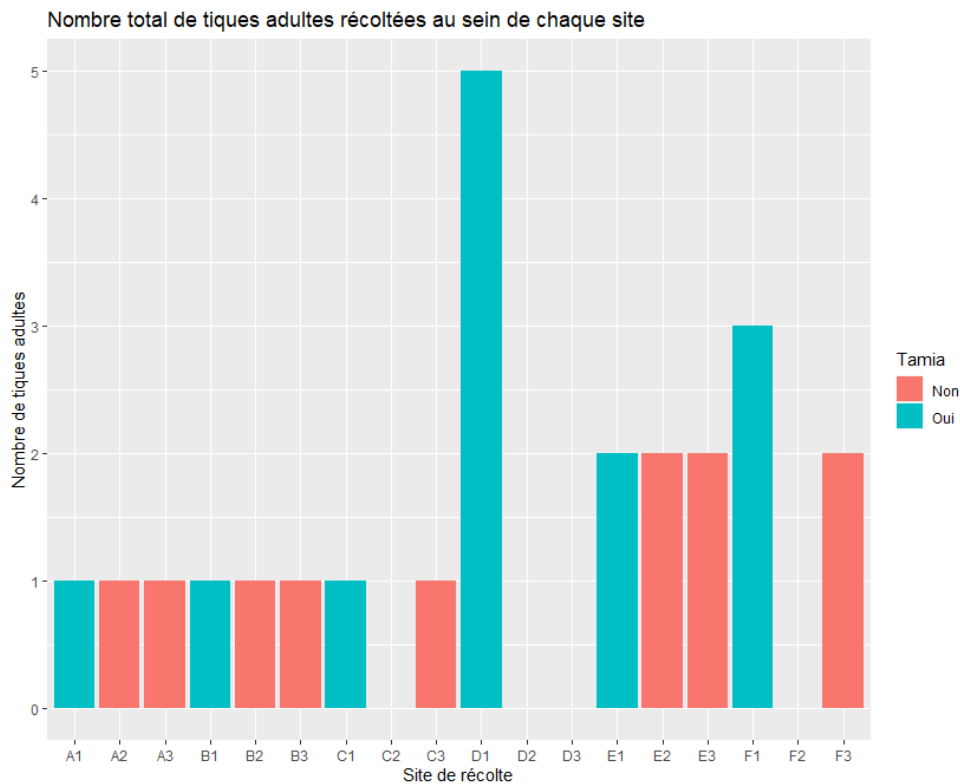


Figure 16 : Nombre total de tiques adultes récoltées au sein de chaque site d'expérience

Les variables réponses sont de type comptage (nombre de tiques récoltées par site), donc on suppose que nos données ne suivent pas une distribution de loi normale mais sont distribuées selon une loi de Poisson. On va alors parler d'un modèle linéaire généralisé de Poisson (GLM de Poisson). Cependant, nos variables réponses ne sont pas indépendantes car les données sont répétées au niveau des sites dans le temps. De plus, les données sont surdispersées. Par conséquent, le modèle statistique utilisé pour l'analyse du nombre de tiques récoltées (questions 2 à 5) est un modèle mixte linéaire généralisé négatif binomial (GLMM négatif binomial) avec comme variable aléatoire, les sites. J'ai travaillé avec un modèle négatif binomial à la place d'un modèle quasi-poisson car les conditions d'application sont meilleures. Il y a également une valeur pour le AIC, permettant de connaître la qualité du modèle.

Pour les questions 2 à 5, les variables réponses sont le nombre de nymphes d'une part et celui des larves d'autre part. La variable aléatoire est le site de récolte et les variables explicatives changent en fonction de la question.

La question 2, sur l'influence de la présence du Tamia sur le nombre de tiques récoltées, comprend comme variable explicative, la présence ou non du Tamia de Sibérie.

Le modèle utilisé est le suivant :

Modèle 2 <- glmer.nb(Nombre de nymphes ~ Tamia + (1|Site), data=Mémoire)

Pour la question 3, sur l'influence des hôtes sur le nombre de tiques récoltées, les variables explicatives sont la présence ou non de tamias, de chevreuils et leur interaction. Bien que les variables Tamia et Chevreuil soient colinéaires, j'ai décidé de les garder toutes les deux afin de voir s'il y a un éventuel impact de la présence de ces deux espèces sur l'abondance des tiques. Par la suite, seule la variable Tamia est utilisée pour représenter la présence d'un hôte.

Le modèle utilisé est le suivant :

Modèle 3 <- glmer.nb(Nombre de nymphes ~ Tamia + Chevreuil + Tamia*Chevreuil + (1|Site), data=Mémoire)

Pour la question 4, sur l'influence du milieu végétatif arborescent et des tamias sur le nombre de tiques récoltées, les variables explicatives sont l'essence des arbres principaux et la présence ou non du Tamia et leur interaction. Dans ce cas-ci, j'ai choisi de ne prendre que la variable essence et pas le type de peuplement car ces variables sont colinéaires entre elles.

Le modèle utilisé est le suivant :

Modèle 4 <- glmer.nb(Nombre de nymphes ~ Essence + Tamia + Essence*Tamia + (1|Site), data=Mémoire)

Pour la question 5, sur l'influence du type de sous-bois et des tamias sur le nombre de tiques récoltées, les variables explicatives sont le type de sous-bois et la présence ou non du Tamia avec leur interaction.

Le modèle utilisé est le suivant :

Modèle 5 <- glmer.nb(Nombre de nymphes ~ Sous-bois + Tamia + Sous-bois*Tamia + (1|Site), data=Mémoire)

2.6.2 Abondance de tiques infectées par *Borrelia burgdorferi* sensu lato.

En ce qui concerne les questions 6 et 7, sur les tiques infectées par la *Borrelia burgdorferi* s.l et sa génoespèce *afzelii*, les modèles statistiques sont des modèles linéaires mixtes généralisés de type Poisson (GLMM de Poisson), car les données ne sont pas indépendantes et ni en surdispersion. Pour la question 6, je vais analyser le nombre total de tiques infectées par *Borrelia burgdorferi* s.l en fonction de la présence des tamias et des chevreuils. Pour la

question 7, je vais analyser le nombre total de tiques infectées par *B. afzelii* en fonction de la présence des rongeurs et donc du *Tamia*. La variable aléatoire pour les deux modèles est le site de récolte.

Les modèles utilisés sont les suivants :

```
Modèle 6a <- glmer(Nombre total de tiques infectées ~ Tamia + (1|Site), family = "poisson",  
                    data=Mémoire)
```

```
Modèle 6b <- glmer(Nombre total de tiques infectées ~ Tamia + Chevreuil +  
                    Tamia*Chevreuil + (1|Site), family = "poisson", data=Mémoire)
```

```
Modèle 7 <- glmer(Nombre de tiques infectées par B. afzelii ~ Tamia + (1|Site), family =  
                    "poisson", data=Mémoire)
```

2.6.3 Analyses des résultats

Dans cette étude, j'ai décidé de prendre un seuil de significativité à 10% ($p\text{-val} < 0.1$). Pour analyser les résultats statistiques obtenues, j'ai utilisé le ratio du taux d'incidence (IRR) afin de comparer le taux d'incidence entre deux groupes différents. Ce ratio est calculé en faisant la transformation exponentielle sur les estimateurs de coefficients, étant donné que les modèles utilisent une modification logarithmique pour analyser les données de comptage. Pour les interactions, le IRR va prendre en compte le coefficient de la présence du *Tamia* et celui de l'interaction entre les deux variables. Il y a donc une addition de ces estimateurs de coefficients lors de la transformation exponentielle.

2.6.4 Le site outlier

En réalisant un scatterplot et des analyses descriptives sur les données de tiques récoltées, un site retient l'attention avec un très grand nombre de larves et de nymphes. Le site Fougère avec la présence du *Tamia* (F1) peut être considéré comme un outlier parmi les autres sites de récolte à cause de ses valeurs extrêmes contrairement aux autres, comme peuvent le démontrer ces trois graphiques (Figure 17, 18 et 19).

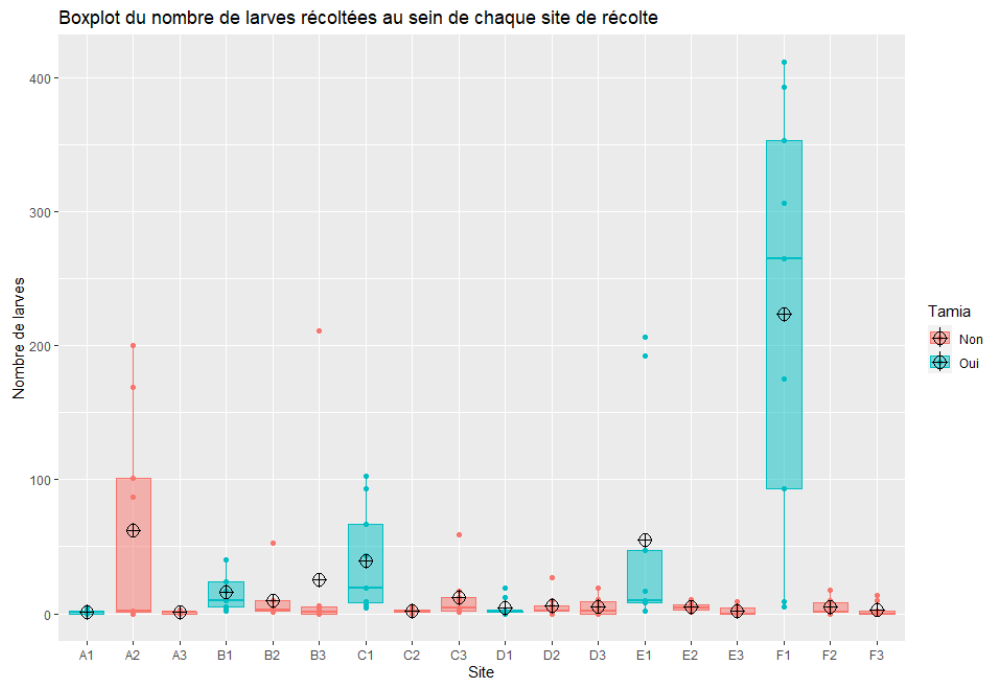


Figure 17 : Boxplot du nombre de larves récoltées au sein de chaque site d'expérience

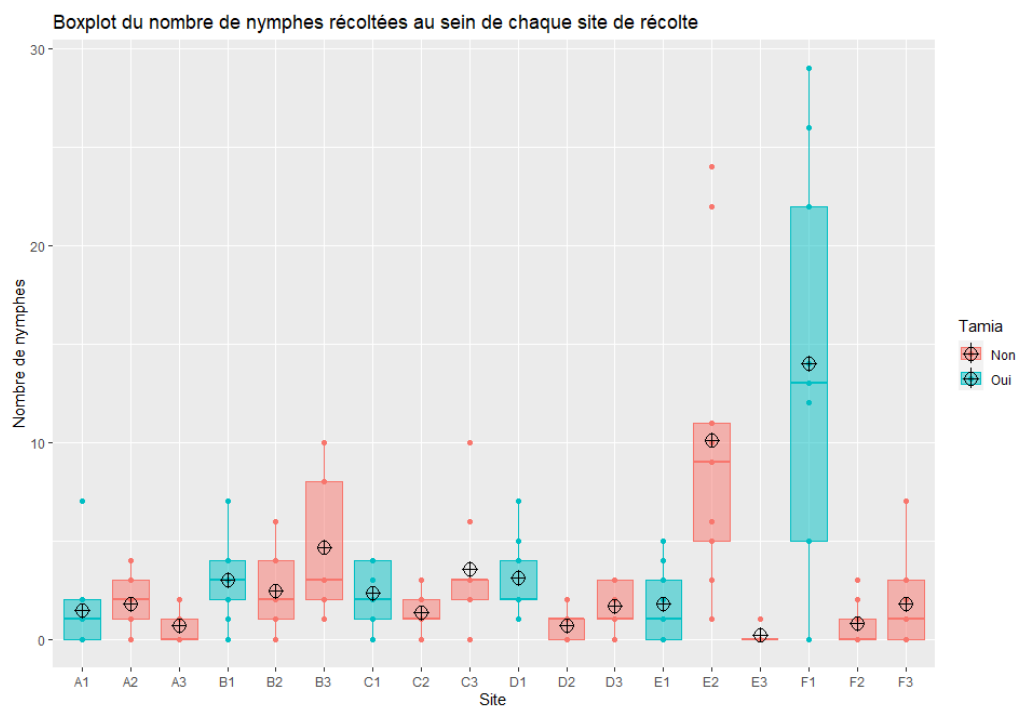


Figure 18 : Boxplot du nombre de nymphes récoltées au sein de chaque site d'expérience

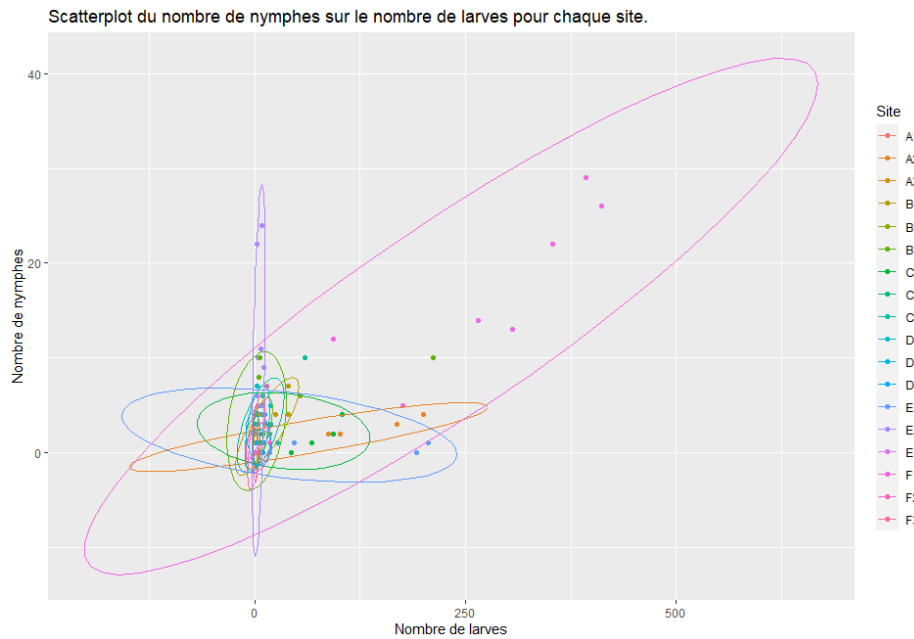


Figure 19 : Scatterplot du nombre de nymphes sur le nombre de larves en fonction des sites d'expérience

Ce site F1 pourrait exercer une influence sur les résultats des analyses ; il est donc important de le prendre en compte afin de ne pas faire de conclusions hâtives qui pourraient être erronées dues à la grande présence de tiques sur ce lieu. En effet, cet outlier pourrait être justifié, soit par le fait que le type de sous-bois fougère avec des tamias est un lieu très propice à la présence de tiques, soit que lors de la récolte de ces acariens, nous soyons tombées accidentellement sur un nid de tiques, expliquant le grand nombre de larves.

Cette comparaison est à prendre en compte et c'est pour cela que l'ensemble des analyses statistiques a été réalisé d'une première part avec l'outlier F1 et d'autre part sans.

2.6.5 Les modèles complets

Pour finir, des modèles complets ont été formés avec l'ensemble des variables explicatives significatives qui pourront jouer un rôle dans la présence et l'abondance de tiques dans la Forêt de Soignes à Bruxelles. Pour ce faire, chaque variable réponse a été testée séparément avec chaque variable explicative du jeu de données afin de voir lesquelles étaient significatives ($p\text{-val} < 0.1$). Ensuite, un modèle a été formé avec toutes ces variables explicatives. Ce dernier a été comparé en enlevant des variables jusqu'à obtenir un modèle dont la valeur du AIC était la plus petite, tout en prenant en compte la colinéarité entre les variables. De fait, l'AIC est un indicateur de la qualité du modèle et plus celle-ci est faible, meilleur est le modèle.

Le modèle complet pour l'abondance des nymphes utilisé est le suivant :

```
Modèle Nympe <- glmer.nb(Nombre de nymphes ~ Saison + Essence + Couverture  
nuageuse + (1|Site), data=Mémoire)
```

Le modèle complet pour l'abondance des larves utilisé est le suivant :

```
Modèle Larve <- glmer.nb(Nombre de larves ~ Saison + Taille du sous-bois + Type de  
peuplement + Humidité + Réserve naturelle + (1|Site), data=Mémoire)
```

Le modèle complet pour l'abondance de tiques infectées par *Borrelia burgdorferi* s.l est le suivant :

```
Modèle infectées <- glmer.nb(Nombre de tiques infectées par Borrelia burgdorferi s.l. ~  
Réserve naturelle + Humidité + (1|Site), data=Mémoire)
```

Le modèle complet pour l'abondance de tiques infectées par *B. afzelii* utilisé est le suivant :

```
Modèle B. afzelii <- glmer.nb(Nombre de tiques infectées par B. afzelii ~ Humidité +  
Réserve naturelle + (1|Site), data=Mémoire)
```

3 Résultats

3.1 Analyse de la répartition du Tamia de Sibérie dans la Forêt de Soignes

La figure 20 représente le nombre d'observations du Tamia de Sibérie dans la Forêt de Soignes. On remarque qu'il y a des zones où ce rongeur est plus observé comme le Rouge-Cloître, les Enfants Noyés, Groenendaël ou encore le Domaine régional Solvay.

Nombre d'observations de Tamia de Sibérie (*Tamias sibiricus*) de 1976 à 2022 dans la Forêt de Soignes

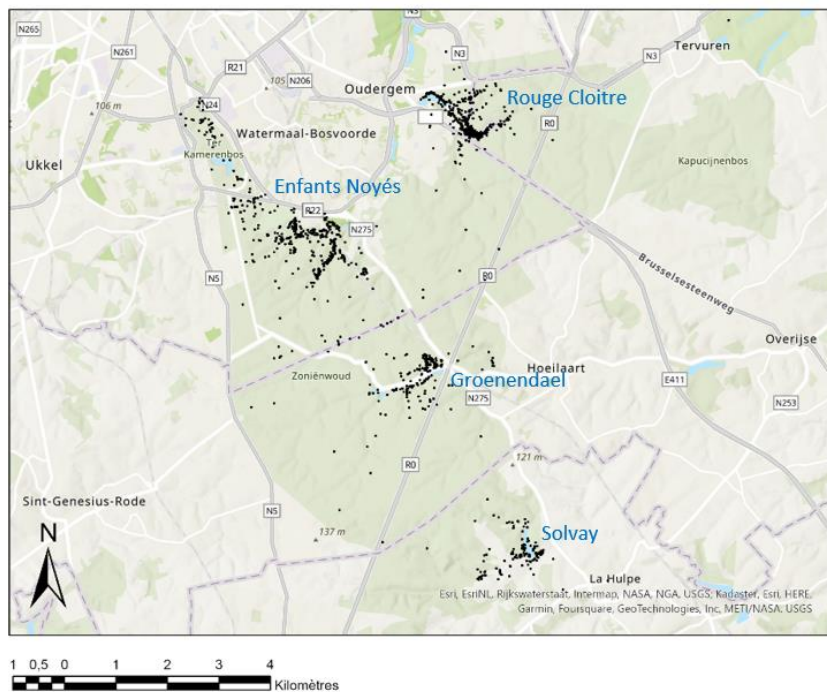


Figure 20 ; Répartition des observations du Tamia de Sibérie dans la Forêt de Soignes de 1976 à 2022

Comme la zone d'étude pour la récolte des tiques ne représente qu'une partie de la forêt, j'ai décidé de réaliser l'analyse spatiale du Tamia uniquement sur cette zone. De plus, il y a une forte densité d'observations du Tamia au niveau du Rouge-Cloître et cela a tendance à minimiser le contraste sur le reste de la carte. De ce fait, je pourrais avoir une analyse plus précise de leur présence ou absence. La figure 21 représente, cette fois-ci, les observations des tamias présentes dans la zone d'étude.

Nombre d'observations de *Tamias sibiricus* (Tamias sibiricus) de 1976 à 2022 dans la zone d'étude

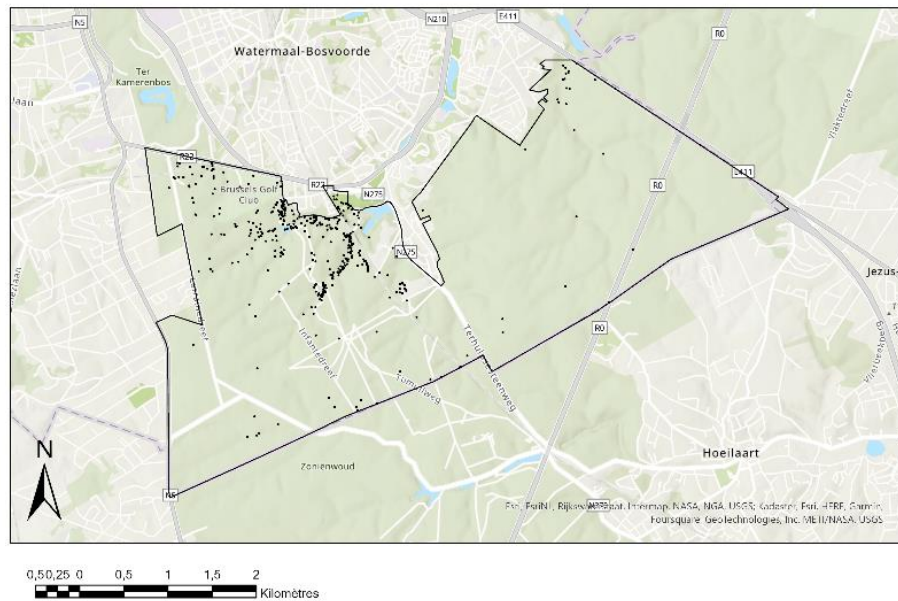


Figure 21 : Répartition des observations du *Tamias sibiricus* dans la zone d'étude de 1976 à 2022

En se focalisant uniquement sur la zone d'étude, la densité des observations du *Tamias sibiricus* est principalement au niveau des étangs des Enfants Noyés à Watermaal-Boitsfort, près du Parc Tournay-Solvay, indiquant donc la zone où se tiendront les 6 sites avec présence du *Tamias* dans l'expérience.

Cependant, les observations proviennent du site observations.be et sont des données générées par le public. Celles-ci peuvent donc présenter des biais d'observation. Comment savoir si les observations du *Tamias* représentent la dispersion réelle de cette espèce ou si cette dispersion est biaisée par les zones de fortes affluences d'observateurs ? Pour tenter de caractériser ce biais, j'ai comparé les localisations des observations du *Tamias* avec celles d'une espèce assez commune dans nos régions, le Rougegorge familier (*Erithacus rubecula*). Ce processus va permettre de savoir si les observations des tamias sont localisées dans les zones de fortes affluences de promeneurs ou si, au contraire, les observations reflètent bien les zones où résident les populations des tamias. Les figures 22 et 23 représentent respectivement les observations du *Tamias sibiricus* et du Rougegorge familier dans la zone d'étude de 2010 à 2020.

Tessellation du nombre d'observations du Tamia de Sibérie (*Tamias sibiricus*) de 2010 à 2020 dans la zone d'étude

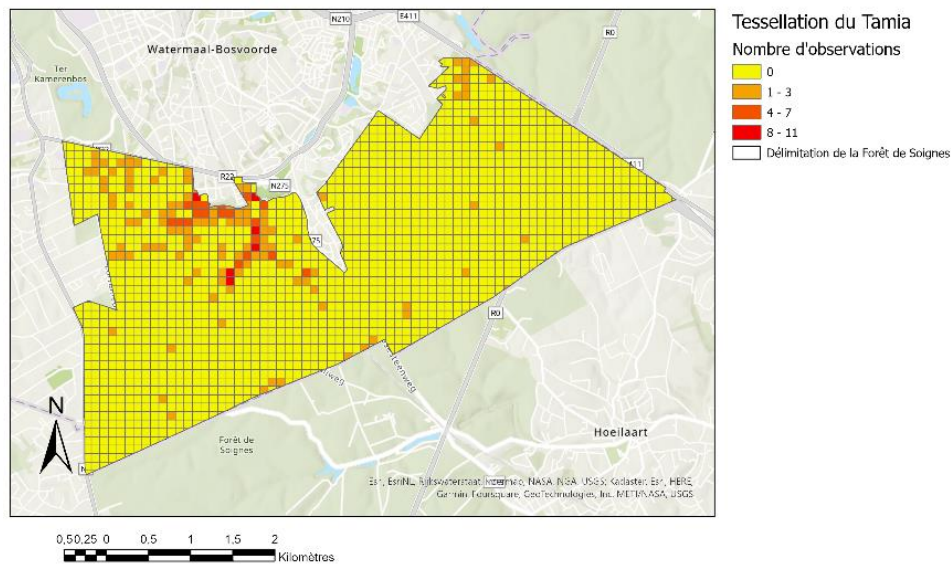


Figure 22 : Tessellation des observations du Tamia de Sibérie dans la zone d'étude de 2010 à 2020

Tessellation du nombre d'observations du Rougegorge familial (*Erithacus rubecula*) de 2010 à 2020 dans la zone d'étude

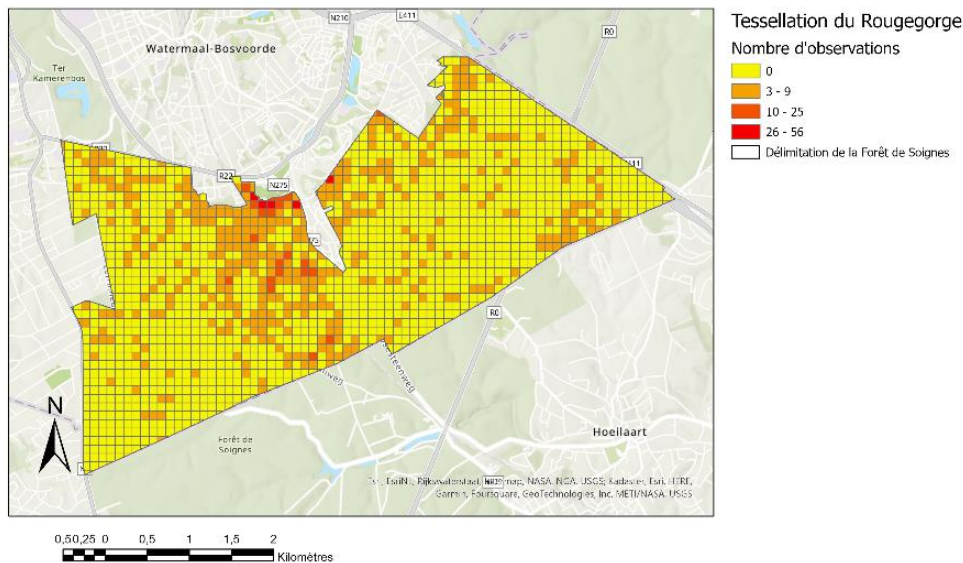


Figure 23 : Tessellation des observations du Rougegorge familial dans la zone d'étude de 2010 à 2020

À première vue, la zone à proximité des Enfants Noyés et du Parc Tournay-Solvay représente un lieu important d'observations pour les deux espèces. Cependant, la partie Est dans la zone d'étude recense des observations du Rougegorge, contrairement aux tamias dans lequel il y a très peu de données. On peut imaginer qu'il y a effectivement des zones avec un plus grand nombre d'observations dû à la forte affluence de promeneurs, mais on peut aussi conclure que les zones où le Tamia n'a pas été observé sont dues au fait que ceux-ci ne s'y trouvent pas. De

plus, on peut faire la même constatation avec la carte des observations du Chevreuil, dans le Protocol expérimental (Figure 13).

Pour aller plus loin, en faisant le rapport entre le nombre d'observations du Tamia sur le nombre d'observations de Rougegorge, on obtient la figure 24. Cette démarche va permettre d'avoir une indication sur l'intensité des observations du rongeur, ajustée pour l'effort de collecte. La couleur jaune indique des lieux avec des observateurs mais pas d'observations du Tamia, et plus la couleur tend vers le rouge, plus il y a d'observations de ce rongeur. Je suppose donc que les données n'ont pas de biais d'observations flagrant.

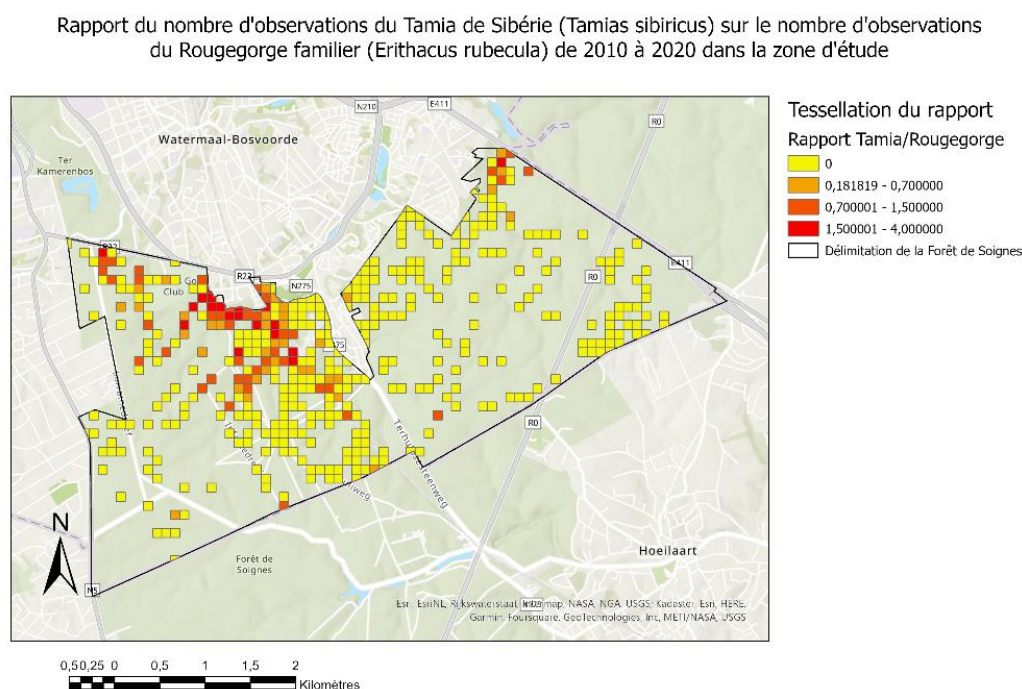


Figure 24 : Rapport entre les observations du Tamia de Sibérie et du Rougegorge familial dans la zone d'étude de 2010 à 2020

Ensuite, une analyse spatiale et temporelle du Tamia dans la zone d'étude a aussi été réalisée afin de voir comment les populations des tamias ont évolué dans le temps et l'espace.

Trois études ont déjà été effectuées sur le Tamia de Sibérie en Forêt de Soignes [3, 30, 47]. Ces études permettent d'avoir des données d'observations du Tamia en 1981, 1988 et 1998. Afin de pouvoir les comparer entre elles et avec les données d'observations.be (1976-2022), j'ai décidé de réaliser la même tessellation utilisée dans le travail de Elke Van den Broeke, soit une tessellation carrée de 500 m de côté [47]. Les données des trois études sont représentées dans les figures 25, 26 et 27 et celles du site d'observations.be dans les suivantes (Figures 28, 29, 30 et 31). Les données provenant du site sont regroupées selon des intervalles de 10 ans.

Tessellation du nombre d'observations du Tamia de Sibérie (*Tamias sibiricus*) en 1981 dans la zone d'étude

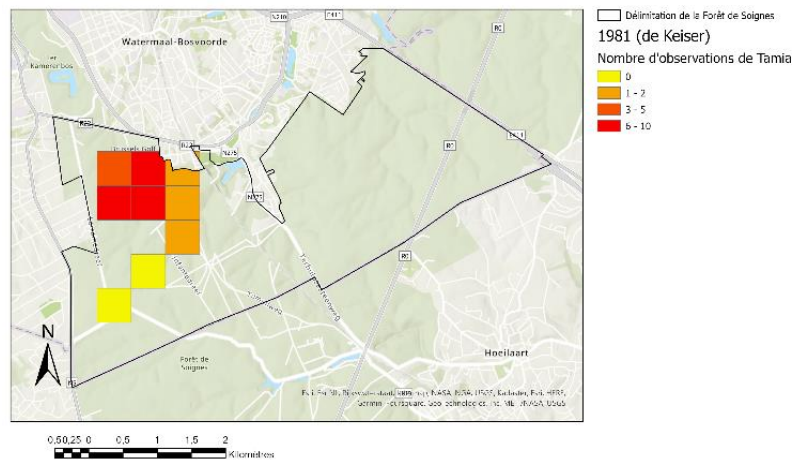


Figure 25 : Tessellation des observations du Tamia de Sibérie en 1981 dans la zone d'étude (de Keiser)

Tessellation du nombre d'observations du Tamia de Sibérie (*Tamias sibiricus*) en 1988 dans la zone d'étude

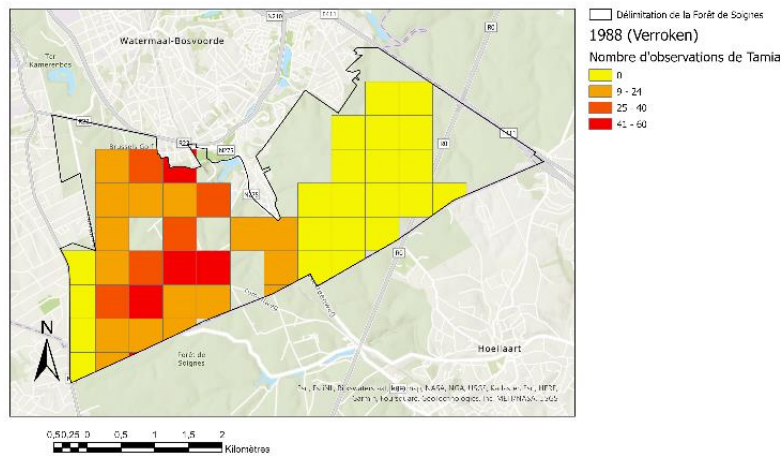


Figure 26 : Tessellation des observations du Tamia de Sibérie en 1988 dans la zone d'étude (Verroken)

Tessellation du nombre d'observations du Tamia de Sibérie (*Tamias sibiricus*) en 1998 dans la zone d'étude

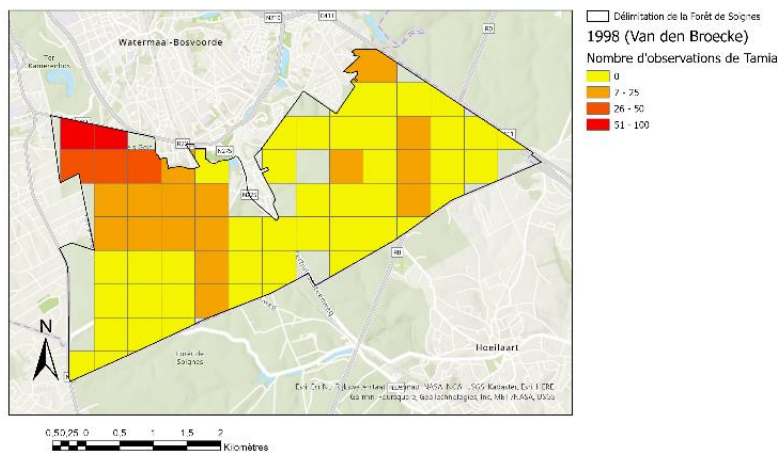


Figure 27 : Tessellation des observations du Tamia de Sibérie en 1998 dans la zone d'étude (Van den Broecke)

Tessellation du nombre d'observations du Tamia de Sibérie (*Tamias sibiricus*) avant 2000 dans la zone d'étude

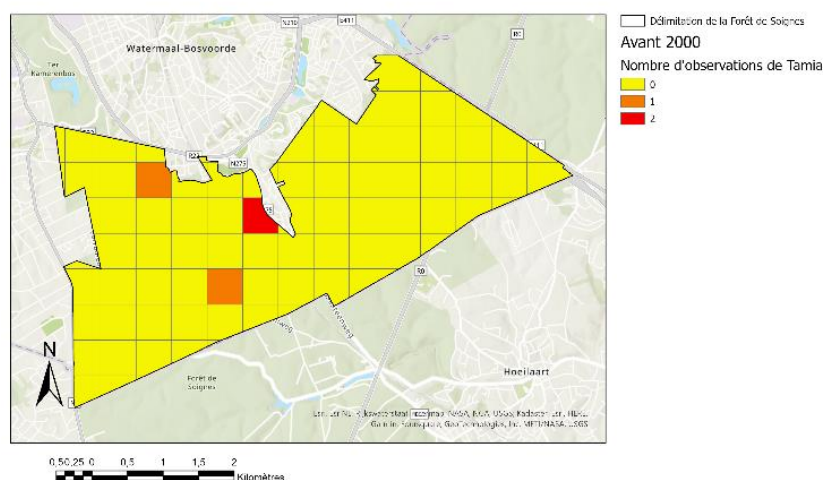


Figure 28 : Tessellation des observations du Tamia de Sibérie avant 2000 dans la zone d'étude

Tessellation du nombre d'observations du Tamia de Sibérie (*Tamias sibiricus*) entre 2000 et 2009 dans la zone d'étude

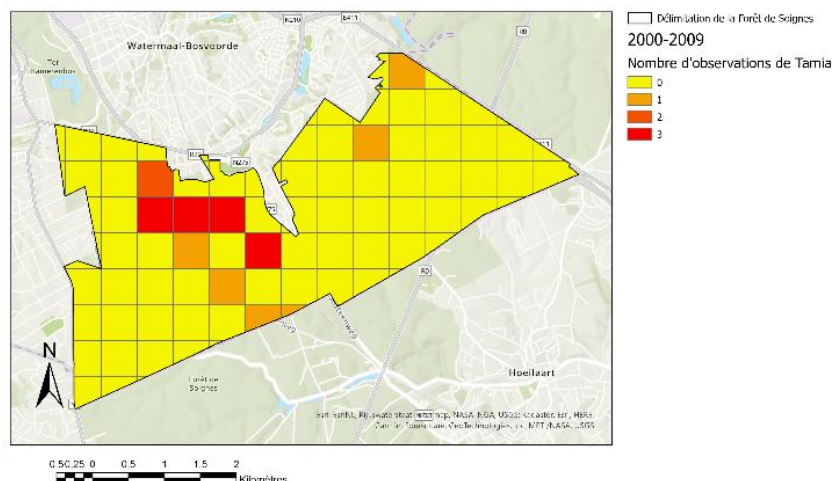


Figure 29 : Tessellation des observations du Tamia de Sibérie entre 2000 et 2009 dans la zone d'étude

Tessellation du nombre d'observations du Tamia de Sibérie (*Tamias sibiricus*) entre 2010 et 2019 dans la zone d'étude

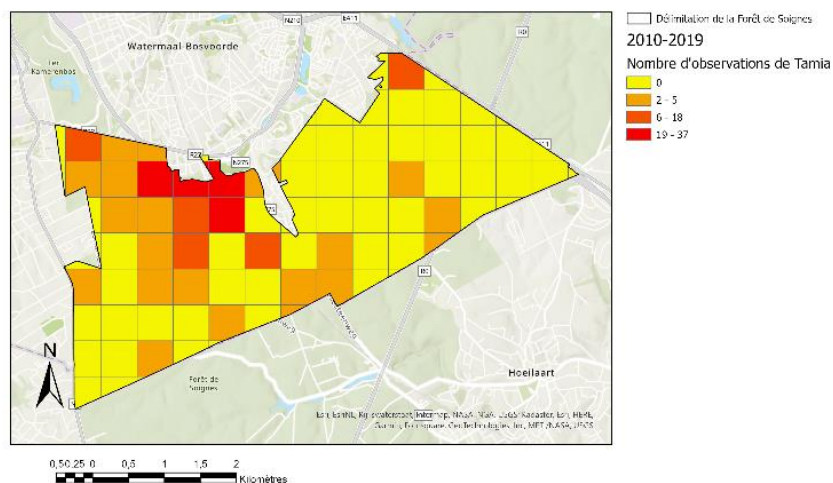


Figure 30 : Tessellation des observations du Tamia de Sibérie entre 2010 et 2019 dans la zone d'étude

Tessellation du nombre d'observations du Tamia de Sibérie (*Tamias sibiricus*) après 2020 dans la zone d'étude

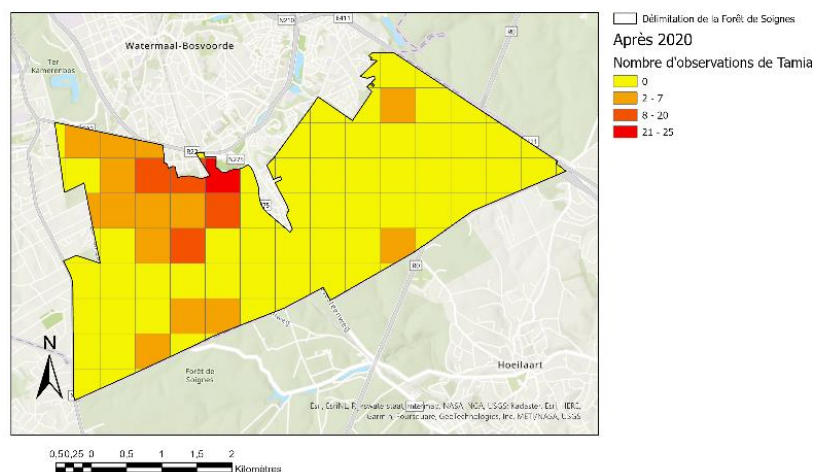


Figure 31 : Tessellation des observations du Tamia de Sibérie après 2020 dans la zone d'étude

En 1981, on remarque que peu de zones d'étude avaient été étudiées. Cependant, on constate quand même que deux carrés ne comportaient pas de tamias cette année-là, alors que 7 ans plus tard, un grand nombre d'observations y ont été recensées. Dix ans plus tard, en 1998, on constate une colonisation des tamias vers l'Est de la zone d'étude ainsi qu'un déplacement des rongeurs vers le nord, près du Bois de la Cambre.

Les cartes représentant les observations avant 2000 et entre 2000 et 2009 (Figures 28 et 29) ne donnent que peu d'informations sur la dynamique de population du Tamia dans la forêt. Pourtant, cela n'empêche pas qu'elles indiquent une certaine tendance à l'observation des tamias dans les alentours des étangs des Enfants Noyés à Watermael-Boitsfort avant 2010. Cette tendance se renforce avec les deux dernières cartes (Figures 30 et 31) indiquant que les tamias sont fortement présents dans ce lieu, après 2010 et jusqu'à maintenant. Plus rarement, des observations sont inventoriées dans l'Est et le Sud de la zone d'étude.

Pour analyser l'évolution spatiale au cours du temps, deux cartes représentant une emprise géométrique minimale (*Convex Hull*) ont été réalisées afin de déterminer si l'étendue des observations du Tamia a grandi dans le temps ou, au contraire, a diminué. La figure 32 représente le *Convex Hull* des données de 1981, 1988 et 1998 et la figure 33, les données d'observations.be durant les quatre périodes de temps dans la zone d'étude.

Convex Hull des observations du Tamia de Sibérie (*Tamias sibiricus*) en 1981, 1988 et 1998 dans la zone d'étude

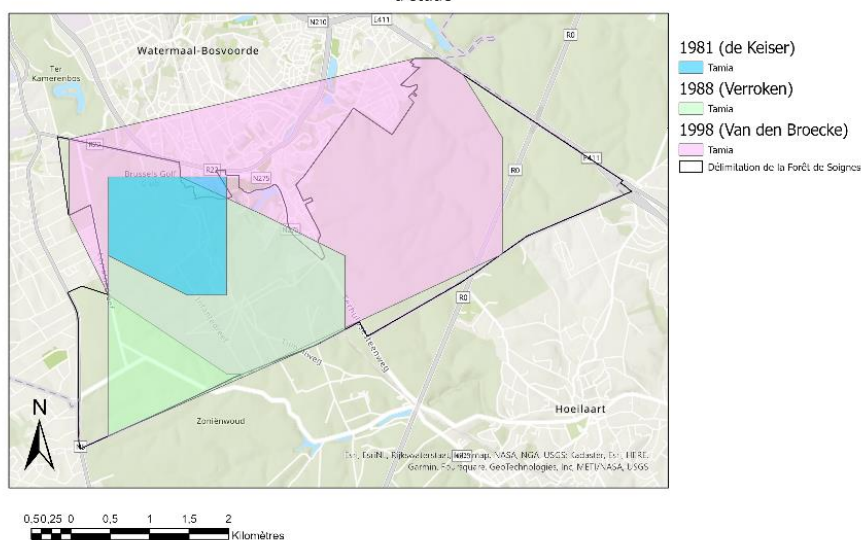


Figure 32 : Convex Hull des observations du Tamia de Sibérie en 1981, 1988 et 1998 dans la zone d'étude

Convex Hull des observations du Tamia de Sibérie (*Tamias sibiricus*) avant 2000, entre 2000 et 2009, entre 2010 et 2019, après 2020 dans la zone d'étude

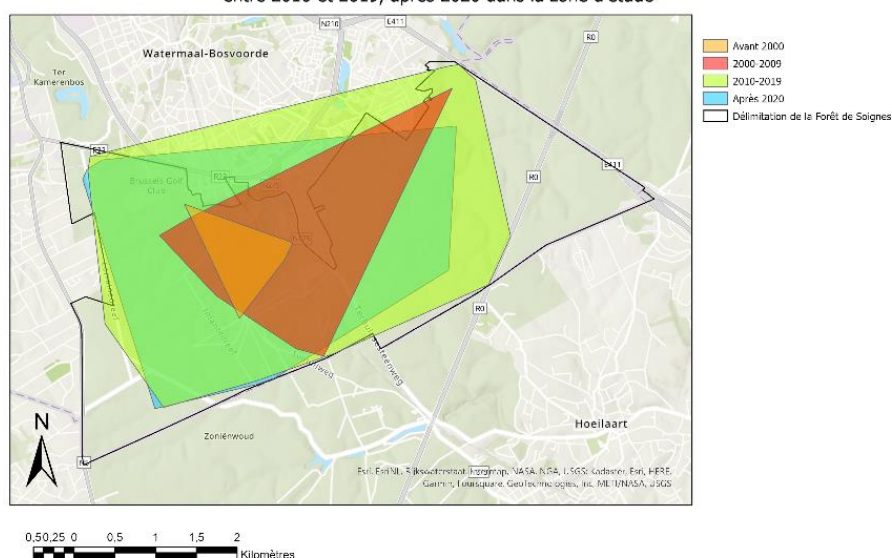


Figure 33 : Convex Hull des observations du Tamia de Sibérie séparé par périodes dans la zone d'étude

Il faut cependant bien prendre en compte que les données de 1981, 1988 et 1998 sont différentes du point de vue du lieu des récoltes. En effet, la zone d'étude de l'année 1981 ne comprenait qu'une petite partie de la forêt contrairement aux deux autres. Ensuite, dans celles d'observations.be, il y a le biais d'accès à Internet. De fait, avant 2010, Internet n'était pas l'outil le plus courant chez les promeneurs ou dans la population en général. À titre de comparaison, seulement 11 et 62 observations ont été enregistrées avant 2000 et en 2000-2009 respectivement, tandis que ce nombre est de 937 en 2010-2019 et que celui après 2020 est de 409.

Pour conclure, à la suite de la première apparition du *Tamias* de Sibérie près des étangs des Enfants Noyés à Watermael-Boitsfort en 1974, les tamias se sont dispersés spatialement au cours du temps. En 1988, la colonisation s'est étendue jusque dans le sud de la zone d'étude avant que celle-ci ne redevienne une zone où les observations de cette espèce se font plus rares, en 1998. Une forte densité de *Tamias* reste au cours du temps centrée dans les alentours des Enfants Noyés à Watermael-Boitsfort avec ces rongeurs qui deviennent plus rarement observés à droite ou dans le sud de la zone d'étude.

3.2 Abondance des nymphes récoltées

Un total de 498 nymphes a été récolté sur l'ensemble des sites d'expérience en Forêt de Soignes. Sur la figure 34, représentant le nombre de nymphes récoltées dans les sites tout au long de l'expérience, on remarque deux sites dont l'abondance des nymphes est supérieure aux autres. Ces deux sites sont les F1 et E2 avec respectivement 126 et 91 nymphes. Quels sont les facteurs biotiques et abiotiques qui vont exercer une influence sur cette abondance ?

Carte proportionnelle du nombre de nymphes récoltées dans les sites d'expérience au niveau de la zone d'étude

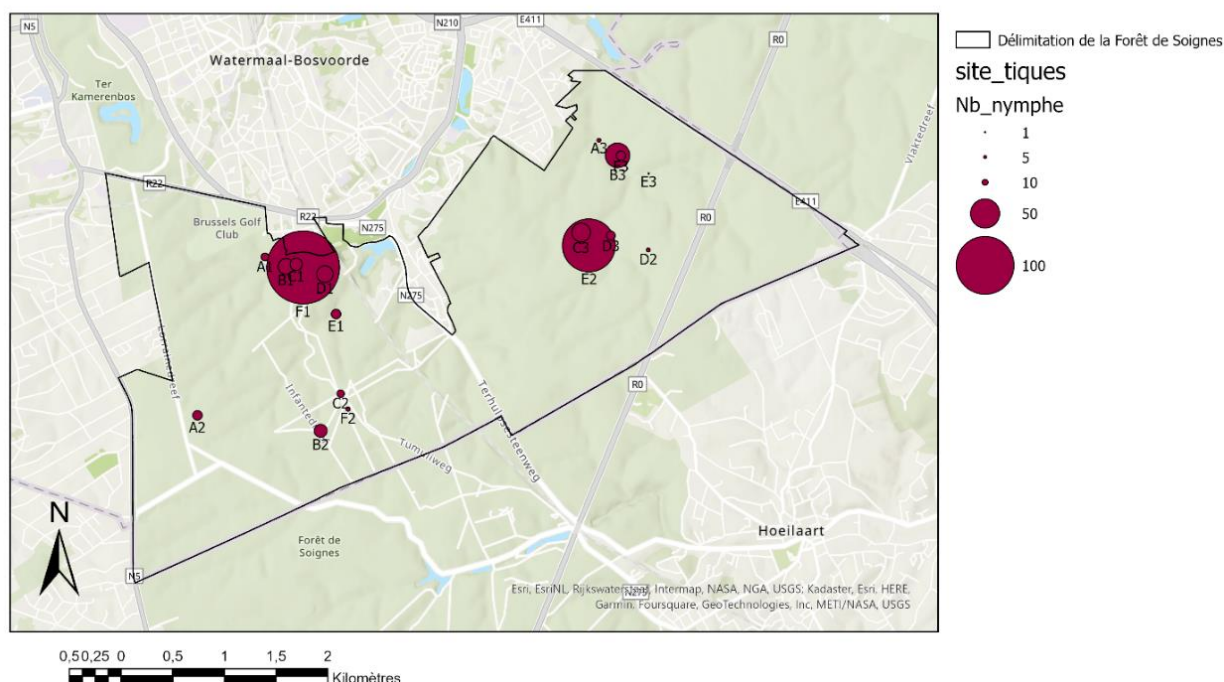


Figure 34 : Carte de l'abondance des nymphes dans la zone d'étude

3.2.1 Influence de la présence du Tamia de Sibérie

La présence du Tamia de Sibérie n'a pas d'influence significative sur l'abondance de nymphes récoltées en Forêt de Soignes (Tableau 3). On garde l'hypothèse nulle décrivant que les moyennes du nombre de nymphes récoltées ne sont pas différentes statistiquement avec la présence ou l'absence de tamias (Figure 35). En enlevant le site outlier F1, on observe le même résultat avec des valeurs non significatives pour la présence du rongeur (Annexe 4 - Graphique 1).

Tableau 3 : Résultats statistiques de la présence du Tamia de Sibérie sur l'abondance des nymphes

Variables explicatives		Modèle 2 avec F1		Modèle 2 sans F1	
		Estimate	IRR	Estimate	IRR
Intercept		0.5054.	1.66.	0.5229 *	1.69 *
Tamia	Non	Référence		Référence	
	Oui	0.6075	1.84	0.2677	1.31
AIC		672.3		599.1	
p < 0.1. . p < 0.05 *. p < 0.01 **. p < 0.001 ***					

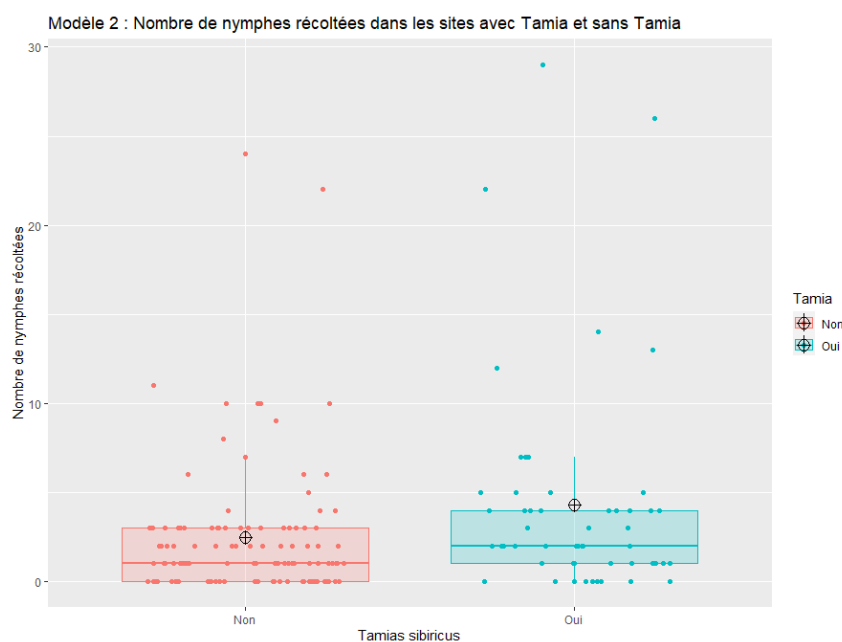


Figure 35 : Abondance des nymphes en fonction de la présence du Tamia de Sibérie : N = 12 sites sans tamias et N = 6 sites avec tamias

3.2.2 Influence de la présence des hôtes (Tamia de Sibérie et Chevreuil)

Sans prendre en compte l'interaction entre les hôtes, par rapport à la référence qui sont les sites sans hôtes, il y a une augmentation d'un taux de 2.74 fois plus de nymphes en présence de tamia tandis qu'aucune valeur significative n'est obtenue pour la présence du chevreuil (Tableau 4). En prenant en compte cette interaction, la valeur pour la variable Tamia est significative en fonction de l'absence de chevreuil. En effet, il indique que dans les sites sans chevreuils, la présence du Tamia a un taux 3.39 fois plus élevé de nymphes que dans les sites sans Tamia (Figure 36). La variable Chevreuil n'est pas significative ; il n'y a donc pas de différence du nombre de nymphes récoltées entre les sites avec et sans les chevreuils, en l'absence de Tamia. Pour finir, l'interaction entre les variables Chevreuil et Tamia n'a pas d'impact, indiquant que la présence des deux hôtes n'amène pas un plus grand nombre de nymphes et inversement. En comparaison, en enlevant le site outlier F1, plus aucune variable n'est significative (Tableau 4). Il n'y a donc plus de différence dans le nombre de nymphes récoltées entre les sites avec et sans Tamia, en absence de Chevreuil (Annexe 4 – Graphique 2).

Tableau 4 : Résultats statistiques de la présence des hôtes sur l'abondance des nymphes

Variables explicatives		Modèle 3 avec F1 Sans interaction		Modèle 3 sans F1 Sans interaction		Modèle 3 avec F1 Avec interaction		Modèle 3 sans F1 Avec interaction	
		Estimate	IRR	Estimate	IRR	Estimate	IRR	Estimate	IRR
Intercept		0.5729 *	1.77 *	0.5381 *	1.71 *	0.5394 *	1.71 *	0.5485 *	1.73 *
Tamia	Non	Référence		Référence		Référence		Référence	
	Oui	1.009.	2.74.	0.3921	1.48	1.2213 *	3.39 *	0.2785	1.32
Chevreuil	Non	Référence		Référence		Référence		Référence	
	Oui	-0.7088	0.49	-0.1745	0.84	-0.2856	0.75	-0.2943	0.75
Chevreuil oui - Tamia oui						-0.6944	0.5	0.2491	1.28
AIC		672.8		601		674.4		602.9	
p < 0.1 p < 0.05 * p < 0.01 ** p < 0.001 ***									

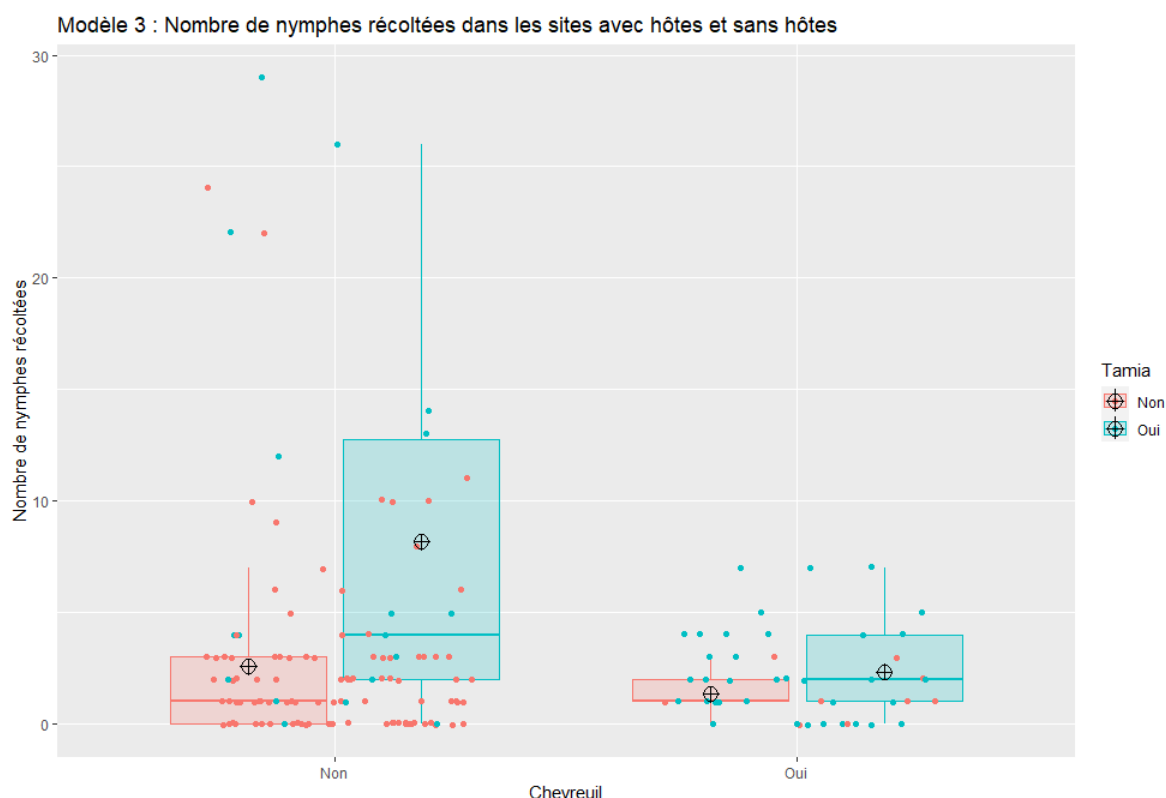


Figure 36 : Abondance des nymphes en fonction de la présence des hôtes : $N = 11$ sites sans hôtes, $N = 2$ sites (dont F1) avec uniquement des tamias, $N = 1$ site avec uniquement des chevreuils et $N = 4$ sites avec les deux hôtes.

3.2.3 Influence de la végétation arborescente avec le Tamia de Sibérie

Pour commencer, en réalisant le modèle sans l'interaction entre l'essence des arbres principaux et la présence du Tamia (Tableau 5), les essences de Chêne pédonculé (*Quercus robur*) et Hêtre commun (*Fagus sylvatica*) sont significatives par rapport Charme commun (*Carpinus betulus*). Le chêne et le hêtre ont respectivement un taux en moyenne 10.34 et 9.78 fois plus élevé de nymphes par rapport au charme commun. En général, on retrouve donc plus de nymphes dans les types d'essence Chêne pédonculé et Hêtre commun (Figure 37). Cependant, il y a qu'un seul site avec du Charme commun dans les sites de récoltes. Cela peut entraîner une surévaluation de la significativité des variables. En comparant avec les analyses sans le site outlier F1, le chêne pédonculé n'est plus significatif, tandis que le hêtre reste significativement différent du charme commun avec un taux supérieur de 10.38 fois plus de nymphes récoltées (Annexe 4 – Graphique 3). L'effet significatif de l'essence chêne pédonculé était alors principalement dû à la présence de ce site outlier (Tableau 5).

Tableau 5 : Résultats statistiques des essences et du *Tamia* de Sibérie sur l'abondance des nymphes

Variables explicatives		Modèle 4 avec F1 Sans interaction		Modèle 4 sans F1 Sans interaction		Modèle 4 avec F1 Avec interaction		Modèle 4 sans F1 Avec interaction	
		Estimate	IRR	Estimate	IRR	Estimate	IRR	Estimate	IRR
Intercept		-1.6276	0.2	-1.5983.	0.2.	-1.6115	0.2	-1.5946.	0.2.
Tamia	Non	Référence		Référence		Référence		Référence	
	Oui	0.4471	1.56	0.2001	1.22	0.0859	1.09	0.0743	1.08
Essence	Charme commun	Référence		Référence		Référence		Référence	
	Chêne pédonculé	2.3358 *	10.34 *	1.5865	4.89	1.151	3.16	1.1392	3.12
	Hêtre commun	2.2803 *	9.78 *	2.3403 *	10.38 *	2.3779 *	10.78 *	2.3758 *	10.76 *
Chêne pédonculé - Tamia oui						2.0282 *	7.6 *	0.933	2.54
AIC		671.6		595.4		670		596.6	

p < 0.1 ., p < 0.05 *, p < 0.01 **, p < 0.001 ***

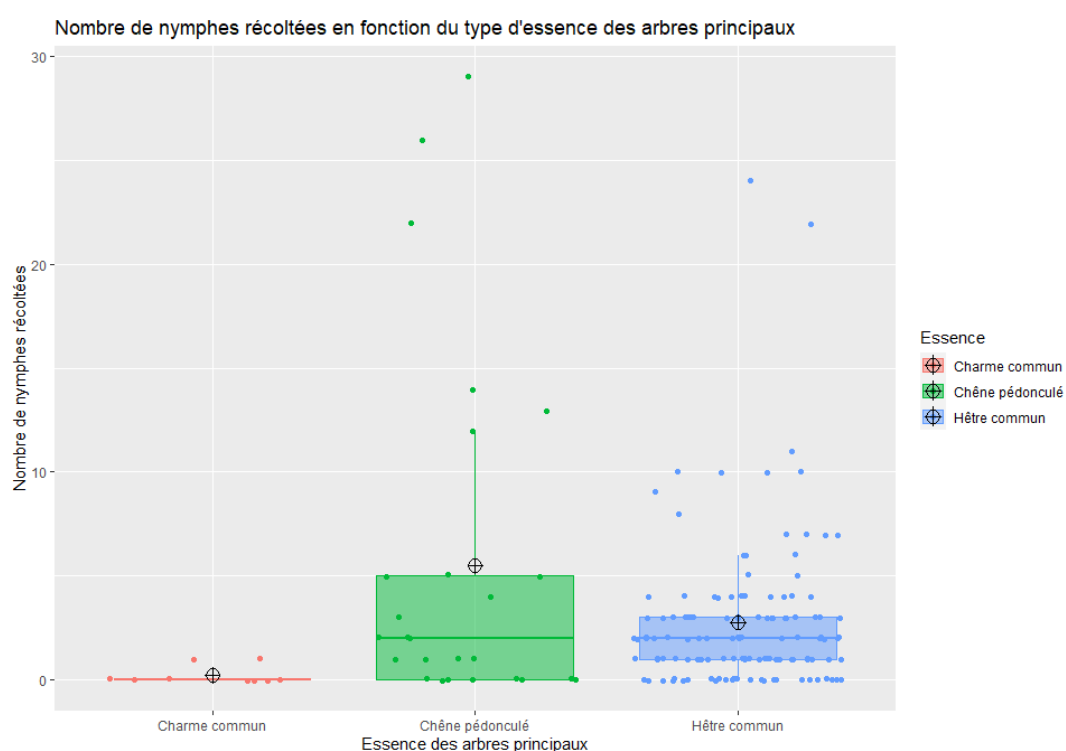


Figure 37 : Abondance des nymphes en fonction de l'essence des arbres principaux : N = 1 site pour le charme commun, N = 3 sites (dont F1) pour le chêne pédonculé et N = 10 sites avec le hêtre commun.

En intégrant l'interaction des essences et de la présence du *Tamia* dans le modèle (Tableau 5), seul le Hêtre commun est significatif. On a récolté un taux de 10.78 fois plus de nymphes dans les sites avec du Hêtre et sans *Tamia* que dans les sites références qui sont avec du Charme et sans *Tamia*. Il n'y a pas de différence entre le chêne et le charme en l'absence des tamias (Figure 38). L'interaction entre le Chêne pédonculé et la présence du *Tamia* est quant à elle significative. En additionnant les estimateurs du rongeur et de l'interaction avec le chêne, il y a un taux de 8.28 fois plus de nymphes dans les sites avec du chêne et des tamias que sans ce rongeur ($e^{0.0859+2.0282} = 8.28$).

Sans le site outlier F1 (Tableau 5), l'interaction entre le Chêne pédonculé et la présence des tamias n'est plus significative. Il n'y a donc plus d'influence de cette interaction sur l'abondance de nymphes récoltées. On garde cependant un taux équivalent de 10.76 fois plus de nymphes dans les sites avec du Hêtre que dans ceux avec du Charme, en absence de Tamia (Annexe 4 – Graphique 4).

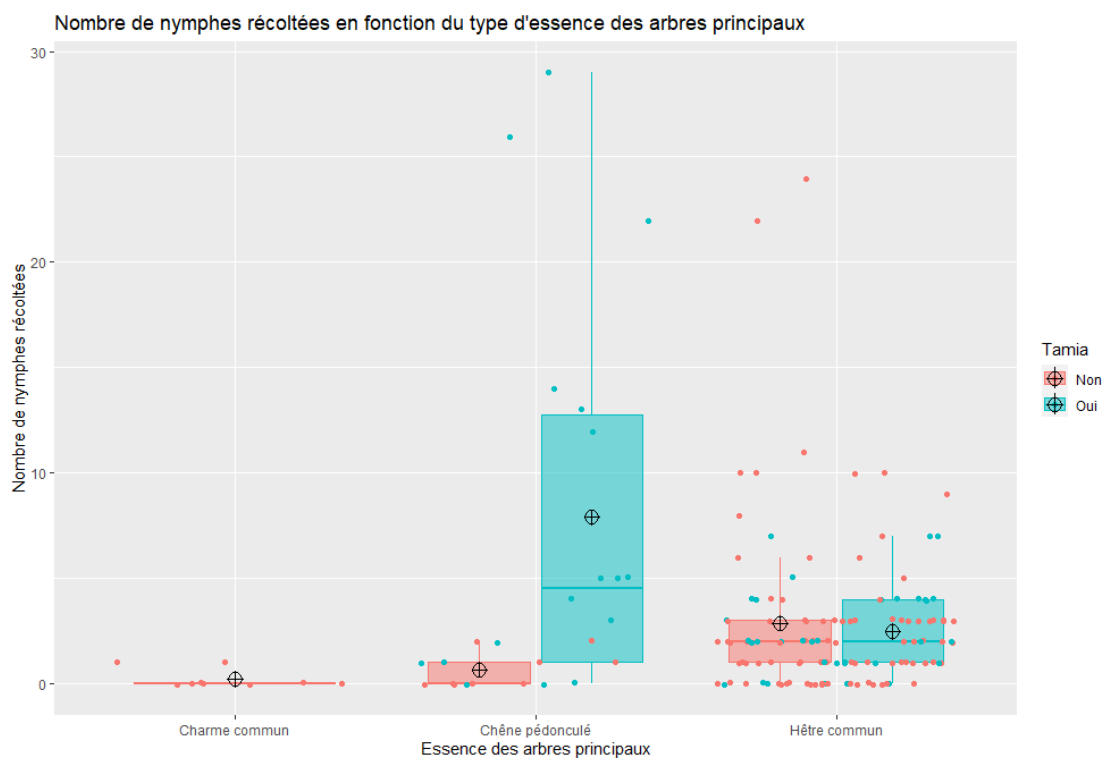


Figure 38 : Abondance des nymphes en fonction de l'interaction entre les essences et le Tamia : N = 1 site pour le charme sans Tamia, N = 1 site pour le chêne sans Tamia, N = 2 sites (dont F1) pour le chêne avec Tamia, N = 10 sites pour le hêtre sans Tamia et N = 4 sites pour le hêtre avec Tamia.

3.2.4 Influence du sous-bois avec le Tamia de Sibérie

En réalisant le modèle sans l'interaction entre le type de sous-bois et la présence du Tamia, aucune des variables n'est significatives (Tableau 6). Il n'y a donc pas de différences dans le nombre de nymphes récoltées entre les différents types de sous-bois (Figure 39). En enlevant le site outlier F1, seul le type de sous-bois Poacée (B) est à la limite de la significativité avec un nombre de nymphes supérieur d'un taux de 2.7 fois plus élevé par rapport à la végétation en cours de régénération (A) (Annexe 4 – Graphique 5).

Tableau 6 : Résultats statistiques du sous-bois et du *Tamia* de Sibérie sur l'abondance des nymphes

Variables explicatives		Modèle 5 avec F1 Sans interaction		Modèle 5 sans F1 Sans interaction		Modèle 5 avec F1 Avec interaction		Modèle 5 sans F1 Avec interaction	
		Estimate	IRR	Estimate	IRR	Estimate	IRR	Estimate	IRR
Intercept		-0.0393	0.96	0.1133	1.12	0.1042	1.11	0.0987	1.10
Tamia	Non	Référence		Référence		Référence		Référence	
	Oui	0.6004	1.82	0.183	1.20	0.237	1.27	0.2411	1.27
Sous-bois	Régénération (A)	Référence		Référence		Référence		Référence	
	Poacée (B)	1.0064	2.74	0.9946.	2.7.	1.1102.	3.03.	1.1141.	3.05.
	Ronce (C)	0.6301	1.88	0.6232	1.86	0.6875	1.99	0.6891	1.99
	Feuille morte (D)	0.252	1.29	0.2631	1.3	-0.0387	0.96	-0.0384	0.96
	Herbe (E)	0.5254	1.69	0.5761	1.78	0.833	2.3	0.8062	2.24
	Fougère (F)	0.8762	2.4	0.043	1.04	0.0622	1.06	0.0634	1.07
Régénération - Tamia oui		Référence		Référence		Référence		Référence	
Poacée - Tamia oui						-0.3669	0.69	-0.37	0.69
Ronce - Tamia oui						-0.1991	0.82	-0.2	0.82
Feuille morte - Tamia oui						0.8188	2.27	0.8193	2.27
Herbe - Tamia oui						-0.6212	0.54	-0.5941	0.55
Fougère - Tamia oui						2.2324 *	9.32 *	/	/
AIC		679.4		605.3		681.9		611.6	

p < 0.1 . , p < 0.05 *, p < 0.01 **, p < 0.001 ***

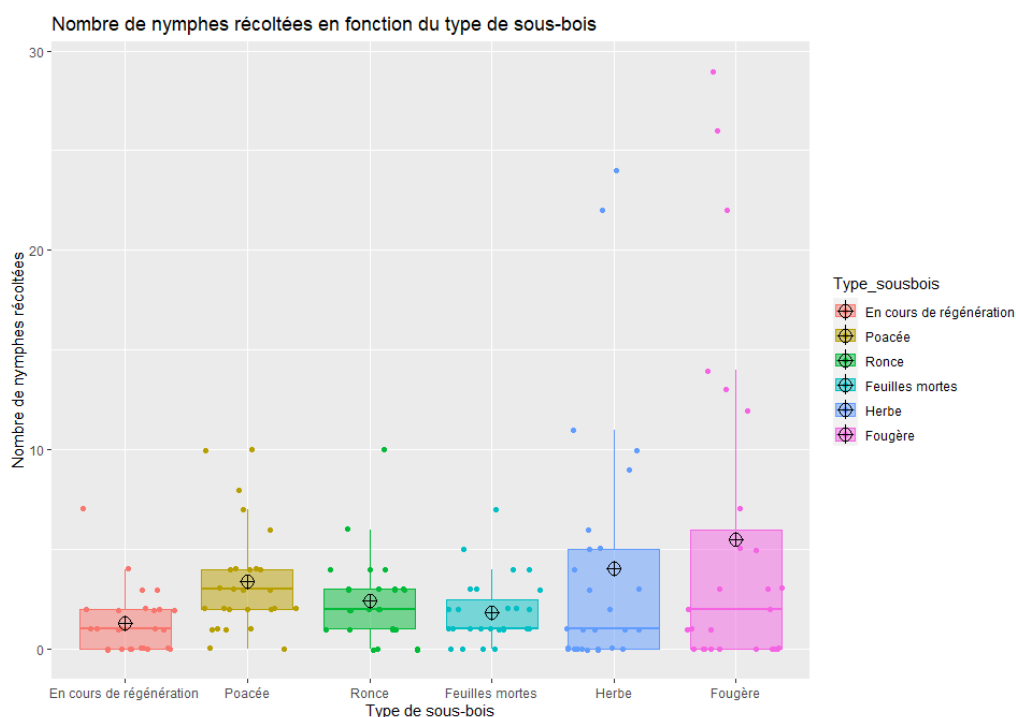


Figure 39 : Abondance des nymphes en fonction du sous-bois : N = 3 sites pour tous les sous-bois.

En prenant en compte l'interaction entre les variables, le type de sous-bois Poacée est à la limite de la significativité avec un nombre de nymphes supérieur d'un taux de 3.03 par rapport à la végétation en cours de régénération (A) en l'absence de *Tamia*. De plus, seule l'interaction du type de sous-bois fougère (F) avec la présence du *Tamia* est significative. En additionnant les estimateurs du rongeur et de l'interaction avec les fougères, il y a un taux de 11.815 fois plus de nymphes dans les sites avec des fougères et des tamias que sans ce rongeur

($e^{0.237+2.2324} = 11.815$). Pour les autres types de sous-bois, il n'y a pas d'effet de la présence du *Tamia* sur le nombre de nymphes récoltées (Figure 40). En enlevant le site outlier F1, il y a très peu de changement mis à part une légère augmentation à un taux 3.05 fois plus élevé de nymphes récoltées avec le type de sous-bois Poacée (B) par rapport à la végétation en cours de régénération (A). Il n'y a également plus d'interaction entre les tamias et les fougères car le site F1, seul représentant du type de sous-bois fougère avec la présence du *Tamia*, a été enlevé (Tableau 6) (Annexe 4 - Graphique 6).

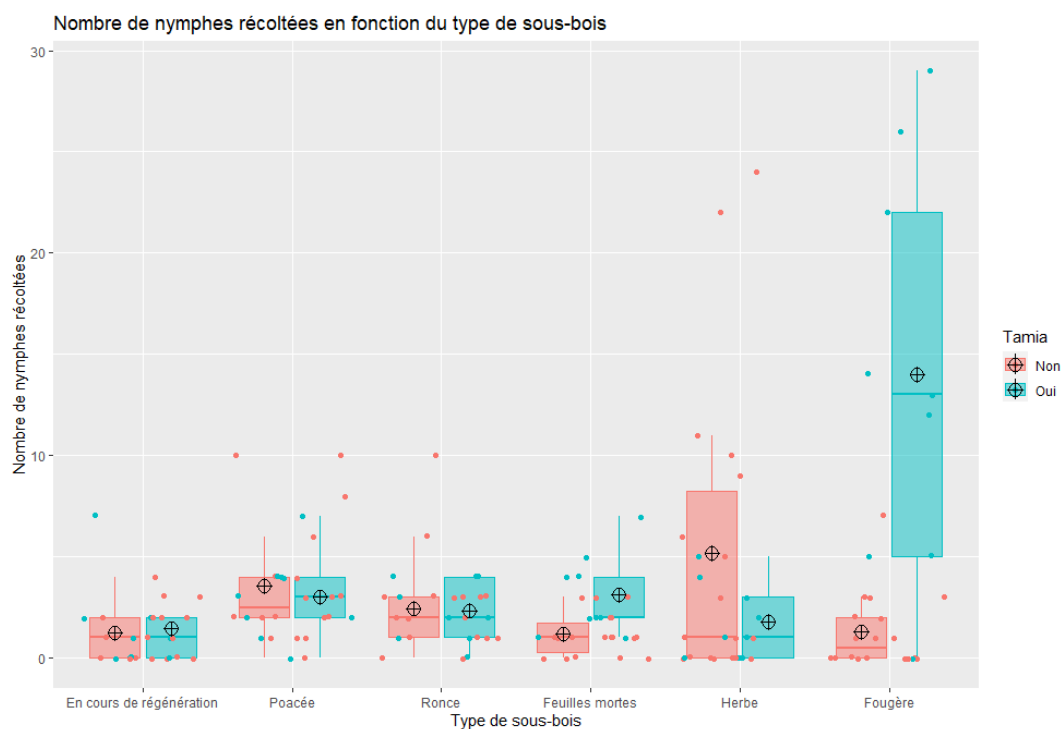


Figure 40 : Abondance de nymphes en fonction de l'interaction entre les sous-bois et le *Tamia* : $N = 2$ sites pour les sous-bois sans *Tamia* et $N = 1$ site pour les sous-bois sans *Tamia*.

3.2.5 Résumé

En résumé, l'abondance des nymphes récoltées au cours de l'expérience n'est pas significativement associée à la présence des hôtes (*Tamia* de Sibérie et Chevreuil) ou au type de sous-bois, contrairement à mes attentes. Il y a cependant une plus grande abondance de nymphes dans le site avec des fougères et des tamias qu'en leurs absences, ce qui est logique vu que ce site est l'outlier F1. De plus, les types d'essence Chêne pédonculé et Hêtre commun possèdent plus de nymphes que le Charme commun, de même que pour la présence du rongeur dans les sites avec du chêne. Le site F1 est un site Fougère avec *Tamia*, sans Chevreuil et du Chêne pédonculé comme essence principale. En l'enlevant des analyses, plus aucune variable n'influence l'abondance des nymphes mis à part le type d'essence Hêtre commun.

3.3 Abondance des larves récoltées

Un total de 4296 larves a été récolté sur l'ensemble des sites d'expérience en Forêt de Soignes. Sur la figure 41, représentant le nombre de larves récoltées dans les sites tout au long de l'expérience, on remarque que le site F1 regroupe une grande abondance de larves par rapport aux autres. Au total, le site F1 compte 2010 larves récoltées lors des neuf événements de récoltes. À sa suite, les sites A2, E1 et C1 comptent respectivement 563, 492 et 352 larves. Quels sont les facteurs biotiques et abiotiques qui vont exercer une influence sur cette abondance ?

Carte proportionnelle du nombre de larves récoltées dans les sites d'expérience au niveau de la zone d'étude

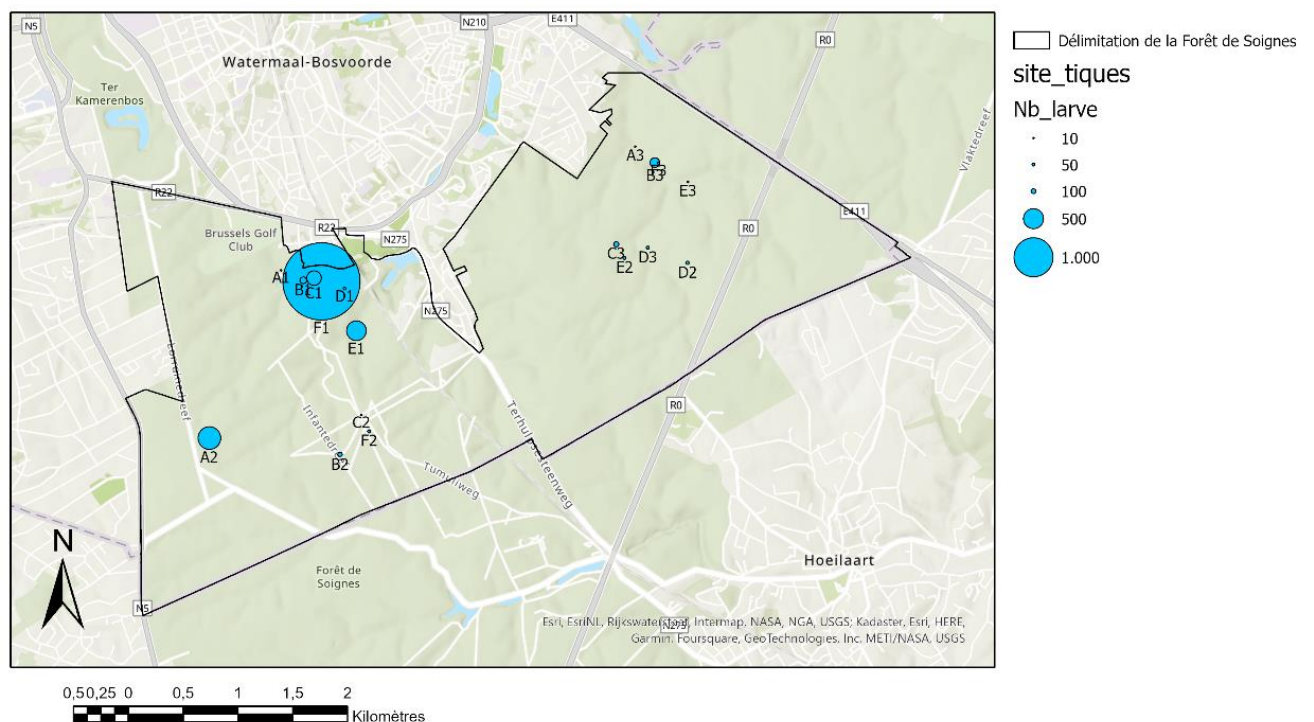


Figure 41 : Carte de l'abondance des larves dans la zone d'étude

3.3.1 Influence de la présence du *Tamias* de Sibérie

La variable explicative de la présence du *Tamias* sur le nombre de larves récoltées en Forêt de Soignes est significative avec une p-valeur de 0.0751 (Tableau 7). On rejette donc l'hypothèse nulle. On récolte en moyenne plus de larves en présence de tamias que sans, avec un taux d'incidence 3.28 fois plus élevé (Figure 42). En enlevant le site outlier F1, il n'y a plus de différence significative entre le nombre de larves récoltées en présence ou en absence de ce rongeur (Annexe 4 - Graphique 7).

Tableau 7 : Résultats statistiques de la présence du *Tamia* de Sibérie sur l'abondance des larves

Variables explicatives		Modèle 2 avec F1		Modèle 2 sans F1	
		Estimate	IRR	Estimate	IRR
Intercept		1.7775 ***	5.91 ***	1.7873 ***	5.97 ***
Tamia	Non	Référence		Référence	
	Oui	1.1874.	3.28.	0.6865	1.99
AIC		1096.4		972.8	
p < 0.1. , p < 0.05 *, p < 0.01 **, p < 0.001 ***					

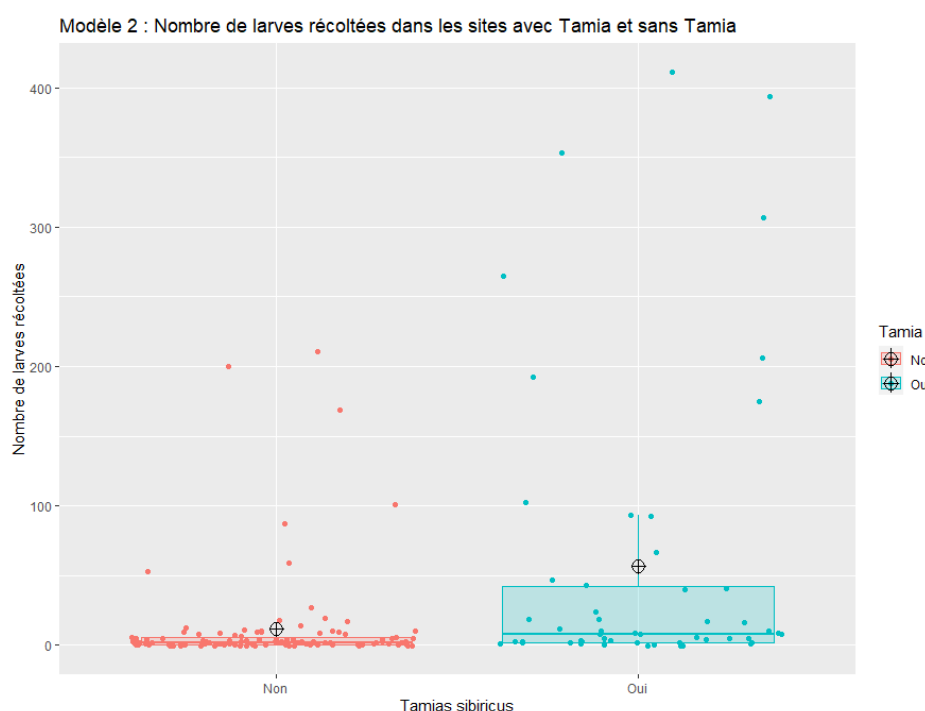


Figure 42 : Abondance des larves en fonction de la présence du *Tamia* de Sibérie : N = 12 sites sans *Tamia* et N = 6 sites avec *Tamia*

3.3.2 Influence de la présence des hôtes (*Tamia* de Sibérie et Chevreuil)

Sans prendre en compte l'interaction entre les hôtes, par rapport à la référence qui sont les sites sans hôtes, il y a une diminution de 85% du nombre de larves avec la présence du Chevreuil et une augmentation d'un taux de 9.92 fois avec la présence du *Tamia* (Tableau 8). Avec l'interaction entre les hôtes, il y a une différence significative entre les sites avec et sans *Tamia*, en absence de Chevreuil. Les sites en présence du rongeur ont un taux 14.28 fois plus élevé de larves que sans le *Tamia*. Il n'y a pas d'influence de la présence de chevreuil ainsi que pour l'interaction entre les hôtes. La présence des deux hôtes simultanément n'influence pas le nombre de larves récoltées par rapport à leur absence (Figure 43). En enlevant le site outlier F1, seule la présence des tamias est significative, avec en moyenne un taux de 5.21 fois plus de larves dans les sites avec des tamias, en absence de chevreuils (Tableau 8) (Annexe 4 – Graphique 8).

Tableau 8 : Résultats statistiques de la présence des hôtes sur l'abondance des larves

Variables explicatives		Modèle 3 avec F1 Sans interaction		Modèle 3 sans F1 Sans interaction		Modèle 3 avec F1 Avec interaction		Modèle 3 sans F1 Avec interaction	
		Estimate	IRR	Estimate	IRR	Estimate	IRR	Estimate	IRR
Intercept		1.9469 ***	7.01 ***	1.9036 ***	6.71 ***	1.8909 ***	6.63 ***	1.8932 ***	6.64 ***
Tamia	Non	Référence		Référence		Référence		Référence	
	Oui	2.2945 **	9.92 **	1.6498.	5.21.	2.6585 ***	14.28 ***	1.7721	5.88
Chevreuil	Non	Référence		Référence		Référence		Référence	
	Oui	-1.9132 *	0.15 *	-1.3489	0.26	-1.2197	0.3	-1.2217	0.29
Chevreuil oui - Tamia oui						-1.1577	0.31	0.2491	-0.2678
AIC		1094.4		972.5		1094.4		974.5	
p < 0.1 . . p < 0.05 * . p < 0.01 ** . p < 0.001 ***									

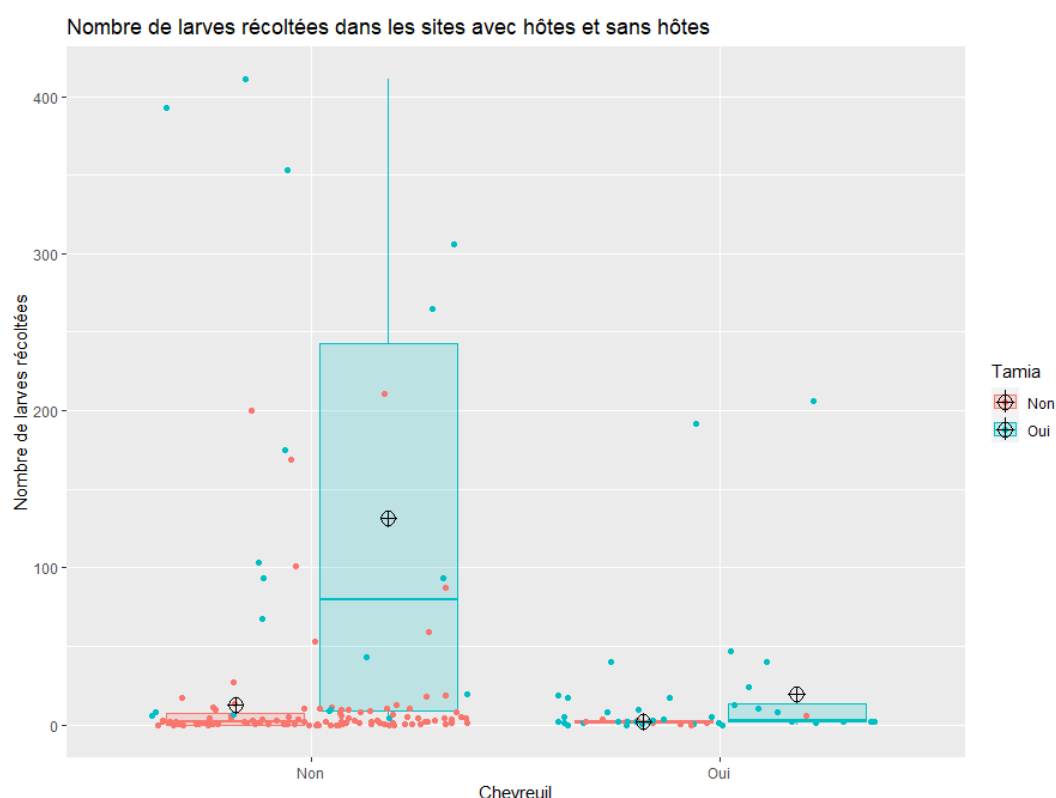


Figure 43 : Abondance des larves en fonction de la présence des hôtes : N = 11 sites sans hôtes, N = 2 sites (dont F1) avec uniquement des tamias, N = 1 site avec uniquement des chevreuils et N = 4 sites avec les deux hôtes.

3.3.3 Influence de la végétation arborescente avec le Tamia de Sibérie

Pour commencer, en réalisant le modèle sans l'interaction entre l'essence des arbres principaux et la présence du Tamia, aucune de nos variables n'est significative (Tableau 9). On n'a donc pas de différence dans le nombre de larves récoltées entre les différents types d'essence, que ce soit avec ou sans le site outlier F1 (Figure 44) (Annexe 4 – Graphique 9).

Tableau 9 : Résultats statistiques de l'essence et du Tamia sur l'abondance des larves

Variables explicatives		Modèle 4 avec F1 Sans interaction		Modèle 4 sans F1 Sans interaction		Modèle 4 avec F1 Avec interaction		Modèle 4 sans F1 Avec interaction	
		Estimate	IRR	Estimate	IRR	Estimate	IRR	Estimate	IRR
Intercept		0.7252	2.07	0.7283	2.07	0.7281	2.07	0.7283	2.07
Tamia	Non	Référence		Référence		Référence		Référence	
	Oui	0.8932	2.44	0.0285	1.03	0.0265	1.03	0.0285	1.03
Essence	Charme commun	Référence		Référence		Référence		Référence	
	Chêne pédonculé	1.858	6.41	-0.8881	0.41	-0.8884	0.41	-0.8881	0.41
	Hêtre commun	1.0861	2.96	1.358	3.89	1.3562	3.88	1.358	3.89
Chêne pédonculé - Tamia oui						4.8523 ***	128.03 ***	4.1318 **	62.29 **
AIC		1098.9		971.7		1091.2		971.7	

p < 0.1 ., p < 0.05 *, p < 0.01 **, p < 0.001 ***

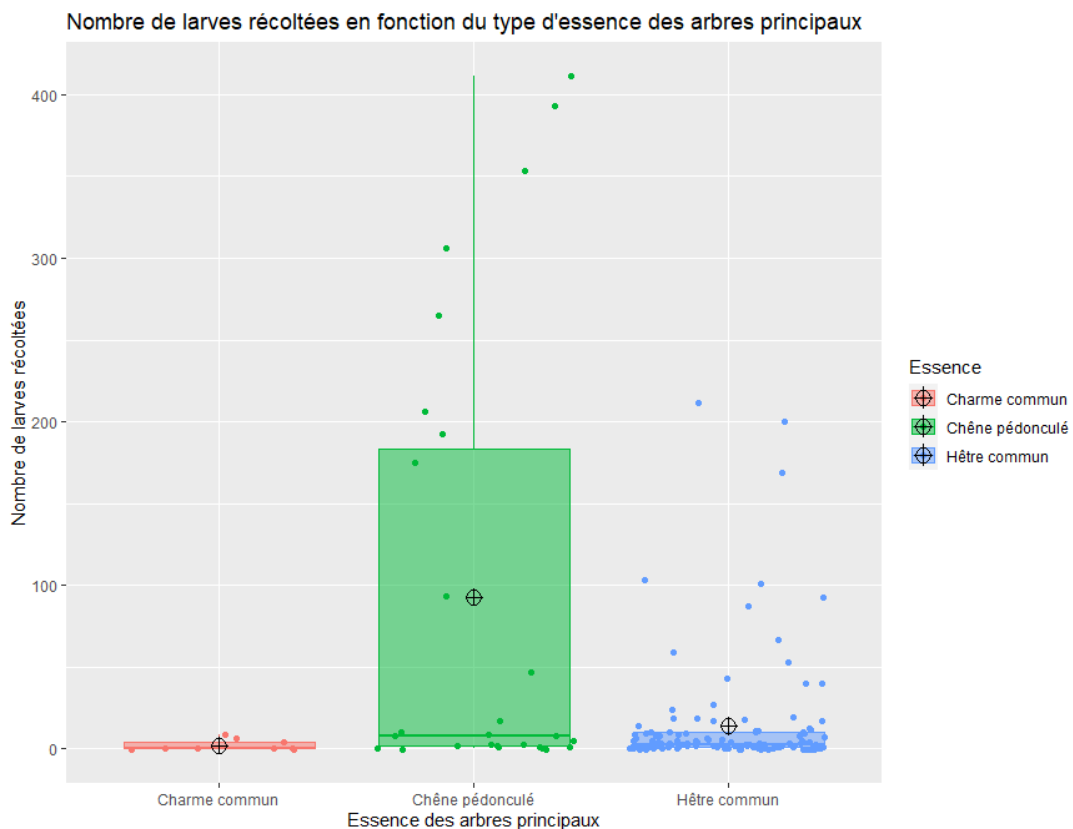


Figure 44 : Abondance des larves en fonction des essences des arbres principaux : : N = 1 site pour le charme commun, N = 3 sites (dont F1) pour le chêne pédonculé et N = 10 sites avec le hêtre commun

En prenant en compte l'interaction entre les variables, seule l'interaction entre les sites avec du Chêne pédonculé et la présence du Tamia est significative (Tableau 9). En additionnant les estimateurs pour l'interaction, il y a une augmentation d'un taux de 131.473 fois plus de larves dans les sites avec les tamias, contrairement aux sites sans les rongeurs ($e^{0.0265+4.8523} = 131.473$) (Figure 45). Sans le site outlier F1, la conclusion reste la même avec une augmentation d'un taux de 64.091 fois plus de larves dans les sites avec Tamia ($e^{0.0285+4.1318} = 64.091$) (Annexe 4 – Graphique 10).

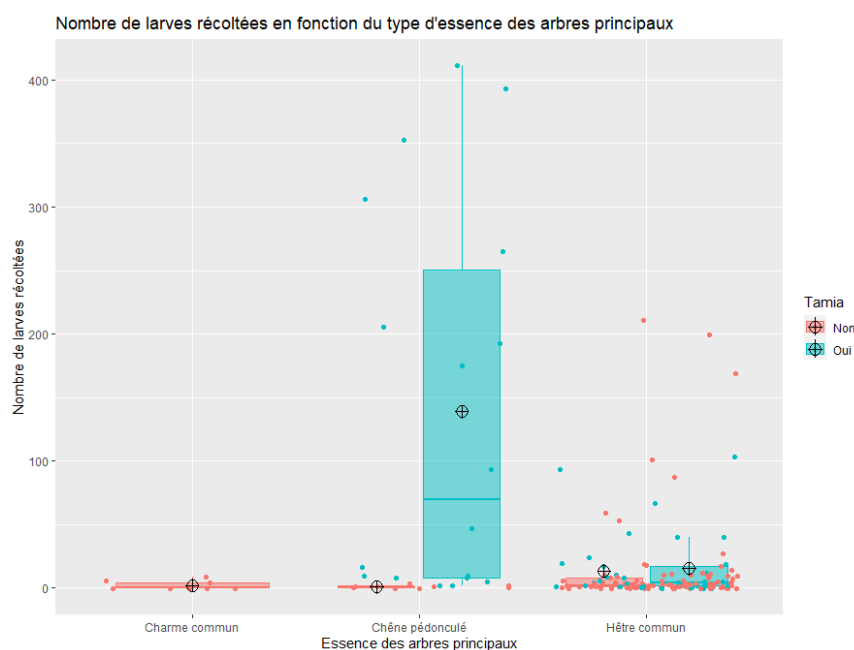


Figure 45 : Abondance des larves en fonction de l'interaction entre les essences et le Tamia : $N = 1$ site pour le charme sans Tamia, $N = 1$ site pour le chêne sans Tamia, $N = 2$ sites (dont F1) pour le chêne avec Tamia, $N = 10$ sites pour le hêtre sans Tamia et $N = 4$ sites pour le hêtre avec Tamia.

3.3.4 Influence du sous-bois avec le Tamia de Sibérie

Pour commencer, en réalisant le modèle sans l'interaction entre les types de sous-bois et la présence du Tamia, aucune variable n'est significative (Tableau 10). Il n'y a pas de différence entre le nombre de larves récoltées entre les différents types de sous-bois, que ce soit avec ou sans le site outlier F1 (Figure 46) (Annexe 4 – Graphique 11).

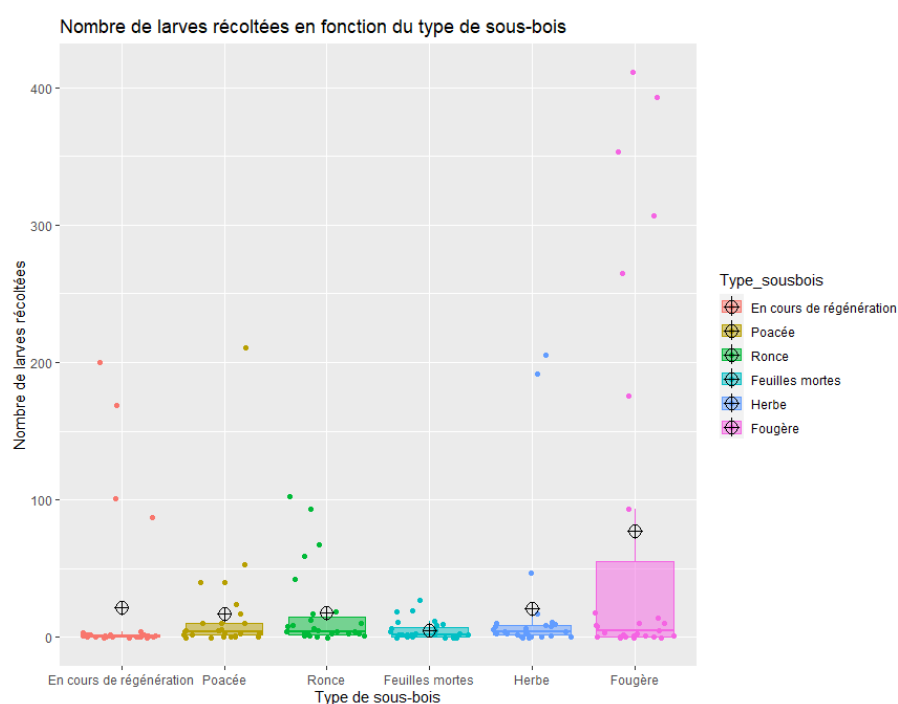


Figure 46 : Abondance des larves en fonction du type de sous-bois : $N = 3$ sites pour tous les sous-bois

Tableau 10 : Résultats statistiques du sous-bois et du Tamia sur l'abondance des larves

Variables explicatives		Modèle 5 avec F1 Sans interaction		Modèle 5 sans F1 Sans interaction		Modèle 5 avec F1 Avec interaction		Modèle 5 sans F1 Avec interaction	
		Estimate	IRR	Estimate	IRR	Estimate	IRR	Estimate	IRR
Intercept		1.0975	3	1.3287.	3.78.	3.4535 ***	31.62 ***	3.4535 ***	31.61 ***
Tamia	Non	Référence		Référence		Référence		Référence	
	Oui	1.1758	3.24	0.584	1.79	-3.2528 ***	0.04 ***	-3.2528 ***	0.04 ***
Sous-bois	Régénération (A)	Référence		Référence		Référence		Référence	
	Poacée (B)	1.2717	3.57	1.2374	3.45	-0.5977	0.55	-0.5977	0.55
	Ronce (C)	0.8089	2.25	0.7919	2.21	-1.4918 **	0.22 **	-1.4918 **	0.22 **
	Feuille morte (D)	0.1532	1.17	0.1175	1.12	-1.7288 ***	0.18 ***	-1.7288 ***	0.18 ***
	Herbe (E)	0.63	1.88	0.6162	1.85	-2.2007 ***	0.11 ***	-2.2007 ***	0.11 ***
	Fougère (F)	1.2354	3.44	0.0109	1.01	-2.0812 ***	0.12 ***	-2.0812 ***	0.12 ***
Régénération - Tamia oui		Référence		Référence		Référence		Référence	
Poacée - Tamia oui						3.1834 ***	24.13 ***	3.1834 ***	24.13 ***
Ronce - Tamia oui						4.9576 ***	142.25 ***	4.9576 ***	142.25 ***
Feuille morte - Tamia oui						3.0197 **	20.49 **	3.0197 **	20.49 **
Herbe - Tamia oui						6.0013 ***	403.97 ***	6.0013 ***	403.96 ***
Fougère - Tamia oui						7.2892 ***	1464.39 ***	/	/
AIC		1103.8		980.1		1095.8		976.2	
p < 0.1 . , p < 0.05 * , p < 0.01 ** , p < 0.001 ***									

En prenant en compte l'interaction entre les variables, la présence du Tamia est significative. Cela indique que dans la végétation en cours de régénération (A), il y a une diminution de 96 %, soit un taux de 0.04, lorsqu'il y a la présence du Tamia. De plus, en l'absence de ce rongeur, les types de sous-bois Ronce (C), Feuilles mortes (D), Herbe (E) et Fougère (F) ont une diminution respective de 78 %, 82 %, 89 % et 88 % du nombre de larves récoltées par rapport à la végétation en cours de régénération (A). En ce qui concerne les interactions entre les types de sous-bois et la présence du Tamia, elles sont toutes significatives (Figure 47) (Tableau 10). En additionnant les estimateurs des interactions, il y a une diminution de 7 % et 21 % du nombre de larves en présence des tamias dans les types de sous-bois Poacées ($e^{-3.2528+3.1834} = 0.93$) et feuilles mortes ($e^{-3.2528+3.0197} = 0.79$). Au contraire, les sous-bois Ronce, Herbe et Fougère possèdent respectivement un taux de 5.5 ($e^{-3.2528+4.9576} = 5.5$), 15.62 ($e^{-3.2528+6.0013} = 15.62$) et 56.62 ($e^{-3.2528+7.2892} = 56.62$) fois plus de larves en présence qu'en absence de ce rongeur. En enlevant le site outlier F1, les conclusions sont les mêmes mis à part qu'il n'y a pas de données dans l'interaction des tamias avec les fougères (Annexe 4 – Graphique 12).

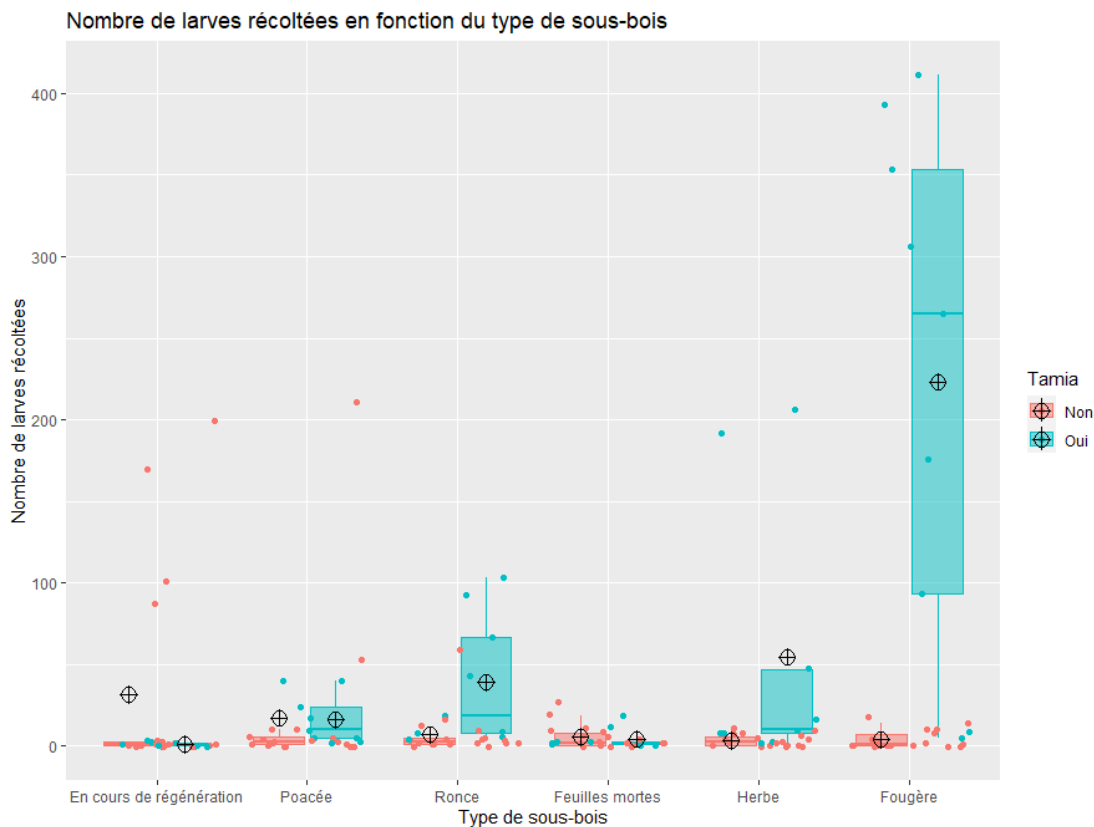


Figure 47 : Abondance des larves en fonction de l'interaction entre le sous-bois et le Tamia : : N = 2 sites pour les sous-bois sans Tamia et N = 1 site pour les sous-bois sans Tamia.

3.3.5 Résumé

En résumé, la présence du Tamia de Sibérie va augmenter le nombre de larves récoltées, que ce soit avec ou sans l'interaction entre les hôtes. Il y a également une diminution de ce nombre avec la présence du chevreuil uniquement. Sans le site F1, la présence des hôtes n'exerce plus d'influence sur l'abondance des larves récoltées. De plus, les types d'essences des arbres principaux n'ont pas d'effet sur le nombre de larves, contrairement aux nymphes. Il y a cependant plus de larves dans les sites avec du chêne et des tamias que sans ce rongeur. Cette observation ne change pas quand on enlève le site F1, indiquant que les sites avec du chêne et des tamias auront en général une grande abondance de larves. Pour finir, les types de sous-bois végétation en cours de régénération (A), Poacée (B) et Feuilles mortes (D) ont une diminution du nombre de larves à la suite de la présence du Tamia alors que pour les ronces (C), l'herbe (E) et les fougères (F), il y a une augmentation suite à la présence de ce rongeur.

3.4 Abondance des tiques infectées

Parmi l'ensemble des nymphes et des tiques adultes récoltées sur le terrain, 46 d'entre elles sont porteuses de la bactérie *Borrelia burgdorferi* sensu lato, soit un pourcentage de 8.8 % de tiques infectées au sein des sites d'étude. Plus précisément, 8.6 % des nymphes et 12.5 % des tiques adultes récoltées sont infectées. On les retrouve principalement au niveau du site F1 avec 19 tiques porteuses de la bactérie ainsi que les sites D1 et E2 avec 5 tiques infectées chacun (Figure 48).

Carte proportionnelle du nombre de tiques infectées dans les sites d'expérience au niveau de la zone d'étude

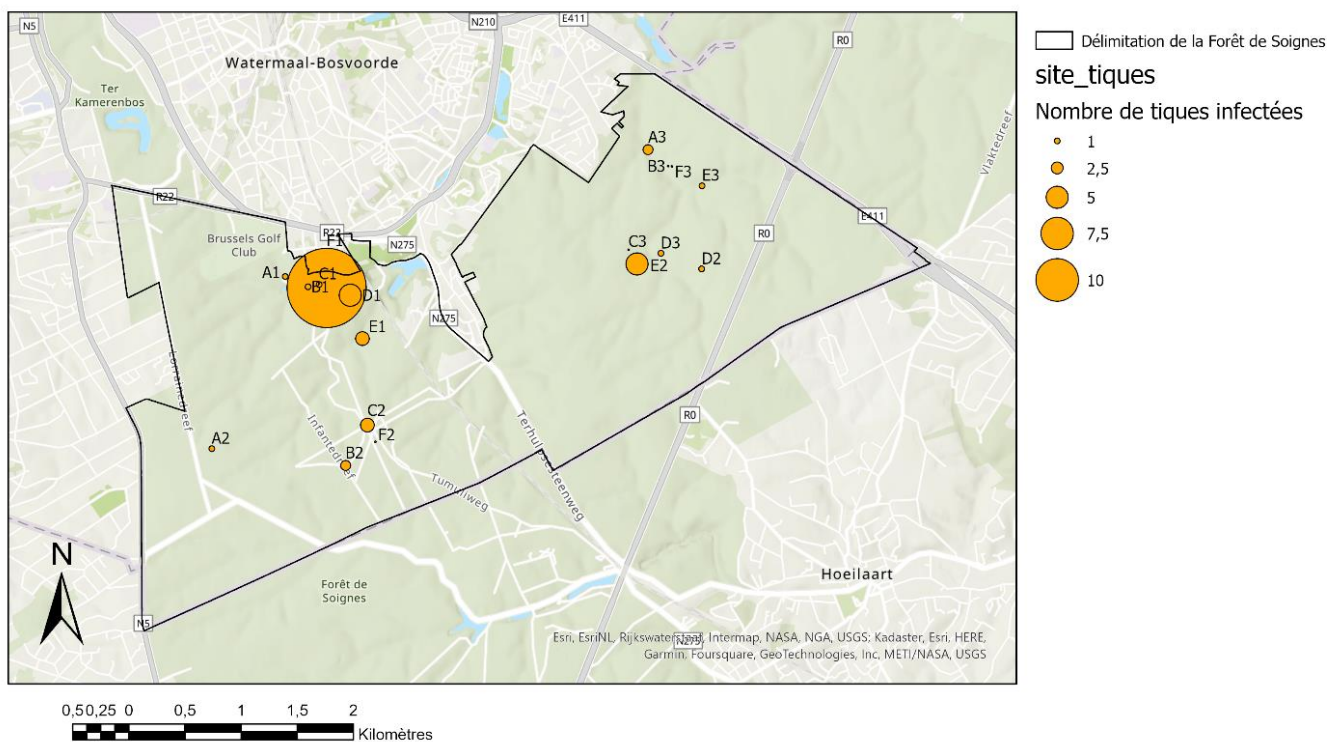


Figure 48 : Carte de l'abondance des tiques infectées par *Borrelia burgdorferi* s.l dans la zone d'étude

Graphiquement, il y a plus de tiques infectées en présence du *Tamias* de Sibérie, comme le démontre la figure 49, représentant le nombre total de tiques infectées récoltées lors de l'expérience. Au total, 30 tiques infectées ont été récoltées dans les sites en présence du *Tamias* comparé aux 16 tiques dans les sites sans *Tamias*.

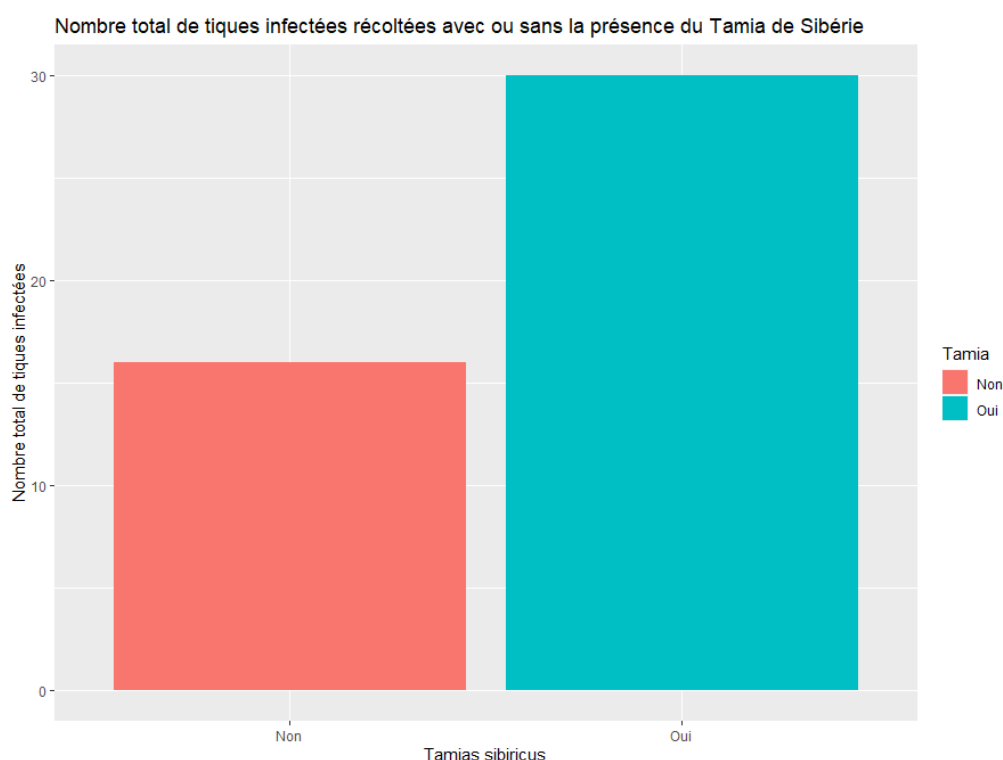


Figure 49 : Nombre total de tiques infectées en fonction de la présence du Tamia de Sibérie : : N = 12 sites sans Tamia et N = 6 sites avec Tamia

Statistiquement, il y a plus de tiques infectées par la bactérie *Borrelia* dans les sites où le Tamia de Sibérie est présent que dans ceux où il ne l'est pas (Tableau 11). En effet, il y a en moyenne 0.11 tiques infectées dans les sites sans tamias et un taux de 3.14 fois plus de tiques infectées ($e^{1.1433} = 3.14$) dans les sites en présence de tamias (Figure 50). En comparaison avec le modèle en enlevant le site outlier F1, on remarque que la variable tamia n'est plus significative et que, sans cet outlier, il n'y a pas de différence dans la moyenne de tiques infectées avec et sans tamias (Annexe 4 - Graphique 13).

Tableau 11 : Résultats statistiques de la présence des hôtes sur l'abondance des tiques infectées

Variables explicatives		Modèle 6a avec F1		Modèle 6a sans F1		Modèle 6b avec F1		Modèle 6b sans F1	
		Estimate	IRR	Estimate	IRR	Estimate	IRR	Estimate	IRR
Intercept		-2.2458 ***	0.11 ***	-2.0393 ***	0.13 ***	-2.2959 ***	0.1 ***	-2.1154 ***	0.12 ***
Tamia	Non	Référence		Référence		Référence		Référence	
	Oui	1.1433 *	3.14 *	0.5164	1.68	1.9627 **	7.12 **	-0.1499	0.86
Chevreuil	Non	Référence		Référence		Référence		Référence	
	Oui					1.0924	2.98	0.9625	2.62
Chevreuil oui - Tamia oui						-2.2301.	0.11.	-0.0532	0.95
AIC		198.6		155.2		199.8		157.1	
p < 0.1 . , p < 0.05 *, p < 0.01 **, p < 0.001 ***									

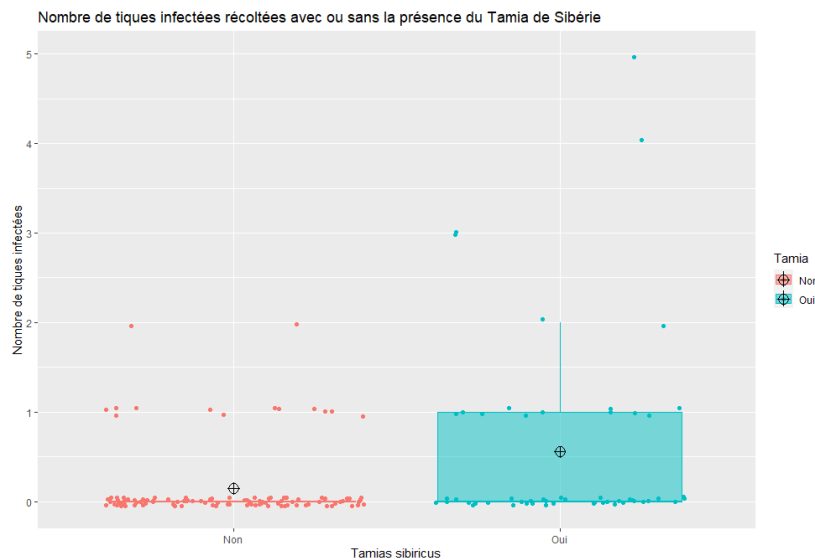


Figure 50 : Abondance de tiques infectées par *Borrelia burgdorferi* s.l en fonction de la présence du Tamia de Sibérie : N = 12 sites sans Tamia et N = 6 sites avec Tamia

En mettant en relation la présence des deux hôtes (un qui est compétent et l'autre incompétent), on obtient une valeur significative sur la présence du Tamia de Sibérie quand il n'y a pas de chevreuils et donc d'hôtes compétents (Tableau 11). En absence de chevreuil, la présence du Tamia amène un taux de 7.12 fois plus de tiques infectées par *B. burgdorferi* sensu lato que lorsqu'il n'y en a pas. Dans les sites avec des tamias, il y a une diminution de 68 % du nombre de tiques quand le chevreuil est aussi présent par rapport à son absence ($e^{1.0924-2.2301} = 0.32$) et dans les sites avec des chevreuils, il y a une diminution de 23 % en présence du Tamia par rapport à son absence ($e^{1.9627-2.2301} = 0.77$) (Figure 51). Sans le site outlier F1, il n'y a pas de valeurs significatives (Annexe 4 - Graphique 14).

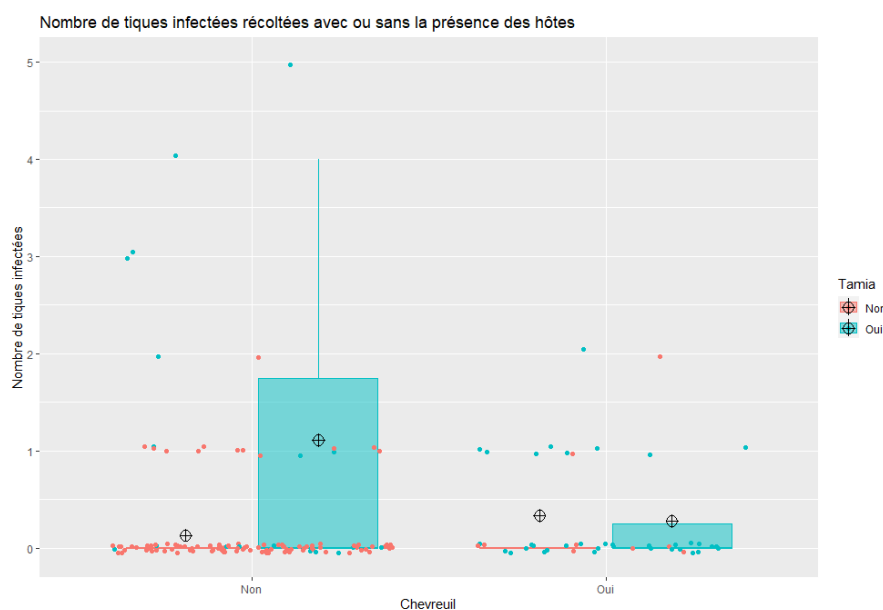


Figure 51 : Abondance des tiques infectées par *Borrelia burgdorferi* s.l en fonction de la présence des hôtes

Différentes génoespèces de la bactérie *Borrelia* ont été trouvées au sein des tiques infectées. 58.6 % provenaient de *Borrelia afzelii*, 28.3 % de *Borrelia sensu stricto*, 6.5 % de *Borrelia garinii bavariensis*, 4.4 % de *Borrelia garinii* et 2.2 % provenaient de séquences non identifiables (Figure 52).

Diagramme circulaire du pourcentage des génoespèces de la bactérie *Borrelia* provenant des tiques infectées en Forêt de Soignes

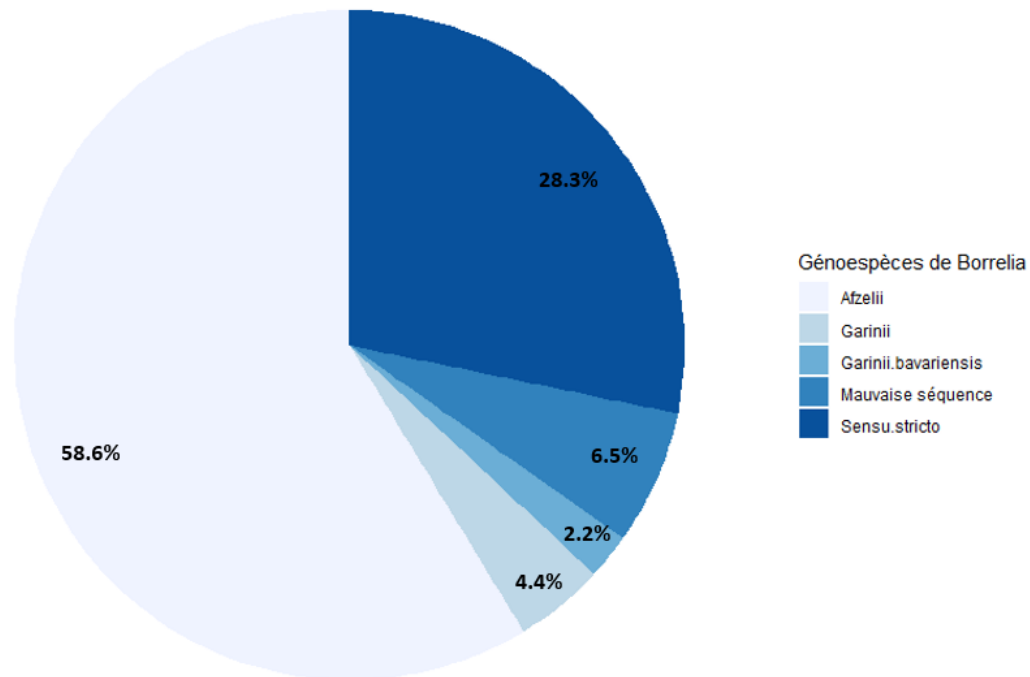


Figure 52 : Diagramme circulaire des génoespèces de *Borrelia* trouvées en Forêt de Soignes

Un plus grand pourcentage des tiques est infecté par la bactérie *B. afzelii*, la génoespèce *Borrelia* qui se transmet principalement par les rongeurs. Cela pourrait être la conséquence de la présence du *Tamias* de Sibérie dans les sites de récoltes. Cependant, en ce qui concerne l'abondance des tiques infectées par la bactérie *B. afzelii*, il n'y a pas de différence significative entre les sites avec et sans *tamias* (Figure 53). Les valeurs sont non significatives, que ce soit avec ou sans l'outlier F1 (Tableau 12). Il y a donc des tiques infectées par *B. afzelii* dans des zones de la forêt qui ne comportent pas ce rongeur. Cette observation peut s'expliquer par la présence d'autres rongeurs pouvant faire office d'hôtes pour les tiques comme les campagnols, les rats, les souris ou les écureuils roux dans la Forêt de Soignes.

Tableau 12 : Résultats statistiques de la présence du *Tamias* de Sibérie sur l'abondance des tiques infectées par *B. afzelii*

Variables explicatives		Modèle 7 avec F1		Modèle 7 sans F1	
		Estimate	IRR	Estimate	IRR
Intercept		-2.8518 ***	0.06 ***	-2.5541 ***	0.08 ***
Tamia	Non	Référence		Référence	
	Oui	0.8998	2.46	-0.048	0.95
AIC		142.5		103.9	
p < 0.1 . . p < 0.05 *. p < 0.01 **. p < 0.001 ***					

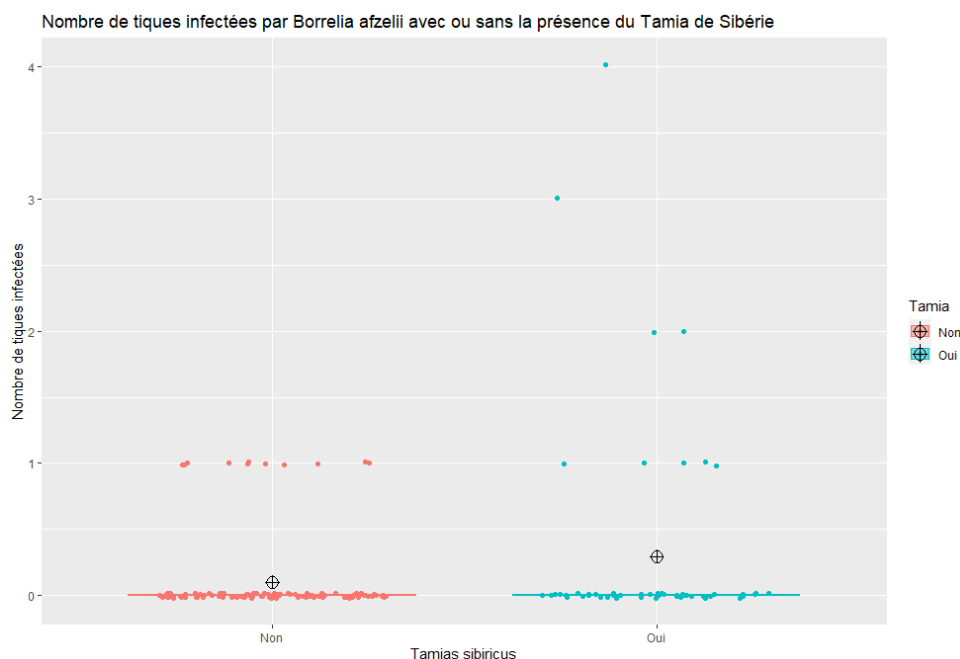


Figure 53 : Abondance des tiques infectées par *B. afzelii* en fonction de la présence du *Tamias* de Sibérie

3.5 Modèles complets

3.5.1 Modèle complet de l'abondance des nymphes récoltées

Les variables qui vont exercer une influence sur l'abondance des nymphes récoltées dans la zone d'étude en Forêt de Soignes sont la saison, l'essence des arbres principaux et la couverture nuageuse (Annexe 5 - Modèle Nymphes). Pour commencer, la variable saison est à la limite d'être significative statistiquement. Il y a une tendance indiquant un taux de 1.38 fois plus de nymphes au printemps qu'en été (Annexe 6 - Graphique 1). Ensuite, il y a une différence significative entre les différents types d'essence des arbres principaux, analysés préalablement dans le modèle 4 de l'influence de la végétation arborescente sur l'abondance des nymphes (Figure 37). On retrouve plus de nymphes dans un milieu avec du chêne pédonculé, puis du hêtre commun, avec respectivement un taux de 12.98 et 10.37 fois plus de nymphes par rapport

au milieu avec du charme commun. Pour finir, la couverture nuageuse va aussi exercer une influence sur l'abondance de nymphes. En moyenne, on a récolté plus de nymphes quand la couverture nuageuse était de 0-19 % ainsi que de 60-79 % avec un taux respectif de 1.52 et 1.93 fois plus de nymphes par rapport à un ciel sans nuages. Malgré une moyenne graphiquement différente pour la couverture de 40-59 % de nuages, la valeur est à la limite du significatif car il y a peu de données affirmant une vraiment différence dans l'abondance de nymphes avec ce pourcentage par rapport à un ciel sans nuages (Annexe 6 - Graphique 2).

3.5.2 Modèle complet de l'abondance des larves récoltées

Les variables qui vont exercer une influence sur l'abondance des larves récoltées dans la zone d'étude en Forêt de Soignes sont la saison, la présence d'une réserve naturelle, la taille du sous-bois, le type de peuplement et l'humidité (Annexe 5 - Modèle Larves). Premièrement, comme pour l'abondance des nymphes, on récolte plus de larves au printemps qu'en été avec un taux de 2.57 fois plus de larves (Annexe 6 - Graphique 3). Deuxièmement, il y a un taux de 2.4 fois plus de larves au sein d'une réserve naturelle qu'en dehors (Annexe 6 - Graphique 4). Troisièmement, il y a des différences dans leur abondance en fonction du type de peuplement. Les peuplements Forêt alluviale et chênaie mélangé (FACM), la Hêtraie en cours de conversion en peuplement mélangé (HCCPM), la Hêtraie régulière (HR), la Hêtraie cathédrale (HC) et les prairies/clairière (P/C) comportent significativement plus de larves que le peuplement Chêne cathédrale avec des taux respectifs de 33.92, 11.19, 17.86, 17.83 et 4.42 (Annexe 6 - Graphique 5). Pour finir, il y a une hausse de l'abondance de 4 % quand la taille du sous-bois augmente d'un centimètre et une diminution de 2 % lorsqu'on augmente l'humidité de 1 %. Il y a donc plus de larves dans les milieux avec une taille de sous-bois élevée et dans des milieux plus secs (Annexe 6 - Graphiques 6 et 7).

3.5.3 Modèle complet de l'abondance des tiques infectées

Les variables qui vont exercer une influence sur l'abondance des tiques infectées dans la zone d'étude en Forêt de Soignes sont l'humidité et la présence d'une réserve naturelle (Annexe 5 - Modèle Infecté et Modèle Afzelii). Il y a une légère diminution de 2 % du nombre de tiques infectées par *Borrelia burgdorferi* s.l et de 3 % pour les tiques infectées par *B. afzelii* quand l'humidité diminue (Annexe 6 - Graphique 8 et 9). Au sein d'une réserve naturelle, il y a 6.6 et 4.75 fois plus de tiques respectivement infectées par toutes les génoespèces de *Borrelia* et par *B. afzelii* que dans les autres zones (Annexe 6 - Graphiques 10 et 11).

4 Discussion

4.1 Distribution du *Tamia* de Sibérie dans la Forêt de Soignes

Peu d'études portant sur la distribution spatiale et temporelle du *Tamia* de Sibérie en Forêt de Soignes ont été réalisées depuis l'introduction de ce rongeur dans la capitale belge. Mon analyse s'est portée sur la zone d'étude comprenant une partie de la Forêt de Soignes bruxelloise, à l'exception du parc Rouge-Cloître. On peut conclure que l'étendue des observations augmente de 1988 à 1998 au cours du temps et que les tamias ont colonisé de nouvelles zones de la forêt, surtout la partie Est de la zone d'étude, où aucune observation de ce rongeur n'avait été recensée en 1988, contrairement à 1998. En ce qui concerne les données du site observations.be, on observe une augmentation de l'étendue des observations au cours du temps. Dans cette zone, la distribution du *Tamia* s'est étendue au cours du temps à partir de son point d'introduction en 1974, au sein des étangs des Enfants Noyés à Watermael-Boitsfort. Il y a eu des événements de colonisation, mais aussi de disparition. En effet, certaines zones de la forêt ne comptent plus d'observations de ce rongeur, malgré leur présence à l'époque. Ce point d'introduction reste un lieu avec une grande densité de *Tamia* au fil des années.

En comparant mon travail avec des études portant sur le même sujet, mon analyse correspond à celle qu'a réalisée Elke Van den Broeke dans l'ensemble de la Forêt de Soignes, de 1981 à 1998 [3, 30, 47]. En reprenant toutes les données des transects des études de de Keiser (1981) et Verroken (1988), elle a mis en évidence l'augmentation du nombre de *Tamia* au sein de la forêt au cours du temps. 50 observations de ce rongeur ont été répertoriées en 1981, 1500 observations en 1988 et 2500 observations en 1998. Il y a donc une augmentation, mais celle-ci n'est pas exponentielle comme on pourrait s'y attendre pour une espèce envahissante. Pour cause, un déclin d'environ 75 % du nombre de *Tamia* a été reporté par les gardes forestiers en 1992, à la suite d'une année défavorable au niveau des conditions climatiques. Un froid prolongé en 1992 avait réduit la production de graines chez les arbres, ce qui a amené à moins de stocks pour l'hibernation des tamias et par conséquent à leur disparition [49].

Les tamias préfèrent les forêts de feuillus mixtes avec beaucoup de végétation au sol contrairement aux Hêtraies sans sous-bois [49] et ont besoin d'un accès à un plan d'eau. Cela correspond à l'emplacement des sites d'expériences pour la présence du *Tamia* de Sibérie. Ces sites se situent dans des Hêtraies en cours de conversion en peuplement mélangé ou dans des forêts alluviales et chênaies mélangées avec une végétation herbacée et arbustive importante

(Annexe 1). De plus, ils se trouvent à proximité de cours d'eau. Il y a donc une préférence dans le choix de l'habitat chez ces rongeurs car on les retrouve dans des biotopes favorables à leur développement.

4.2 Abondance des tiques

L'abondance des tiques est influencée par l'association des variables biotiques (végétation, hôte...) ou abiotiques (conditions climatiques). En effet, la présence d'un seul hôte n'est pas suffisante pour expliquer cette abondance. Les hôtes, la végétation et les conditions climatiques vont alors jouer un rôle dans la quantité des tiques récoltées [50, 51].

Pour commencer, l'abondance des nymphes n'est pas influencée par la présence du *Tamias* de Sibérie dans la Forêt de Soignes alors qu'on peut estimer un taux de 3.28 fois plus de larves en présence de ce rongeur (Tableau 7). Il est néanmoins difficile de comparer mes données avec celles d'autres études. En effet, celles-ci portent sur l'abondance des tiques récoltées sur le *Tamias* de Sibérie et non sur l'effet indirect de la présence de ce rongeur sur ce nombre. Cependant, ces données peuvent être mise en parallèle. Par exemple, plus il y a de tiques se nourrissant sur les rongeurs, moins on en récoltera sur la végétation, et inversement. Les scientifiques Vourc'h et Pisanu ont constaté qu'il y a en moyenne plus de larves et de nymphes sur le *Tamias* de Sibérie que sur les rongeurs *Myodes glareolus* et *Apodemus sylvaticus* en Forêt du Sénart en France [33, 34]. De plus, il y a en moyenne plus de tiques sur les tamias mâles par rapport aux femelles suite à la différence dans leur comportement, et chez les tamias adultes par rapport aux juvéniles à cause de leur taille [52]. Ces études indiquent qu'il y a un impact direct de la présence de ce rongeur sur l'abondance des tiques. En parallèle, il y aura moins de tiques présentes sur la végétation, justifiant mes résultats pour l'abondance des nymphes. Les larves sont quant à elles plus nombreuses et à la recherche d'un hôte potentiel. Leur présence dans les milieux favorables aux tamias peut en être corrélée.

À lui seul, le *Tamias* de Sibérie ne va pas justifier complètement l'abondance des tiques. Les autres hôtes vont venir y jouer un rôle. Mes données indiquent que la présence du chevreuil n'influence pas le nombre de nymphes récoltées alors qu'elle va diminuer le nombre de larves, en absence du *Tamias*. Ces observations contredisent les études portant sur l'impact du chevreuil sur l'abondance des tiques. Beaucoup d'études démontrent que l'abondance des tiques est positivement corrélée avec la densité des chevreuils [41, 42, 53, 54, 55]. En effet, ces cervidés sont des hôtes importants dans le cycle de vie des tiques. Plus la densité des chevreuils est grande, plus il va y avoir de tiques se nourrissant sur les rongeurs. Cependant, une trop grande

densité de chevreuils risque de diminuer le nombre de tiques sur les rongeurs car elles se nourriront aussi sur les cervidés [42]. Le chevreuil à lui seul ne va donc pas influencer l'abondance des tiques, mais il va dépendre des autres hôtes comme les rongeurs [54].

Dans cette étude, l'essence des arbres affecte l'abondance des nymphes tandis que le type de sous-bois affecte celle des larves. Cette observation met en évidence l'impact de la végétation sur l'abondance des tiques, mais pas uniquement. La végétation et les conditions météorologiques sont liées entre elles dans la nature. En effet, une végétation dense offrira un microclimat plus humide et inversement. Les habitats privilégiés pour les tiques sont des milieux avec une humidité élevée (environ 85 %), de la végétation dense et des hôtes [50, 56]. L'abondance des tiques dans la végétation va alors dépendre de ces autres facteurs. Une forêt offre des milieux plus propices au développement des tiques contrairement aux prairies où les variations des conditions climatiques se font plus ressentir [56]. En effet, les tiques sont des acariens ectothermes : leur survie et leur développement vont dépendre des variations de la température et de l'humidité [57]. Si l'humidité diminue et que l'environnement devient plus sec, les tiques vont se réfugier près du sol pour éviter la dessiccation. Il y aura donc moins de tiques à l'affût sur la végétation mais celles-ci seront plus proches des rongeurs se déplaçant au sol comme les tamias [55]. De plus, une végétation trop dense risque d'empêcher l'accès aux hôtes alors qu'une végétation faible ne va pas donner de refuge pour les tiques lors de conditions extrêmes telles que des températures élevées ou une humidité basse [50]. En résumé, il y a une corrélation négative entre l'abondance des tiques et l'humidité, une corrélation positive avec la présence des hôtes et une influence de la végétation [50, 58]. Les essences des arbres dans lesquelles on rencontre le plus de tiques sont le Chêne pédonculé (*Quercus robur*) et le Hêtre commun (*Fagus sylvatica*), tandis les préférences du sous-bois vont dépendre des hôtes.

4.3 Abondance des tiques infectées

Les génoespèces de la bactérie *Borrelia burgdorferi* sensu lato que l'on rencontre le plus couramment en Europe sont *B. afzelii*, *B. garinii* et *B. burgdorferi* sensu stricto. Selon une méta-analyse reprenant 155 études des tiques infectées en Europe, 13.6 % des tiques collectées seraient infectées par cette bactérie (38 % par *B. afzelii*, 33 % par *B. garinii* et 18 % par *B. burgdorferi* s.s) [59].

Dans ce travail, on a récolté en moyenne 8.8 % de tiques infectées sur les 522 nymphes et adultes collectées sur le terrain. Proportionnellement, ce pourcentage est plus faible comparé

aux études en Europe mais également en Belgique [59]. Selon une étude réalisée par l'institution Sciensano en 2017, la Flandre a rassemblé 14.2 % et la Wallonie, 13.8 % de tiques infectées en moyenne [60]. Ce faible pourcentage à Bruxelles pourrait se justifier par un nombre de tiques récoltées plus réduit. Parmi mes données, 58.6 % sont infectées par *B. afzelii*, 4.4 % par *B. garinii* et 28.3 % par *B. burgdorferi* s.s. En comparant avec deux études réalisées en Belgique [18, 61], le taux de tiques infectées est différent malgré un nombre de tiques collectées semblable (Tableau 13). Il y aurait moins de tiques infectées dans la capitale que dans la province de Namur (12 %) ou du Hainaut (23 %). Il faut toutefois prendre en compte le délai temporel dont les années sont respectivement de 2022, 1998 et 2010. Avec le rapport réalisé par Sciensano en 2017, on remarque que ces pourcentages coïncident avec 15 % à Namur et 20.5 % dans le Hainaut, indiquant bien un taux plus élevé dans ces deux provinces wallonnes comparé à Bruxelles [60]. On remarque aussi que les pourcentages des génoespèces de *Borrelia* sont différents avec plus de tiques infectées par *B. afzelii* dans la province du Hainaut et à Bruxelles, tandis que dans la province de Namur, il y a plus de tiques avec *B. garinii*. Cela nous amène à penser que ce pourcentage va varier en fonction de la région, de la communauté des hôtes potentiels et de leur prévalence. En effet, *B. afzelii* se transmet principalement par les rongeurs et *B. garinii* par les oiseaux [9, 20]. Un délai temporel n'est cependant pas à négliger dans ces comparaisons.

Tableau 13 : Comparaison d'études sur l'infection des tiques par la bactérie *Borrelia burgdorferi* s.l et ses génoespèces

	Lieu	Tiques collectées	Infectées	<i>B. afzelii</i>	<i>B. garinii</i>	<i>B. burgdorferi</i> s.s.
Présente étude	Bruxelles	552	8.8 %	58.6 %	4.4 %	28.3 %
Missone (1998) [61]	Province de Namur	524	12 %	55 %	21 %	2 %
Kesteman (2010) [18]	Province du Hainaut	489	23 %	9 %	53 %	38 %
Rauter (2005) [59]	Europe	112 579	13.6 %	38 %	33 %	18 %

De plus, le taux d'infection chez les tiques adultes est significativement plus élevé que chez les nymphes en Europe [59]. Cela correspond aux tiques infectées en Forêt de Soignes avec 8.6 % de nymphes et 12.5 % de tiques adultes.

Le taux de prévalence est différent en fonction de l'espèce. En Forêt du Sénart en France, la prévalence du *Tamias* de Sibérie atteignait 33.3 % contrairement à 14.1 % pour *Myodes glareolus* et 0 % pour *Apodemus sylvaticus* en 2007 [34]. Six ans plus tard, au sein de la même forêt, les tamias infectaient 8.5 fois plus de nymphes que les deux autres rongeurs [28]. Il y a donc une influence de la présence du *Tamias* de Sibérie sur le nombre de tiques infectées. Nos résultats concordent avec cette conclusion car on a significativement plus de tiques infectées avec un taux de 3.14 fois plus dans les sites avec le *Tamias* (Tableau 11). De même, les tamias portent en moyenne plus de larves et de nymphes sur leur pelage ; cela va accentuer le fait qu'ils vont produire plus de nymphes infectées. À titre de comparaison, les tamias portent en moyenne 27 à 69 fois plus de tiques que *Myodes glareolus* [33, 34]. Cette prévalence et le taux de tiques infectées supérieur chez ce rongeur invasif peuvent s'expliquer de différentes manières. Premièrement, les tamias sont des grands rongeurs pouvant porter plus de tiques et être davantage exposés à ceux-ci. Deuxièmement, ils ont une plus grande longévité que les autres rongeurs, permettant d'être des hôtes pour une plus grande période. Pour finir, les tamias sont porteurs de plusieurs génoespèces de la bactérie, contrairement aux autres rongeurs. En effet, le tamia va transmettre principalement *B. afzelii* mais aussi *B. burgdorferi* s.s et *B. garinii bavariensis*, alors que les autres rongeurs ne transmettent que *B. afzelii* [28, 33, 36]. L'étude de Marsot a mis en évidence que les tamias étaient des amplificateurs de cette génoespèce au sein de la Forêt de Sénart. Ils infecteraient quatre fois plus de nymphes avec *B. afzelii* que les rongeurs *Myodes glareolus* [36]. Cependant, mes résultats ne permettent pas une conclusion de l'influence du *Tamias* sur l'abondance des tiques infectées par *B. afzelii* dans la Forêt de Soignes. Une étude où les tiques seront récoltées directement sur ces rongeurs dans la forêt bruxelloise pourrait apporter davantage d'explications.

L'introduction d'une nouvelle espèce peut avoir deux conséquences : cette espèce va augmenter ou réduire la transmission d'un pathogène dans son milieu naturel [28, 62]. Dans le cas du *Tamias* de Sibérie dans la Forêt de Soignes à Bruxelles, ce rongeur va augmenter la transmission du pathogène. Cependant, il est difficile de documenter l'ensemble des hôtes pouvant impacter la dynamique de la bactérie. Dans cette étude, on s'est focalisé sur les tamias, dont la prévalence à la *Borrelia* est importante, et aux chevreuils, qui sont souvent mentionnés comme responsable de l'abondance des tiques. En réalité, la forêt comporte bien plus d'hôtes potentiels pour ces acariens. On ne peut donc pas être sûr que l'impact décrit avec la présence du *Tamias* ne comprend pas d'autres espèces de rongeurs qui vont venir influencer ce taux de tiques infectées.

En effet, l'environnement où vivent les tamias correspond à un habitat favorable pour de nombreuses espèces (accès à l'eau, végétation variée...).

Diverses études ont mis en évidence le caractère incompetent du chevreuil sur les maladies à tiques. Le cervidé joue un rôle d'amplificateur des tiques car il participe au cycle de développement de ces acariens. Cependant, il dilue aussi la transmission des pathogènes car la proportion des piqûres sur des hôtes compétents par rapport aux hôtes incompetents diminue [42, 43, 63, 64]. Il va donc y avoir un effet de dilution à la suite de la présence du chevreuil. Dans les données récoltées, le chevreuil est venu influencer négativement le nombre de tiques infectées par *B. burgdorferi* s.l. La présence d'hôtes compétents et incompetents risque de réduire le taux d'infection des tiques. En effet, dans mon étude, les sites ne comprenant que le Tamia de Sibérie ont un taux élevé de tiques infectées contrairement à ceux comprenant les deux hôtes.

4.4 Le site outlier F1

Le site outlier F1 est un site avec Tamia et sans Chevreuil que l'on retrouve dans une végétation dominée par du Chêne pédonculé et des fougères. En l'enlevant des analyses, la majorité des résultats ne sont plus significatifs. Il n'y a plus d'influence de la présence des hôtes sur l'abondance des larves, nymphes et tiques infectées. Au niveau des essences des arbres principaux, le Hêtre commun impacte toujours positivement la densité de nymphes. Cette observation est identique avec le Chêne pédonculé en présence du Tamia pour les larves, indiquant que, même sans le site outlier, cette interaction reste décisive. Les analyses sont identiques pour le type de sous-bois mis à part une absence de données pour le sous-bois fougère avec Tamia dont F1 est le seul représentant. Pour neutraliser l'effet du site F1 sur cette étude, sélectionner un plus grand nombre de sites de récolte peut être envisagé lors de prochaines expériences.

4.5 Limites et perspectives d'amélioration

Certaines limites ont été observées au cours de l'expérience. Je vais passer en revue ces différentes limites et proposer des améliorations du mode opératoire afin d'optimiser la prise de données, les résultats et leur interprétation.

Premièrement, faire des analyses basées sur des données générées par le public permet d'avoir une idée de la présence du Tamia de Sibérie en Forêt de Soignes, mais il est difficile de pouvoir en avoir une conclusion concrète. Il y a des biais d'observations avec une densité élevée de

promeneurs et d'observateurs dans les zones de grande fréquentation, comme aux entrées de la forêt, aux parcs ou encore près des cours d'eau. Malgré la tentative de le réduire en comparant avec des espèces communes et généralistes, il reste quand même un certain biais. En plus de celui-ci, il y a aussi le biais temporel avec Internet qui n'était pas très présent avant les années 2010 et une redondance dans les données avec plusieurs personnes pouvant répertorier le même individu. Pour les éviter, il serait plus intéressant de réaliser une étude comme celles proposées par de Keiser (1981), Verroken (1988) et Van den Broeke (1998) [47]. Cette nouvelle étude consisterait à faire des transects sur l'ensemble de la Forêt de Soignes à des périodes différentes de l'année, pour prendre en compte le cycle de vie de ces rongeurs. L'objectif serait de tenir un inventaire complet sur cette espèce. Cela donnerait des données concrètes pour une analyse spatio-temporelle du *Tamias sibiricus* en Forêt de Soignes.

Deuxièmement, on ne connaît pas la prévalence du *Tamias sibiricus* à la bactérie *Borrelia burgdorferi* s.l en Forêt de Soignes. Des scientifiques ont calculé un taux de 33 % de tamias porteurs de la bactérie en Forêt de Sénart en France, ne correspondant peut-être pas à celle des populations présentes en Belgique [34]. Une étude pouvant calculer la prévalence du rongeur à Bruxelles apporterait des données intéressantes sur la dynamique de cette bactérie. La possibilité de réaliser des prises de sang sur les tamias et ainsi d'y calculer leur taux d'infection permettrait de faire des conclusions plus poussées sur l'influence de la présence de ce rongeur. En suivant la même logique, récolter les tiques directement sur le tamia permettrait de mieux comprendre la transmission de la bactérie ainsi que l'impact de ce rongeur sur l'infection des tiques.

Troisièmement, le cycle de transmission de la bactérie aux tiques est un système complexe mettant en relation différents hôtes potentiels, contaminés ou non. La présence d'un seul de ces hôtes ne va donc pas impacter à lui seul cette transmission. En effet, dans les sites d'expérience avec la présence du *Tamias*, d'autres hôtes peuvent aussi y être présents. L'influence du *Tamias* sur les tiques décrite dans ce travail ne sera pas le seul facteur à prendre en compte car d'autres hôtes peuvent impacter ou non cette abondance ou infection. Par exemple, rien ne nous désigne que le nombre de tiques infectées provient de la piqûre avec un tamia, un autre rongeur ou un oiseau. Il serait intéressant de réaliser aussi un inventaire de l'ensemble des hôtes potentiels compétents en Forêt de Soignes afin d'étudier l'impact de chaque hôte sur les tiques. Ceci demanderait beaucoup de ressources, mais permettrait d'avoir des données concrètes sur la présence de la bactérie *Borrelia burgdorferi* s.l en Belgique.

Quatrièmement, certaines variables sont significatives sans qu'elles soient prises en compte dans le mode opératoire. Par exemple, la distance au chemin, la présence d'une réserve naturelle ou encore le type de peuplement n'était pas des variables préalablement définies (Annexe 5). Des études sur l'influence de celles-ci donneraient des conclusions plus acceptables les concernant. Les résultats d'une étude sur l'impact de la distance au chemin, en prenant des sites avec des distances prédéfinies, seront plus précis que lors d'une étude avec des distances aléatoires. Cependant, vouloir analyser l'impact d'une seule variable à la fois est très compliqué, surtout sur des expériences de terrain. Il faut prendre en compte une multitude de facteurs qui sont connectés ou non entre eux. Pour l'expérience de la présence du *Tamias* sur l'abondance des tiques, d'autres variables comme la présence d'un autre hôte et d'un certain type de sous-bois, peuplement ou sol vont aussi impacter les résultats, même s'ils ne sont pas pris en compte dans les modèles statistiques. Il est donc très compliqué de réaliser une étude de terrain en ne voulant prendre en compte que la présence du *Tamias* de Sibérie.

Ensuite, seulement six sites avec le *Tamias* de Sibérie ont été pris en compte lors de l'expérience, dont un pour chaque type de sous-bois. Cela a posé des problèmes avec le site outlier F1 qui représente le seul site avec des fougères et des tamias. Pour améliorer la qualité de ses résultats, il serait nécessaire de prendre un plus grand nombre de sites de récolte, ce qui permettrait d'avoir plus de sites avec la variable d'intérêt. De plus, il n'y avait qu'un tiers des sites qui comportait des tamias. Un nombre égal de sites permettrait une meilleure comparaison pour la quantité des tiques en présence ou absence de ce rongeur. Pour aller plus loin, faire plus de répétitions de collecte dans le temps peut être envisagé pour avoir davantage de données d'abondance des tiques.

Pour finir, le capteur Hobo a permis d'avoir des données de température et d'humidité lors de l'expérience. Ces données exercent une influence sur l'abondance et la survie des tiques [50, 57]. Cependant, en plaçant le capteur à la lisière de la forêt, cela n'a pas pu prendre en compte la variation des conditions météorologiques au sein de chaque site de récolte. La végétation impacte la température et l'humidité. Par exemple, dans une végétation plus dense, il fera plus frais et inversement. Si on avait la possibilité de mettre des capteurs Hobo sur chaque site, les données météorologiques seraient plus précises, pouvant expliquer plus rigoureusement la présence ou l'absence de tiques à certains endroits de la forêt.

5 Conclusion

La bactérie *Borrelia Burgdorferi* sensu lato, responsable de la maladie de Lyme, est transportée par les tiques, pouvant passer d'un hôte compétent (oiseaux, rongeurs...) vers les humains. En Forêt de Soignes, le Tamia de Sibérie (*Tamias sibiricus*), une espèce invasive dans les forêts européennes, pourrait impacter la densité de tiques mais aussi leur prévalence à la bactérie. Comprendre son cycle de transmission et les facteurs qui vont l'influencer va porter un intérêt pour la santé publique en Belgique. Pour commencer, l'abondance des tiques présent en Forêt de Soignes va dépendre de l'association de plusieurs facteurs, qu'ils soient biotiques (hôtes, végétation) ou abiotiques (humidité, température...). Cette abondance augmente ou diminue en fonction de la présence des hôtes, de la végétation et des conditions météorologiques. Au sein de la Forêt de Soignes, le Tamia de Sibérie exerce un impact positif sur l'abondance des larves mais pas celle des nymphes. De plus, les habitats favorables pour celles-ci sont des milieux avec une végétation dense, mais permettant toujours l'accès aux hôtes, et avec une humidité élevée. Les essences des arbres avec lesquelles ont rencontré le plus de tiques sont le Chêne pédonculé (*Quercus robur*) et le Hêtre commun (*Fagus sylvatica*). Ensuite, le pourcentage de tiques infectées par la *Borrelia burgdorferi* s.l va dépendre de la présence des hôtes telle que le Tamia de Sibérie et le Chevreuil (*Capreolus capreolus*). En effet, ce rongeur va contaminer plus de tiques que ses confrères, tandis que la présence du chevreuil va réduire ce nombre. Un plus grand pourcentage de tiques infectées par *B. afzelii* a été récolté dans la zone d'étude. Celui-ci va dépendre de la communauté des hôtes, principalement des rongeurs, et de leur prévalence. Comme la prévalence est inconnu pour les tamias au sein de la Forêt de Soignes, une étude à ce sujet serait intéressante pour appuyer cette observation. Pour finir, toutes ces analyses ne sont plus aussi marquées lorsqu'on retire le site F1 mettant en évidence son caractère de outlier. Faire des études supplémentaires avec plus de sites de récolte ainsi que collecter les tiques directement sur les tamias montreraient l'impact direct du rongeur sur l'abondance et la prévalence de ces acariens.

6 Bibliographie

- [1] Hermy M., Geebelen L., Leroy M. et Lernout T. (2022). Tiquesnet 2021 : surveillance des morsures de tiques en Belgique. *Sciensano, Epidémiologie des maladies infectieuses*, Bruxelles. Disponible sur Internet : https://tiquesnet.wiv-isp.be/reports/Surveillance%20des%20morsures%20de%20tiques_TiquesNet%202021_Final.pdf
- [2] Vanwijnberghe S., Reinbold G., Vaes F., Engelbeen M., Van Der Wijden B., Beck O., Rotsaert G. et Do U. Plan de gestion de la Forêt de Soignes Bruxelloise. Disponible sur Internet : https://environnement.brussels/sites/default/files/user_files/plan_de_gestion_de_la_foret_de_soignes_bruxelloise_compressed.pdf
- [3] Verroken J (1989). De Aziatische grondeekhoorn (*Eutamias sibiricus*) in het Zoniënwood. *Vrije Universiteit Brussel*.
- [4] McCoy, K. D., Boulanger N (2015). Tiques et maladies à tiques : Biologie, écologie évolutive, épidémiologie. Nouvelle édition [en ligne]. Marseille : *IRD Éditions*. Disponible sur Internet : <<http://books.openedition.org/irdeditions/9001>>. ISBN : 9782709921015. DOI : <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.9001>.
- [5] Cours en ligne de l'université de Constantine Algérie. Disponible sur Internet : https://fac.umc.edu.dz/vet/Cours_Ligne/cours_20_21/Parasitologie/EMBR_ARTH.pdf
- [6] Boudet B. et Guerin D (2019). Les tiques, des parasites méconnus. *GDS Creuse*. Disponible sur Internet : <https://www.gdscreuse.fr/?p=6692>
- [7] Blaize A. (2022). Piqûre de tique : rougeur, infection, photo, que faire ? *Le journal des femmes : santé*. Disponible sur Internet : <https://sante.journaldesfemmes.fr/fiches-sante-du-quotidien/2510442-piqure-tique-france-photo-que-faire-reconnaitre-evolution/>
- [8] Sonenshine D. E. and Roe R. M. (2014). Biology of ticks. *Oxford, Oxford University Press*.
- [9] Manneli A., Bertolotti L., Gern L. and Gray J. (2012). Ecology of *Borrelia burgdorferi* sensu lato in Europe: transmission dynamics in multi-host systems, influence of molecular processes and effects of climate change. *FEMS Microbiol. Rev.*, **36**, 837-861. Doi : 10.1111/j.1574-6976.2011.00312.x.

- [10] Pfizer et Verfora (2022). Habitat de la tique. *Piqûre de tiques*. Disponible sur Internet : <https://piqure-de-tique.ch/habitat-de-la-tique/>
- [11] Gray J.S., Dautel H., Estrada-Peña A., Kahl O. and Lindgren E. (2009). Effects of Climate Change on Ticks and Tick-Borne Diseases in Europe. *Interdisciplinary Perspectives on Infectious Diseases*, **2009**, 1-12. Doi: 10.1155/2009/593232.
- [12] Graf J.F. Ecology and ethology of *Ixodes ricinus* L. in Switzerland (Ixodoidea : Ixodidae). III : copulation, nutrition and oviposition. *Acarologia*, **16**, 636-642. Disponible sur Internet : <https://www1.montpellier.inra.fr/CBGP/acarologia/article.php?id=3192>
- [13] Mayne P.J. (2011). Emerging incidence of Lyme borreliosis babesiosis, bartonellosis, and granulocytic ehrlichiosis in Australia. *International Journal of General Medicine*, **4**, 845-852.
- [14] Barbieri A.M., Venzal J.M. Marcili A., Almeida A.P., González E.M. and Labruna M.B. (2013). *Borrelia burgdorferi* sensu lato Infecting Ticks of the *Ixodes ricinus* Complex in Uruguay: First Report for the Southern Hemisphere. *Vector-Borne and Zoonotic Diseases*, **13**, 147–153. Doi:10.1089/vbz.2012.1102
- [15] Olsen B., Duffy D.C., Jaenson T.G.T, Gylfe A., Bonnedahl J. and Bergström S. (1995). Transhemispheric Exchange of Lyme Disease Spirochetes by Seabirds. *Journal of Clinical Microbiology*, **33**, 3270-3274. Doi : 10.1128/jcm.33.12.3270-3274.1995
- [16] Mosnier-Thoumas X. La maladie de Lyme sur le devant de la scène. Pharmacie de la Porte D'Orléans, Paris. Disponible sur Internet : <https://pharmacie-porte-orleans.mesoigner.fr/actualites/268-la-maladie-de-lyme-sur-le-devant-de-la-scene>
- [17] Bruxelles Environnement-IBGE. (2015). 44. La maladie de Lyme. *Interface Santé et Environnement*. Disponible sur Internet : https://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/san44_lyme
- [18] Kesteman T., Rossi C., Bastien P., Brouillard J., Avesani V., Olive N., Martin P. and Delmée M. (2010). Prevalance and genetic heterogeneity of *borrelia burgdorferi* sensu lato in *Ixodes* in Belgium. *Acta Clinica Belgica*, **65**.
- [19] Humair P-F. and Gern. (2000). The wild hidden face of Lyme borreliosis in Europe. *Microbes and Infection*, **2**, 915-922. DOI: 10.1016/s1286-4579(00)00393-2

- [20] Gern L. (2008). *Borrelia Burgdorferi* sensu lato, the agent of Lyme Borreliosis: Life in the wilds. *Parasite*, **15**, 244-247. DOI: 10.1051/parasite/2008153244
- [21] Mollier P. (2020). Portait de tiques. *INREA*. Disponible sur Internet : <https://www.inrae.fr/actualites/portrait-tiques>
- [22] INPN (Inventaire National du Patrimoine Naturel). *Tamias de Sibérie, Écureuil de Corée, Rat de Corée, Écureuil japonais (Français), Tamias sibiricus (Laxmann, 1769)*. Disponible sur Internet : https://inpn.mnhn.fr/espece/cd_nom/61204
- [23] Chapuis J-L., Obolenskaya E., Pisanu B., Lissovsky A. (2019). *Tamias sibiricus* (Siberian Chipmunk). *CABI: Invasive Species Compendium*. Disponible sur Internet : <https://www.cabi.org/isc/datasheet/62788#tosummaryOfInvasiveness>
- [24] Marmet J. (2008). Traits d'histoire de vie du *Tamias de Sibérie Tamias sibiricus*, espèce exotique naturalisée dans la forêt de Sénart (Essonnes) : démographie, biologie de la reproduction, occupation de l'espace et dispersion. *Muséum National d'Histoire Naturelle*.
- [25] Marmet J. et Chapuis J-L. Répartition de l'écureuil de Corée (*Tamias sibiricus*), animal de compagnie exotique introduit en France : Résultats de l'enquête nationale de 2005. *Rongeurs et la forêt, état des lieux*. Disponible sur internet : <https://ecureuils.mnhn.fr/sites/default/files/documents/marmet-et-chapuis2007-1.pdf>
- [26] Chapuis J-L. (2005). Répartition en France d'un animal de compagnie naturalisé, le tamias de Sibérie (*Tamias sibiricus*). *Rev. Ecol. (Terre Vie)*, **60**.
- [27] Verbeylen G. and Van den Broeke E. (2003). Le *Tamias de Sibérie : Tamias sibiricus* (Laxmann, 1769), en Belgique. *Article issue du livre Evolution holocène de la faune de Vertébrés de France de Pascal M., Lorvelec O., Vigne J-D., Keith P. et Clergeau P.* Disponible sur Internet : https://www.researchgate.net/publication/272149815_Le_Tamias_de_Siberie_Tamias_sibiricus_Laxmann_1769_en_Belgique
- [28] Marsot M., Chapuis J-L., Gasqui P., Dozières A., Masségli S., Pisanu B., Ferquel E. and Vourc'h G. (2013). Introduced Siberian Chipmunks (*Tamias sibiricus barberi*) contribute more to Lyme Borreliosis Risk than Native Reservoir Rodents. *PLoS ONE*, **8**. Doi:10.1371/journal.pone.0055377

- [29] Chapuis J-L., Gerriet O., Losinger-Chabod I. et Pisanu B. (2018). Gestion d'espèces exotiques envahissantes : le cas des écureuils en France. *Lutte et Gestion, Faune sauvage*, **321**.
- [30] Van Den Broeke E. (1999). Populatiodynamiek van een geïntroduceerde soort : de grondeekhoorn in het Zoniënwoud. *VUB Laboratorium Ecotoxicologie en Polaire ecologie*. Brussels.
- [31] Le Louarn H. et Quéré J-P. (2003). Les Rongeurs de France : Faunistique et biologie. Quae, 119-120. Disponible sur Internet : [https://books.google.fr/books?id=zgBuE76TiNgC&pg=PA119&lpg=PA119&dq=%22Tamias+sibiricus+asiaticus%22\(Gmelin,+1788\)&source=web&ots=azxRXtjR05&sig=st5uF-2sZ492629a7APp17KdZJ8&hl=fr#v=onepage&q=%22Tamias%20sibiricus%20asiaticus%22\(Gmelin%2C%201788\)&f=false](https://books.google.fr/books?id=zgBuE76TiNgC&pg=PA119&lpg=PA119&dq=%22Tamias+sibiricus+asiaticus%22(Gmelin,+1788)&source=web&ots=azxRXtjR05&sig=st5uF-2sZ492629a7APp17KdZJ8&hl=fr#v=onepage&q=%22Tamias%20sibiricus%20asiaticus%22(Gmelin%2C%201788)&f=false)
- [32] Marmet J., Pisanu B., and Chapuis J-L. (2011). Natal dispersal of introduced Siberian chipmunks, *Tamias sibiricus*, in a suburban forest. *Journal of Ethology*, **29**, 23-29. Doi: 10.1007/s10164-010-0215-3
- [33] Pisanu B., Marsot M., Marmet J., Chapuis J-L., Réale D. and Vourc'h G. (2010). Introduced Siberian chipmunks are more heavily infested by ixodid ticks than are native bank voles in a suburban forest in France. *International Journal for Parasitology*, **40**, 1277-1283.
- [34] Vourc'h G., Marmet J., Chassagne M., Bord S. and Chapuis J-L. (2007). *Borrelia burgdorferi* Sensu Lato in Siberian Chipmunks (*Tamias sibiricus*) Introduced in Suburban Forests in France. *Vector-borne and zoonotic diseases*, **7**, 637-641. DOI: 10.1089/vbz.2007.0111
- [35] Pisanu B., Chapuis J-L., Dozières A., Basset F., Poux V., and Vourc'h G. (2014). High prevalence of *Borrelia burgdorferi* s.l. in the European red squirrel *Sciurus vulgaris* in France. *Ticks and Tick-borne Diseases*, **5**, 1-6. DOI: 10.1016/j.ttbdis.2013.07.007
- [36] Marsot M., Sigaud M., Chapuis J-L., Ferquel E., Cornet M., and Vourc'h G. (2011). Introduced Siberian Chipmunks (*Tamias sibiricus barberi*) Harbor More-Diverse *Borrelia burgdorferi* Sensu Lato Genospecies than Native Bank Voles (*Myodes glareolus*). *Applied and Environmental Microbiology*, **77**, 5716-5721. DOI: 10.1128/AEM.01846-10
- [37] Pfäffle M., Littwin N., and Petney T.N. (2015). The relationship between biodiversity and disease transmission risk. *Research and Reports in Biodiversity Studies*, Dovepress. DOI: 10.2147/RRBS.S52433

- [38] Gilot B., Pautou G., Moncada E., Lachet B., et Christin J.G. (1979). La Cartographie des populations de tiques exophiles par le biais de la végétation, Bases écologique, intérêt épidémiologique. *Documents de cartographie écologique*, **22**, 65-80.
- [39] Ostfeld R.S., and Keesing F. (2000). Biodiversity and Disease Risk: the Case of Lyme Disease. *Conservation Biology*, **14**, 722-728. DOI: 10.1046/j.1523-1739.2000.99014.x
- [40] Ostfeld R.S., and Keesing F. (2000). The function of biodiversity in the ecology of vector-borne zoonotic diseases. *Canadian Journal of Zoology*, **78**, 2061-2078. DOI: 10.1139/z00-172
- [41] Dutraive J. (2019). Etude de la corrélation entre la densité de la tique *Ixodes ricinus* et la densité des chevreuils en région toulousaine. Thèse, ENVT, école nationale vétérinaire Toulouse.
- [42] Cagnacci F., Bolzoni L., Rosà R., Carpi G., Hauffe H.C., Valent M., Tagliapietra V., Kazimirova M., Koci J., Stanko M., Lukan M., Henttonen H. and Rizzoli A. (2012). Effects of deer density on tick infestation of rodents and the hazard of tick-borne encephalitis. I: Empirical assessment. *International Journal for Parasitology*, **42**, 365-372. DOI: 10.1016/j.ijpara.2012.02.012
- [43] Bolzoni L., Rosà R., Cagnacci F. and Rizzoli A. (2012). Effect of deer density on tick infestation of rodents and the hazard of tick-borne encephalitis. II: Population and infection models. *International Journal for Parasitology*, **42**, 373-381. DOI: 10.1016/j.ijpara.2012.02.006
- [44] Bord S. and Agoulon A. (2015). Annexe 1 : Méthodes d'échantillonnage des tiques et fiabilité. Tiques et maladies à tiques : Biologie, écologie évolutive, épidémiologie. *IRD Éditions*, 279-286.
- [45] Heylen D., Tijssse E., Fonville M., Matthysen E., and Sprong H. (2013). Transmission dynamics of *Borrelia burgdorferi* s.l. in a bird tick community: *Borrelia* cycles in a bird tick community. *Environmental Microbiology*. 15, 663-673. Doi: 10.1111/1462-2920.12059
- [46] météociel.fr : Observations, prévisions, modèles en temps réel. Disponible sur Internet : <https://www.meteociel.fr/previsions/38309/uccle.htm?fbclid=IwAR0JsMN3eys1UEAAtrlES70z1vEkZQjmegviNOz3Qp8uyLlr-nWF9-kKSA>

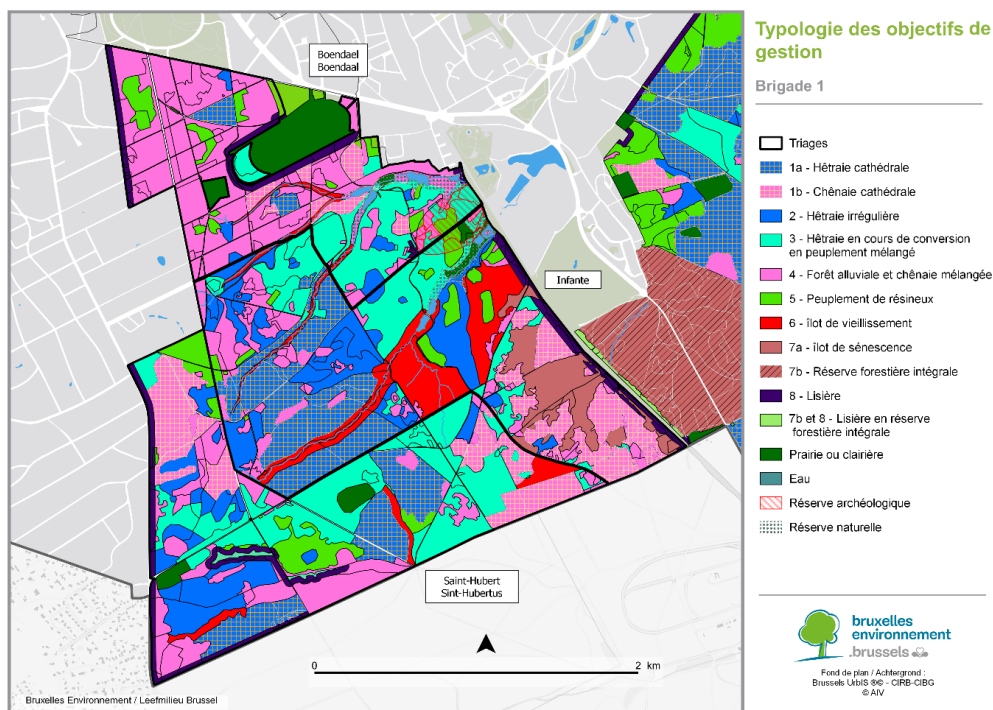
- [47] Van den Broeke E. (2000). De Siberische grondeekhoorn, een exoot in het Zoniënwoud. *Zoogdier*. **3**, 19-23.
- [48] Dumé G., Gauberville C., Mansion D., and Rameau J-C. (2018). Flore forestière française, Tome 1 : Plaines et collines. *CNPF Institut pour le Développement Forestier*.
- [49] Zwaenepoel J. (1993). De Siberische grondeekhoorn in het Zoniënwoud. *Zoogdier*. **4**, 4-12.
- [50] Medlock J., Pietzsch M., Rice N., Jones L., and al. (2008). Investigation of Ecological and Environmental Determinants for the Presence of Questing *Ixodes ricinus* (Acari: Ixodidae) on Gower, South Wales. *Journal of Medical Entomology*, **45**, 314-325. Doi: 10.1603/0022-2585(2008)45[314:IOEAED]2.0.CO;2
- [51] Perez D., Kneubühler Y., Rais O. and Gern L. (2012). Seasonality of *Ixodes ricinus* Ticks on Vegetation and on Rodents and *Borrelia burgdorferi* sensu lato Genospecies Diversity in Two Lyme Borreliosis–Endemic Areas in Switzerland. *Vector-Borne and Zoonotic Diseases*, **12**, 633-644. Doi: 10.1089/vbz.2011.0763
- [52] Boyer N., Réale D., Marmet J., Pisanu B., and Chapuis J-L. (2010). Personality, space use and tick load in an introduced population of Siberian chipmunks *Tamias sibiricus*. *Journal of Animal Ecology*, **79**, 538-547. Doi: 10.1111/j.1365-2656.2010.01659.x
- [53] Tagliapietra V., Rosà R., Arnoldi D., Cagnacci F., and al. (2011). Saturation deficit and deer density affect questing activity and local abundance of *Ixodes ricinus* (Acari, Ixodidae) in Italy. *Veterinary Parasitology*, **183**, 114-124. Doi: 10.1016/j.vetpar.2011.07.022
- [54] Scharlemann J., Johnson P., Smith A., Macdonald D., and Randolph S. (2008). Trends in ixodid tick abundance and distribution in Great Britain. *Medical and Veterinary Entomology*, **22**, 238-247. Doi: 10.1111/j.1365-2915.2008.00734.x
- [55] Randolph S. and Storey K. (1999). Impact of Microclimate on Immature Tick-Rodent Host Interactions (Acari: Ixodidae): Implications for Parasite Transmission. *Journal of Medical Entomology*, **36**, 741-748. Doi: 10.1093/jmedent/36.6.741
- [56] Lindström A., and Jaenson T. (2003). Distribution of the Common Tick, *Ixodes ricinus* (Acari: Ixodidae), in Different Vegetation Types in Southern Sweden. *Journal of Medical Entomology*, **40**, 375-378. Doi: 10.1603/0022-2585-40.4.375

- [57] Wongnak P., Bord S., and al. (2022). Meteorological and climatic variables predict the phenology of *Ixodes ricinus* nymph activity in France, accounting for habitat heterogeneity. *Scientific Reports*, **12**, 7833. Doi: 10.1038/s41598-022-11479-z
- [58] Perret J-L., Rais O., and Gern L. (2004). Influence of Climate on the Proportion of *Ixodes ricinus* Nymphs and Adults Questing in a Tick Population. *Journal of Medical Entomology*, **41**, 361-365. Doi: 10.1603/0022-2585-41.3.361
- [59] Rauter C., and Hartung T. (2005). Prevalence of *Borrelia burgdorferi* Sensu Lato Genospecies in *Ixodes ricinus* Ticks in Europe: a Metaanalysis. *Applied and Environmental Microbiology*, **71**, 7203-7216. Doi: 10.1128/AEM.71.11.7203-7216.2005
- [60] Lernout T., Tersago K., De Regge N., and Sprong H. (2018). Recherche de pathogènes presents chez les tiques, résultats d'une étude menée d'avril à octobre 2017. Sciensano, Epidémiologie et santé publique – Épidémiologie des maladies infectieuses. Disponible sur Internet : <https://tekennet.wiv-isp.be/reports/Pathog%C3%A8nes%20chez%20les%20tiques%202017.pdf>
- [61] Missone M-C., Van Impe G., and Hoet P. (1999). Genetic Heterogeneity of *Borrelia burgdorferi* Sensu Lato in *Ixodes ricinus* Ticks Collected in Belgium. *Journal of Clinical Microbiology*, **36**, 3352-3354. Doi: 10.1128/JCM.36.11.3352-3354.1998
- [62] O'Brien V., Moore A., Young G., Komar N., Reisen W., and Brown C. (2011). An enzootic vector-borne virus is amplified at epizootic levels by an invasive avian host. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, **278**, 239-246. Doi: 10.1098/rspb.2010.1098
- [63] Perkins S., Cattadori I., Tagliapietra V., Rizzoli A., and Hudson P. (2006). Localized deer absence leads to tick amplification. *Ecology*, **87**, 1981-1986. Doi: 10.1890/0012-9658(2006)87[1981:LDALTT]2.0.CO;2
- [64] Pugliese A., and Rosà R. (2008). Effect of host populations on the intensity of ticks and the prevalence of tick-borne pathogens: how to interpret the results of deer enclosure experiments. *Parasitology*, **135**, 1531-1544. Doi: 10.1017/S003118200800036X

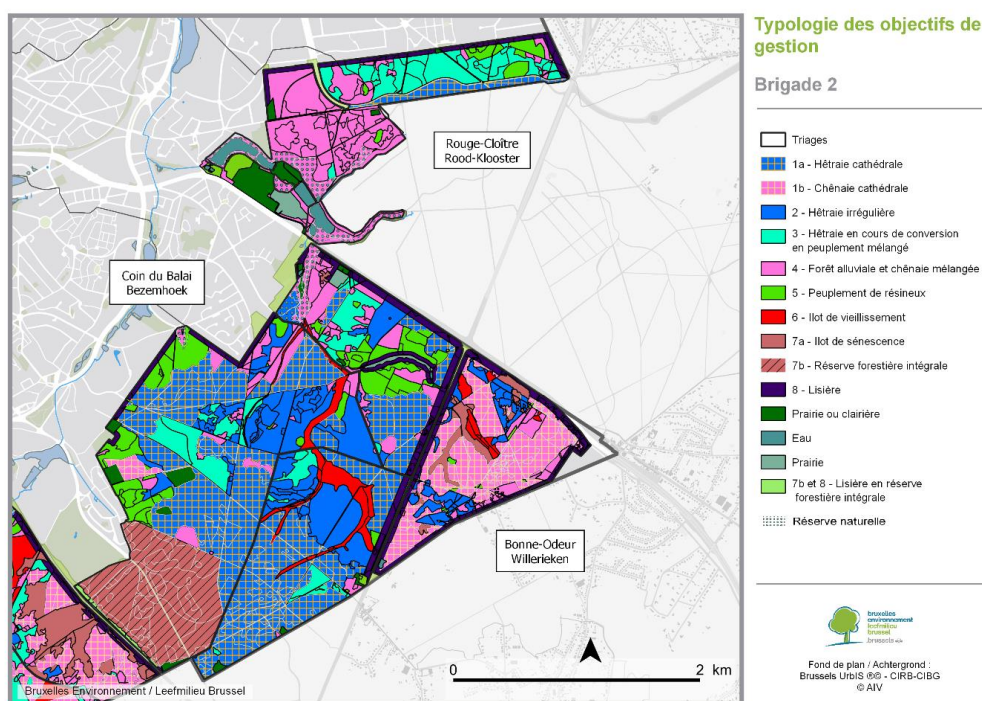
7 Annexes

Annexe 1 : cartes de la typologie des objectifs de gestion de la Forêt de Soignes, fournies par l'administration Bruxelles-Environnement et les gardes forestiers.

Annexe 1 – Carte 1 :

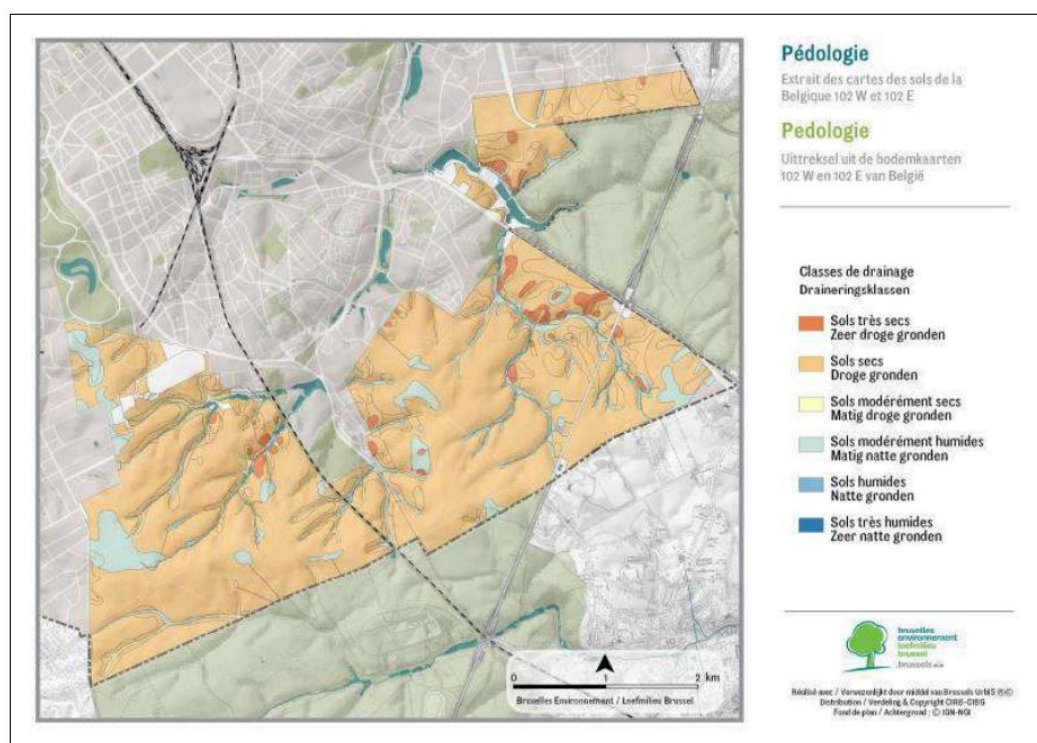


Annexe 1 – Carte 2 :



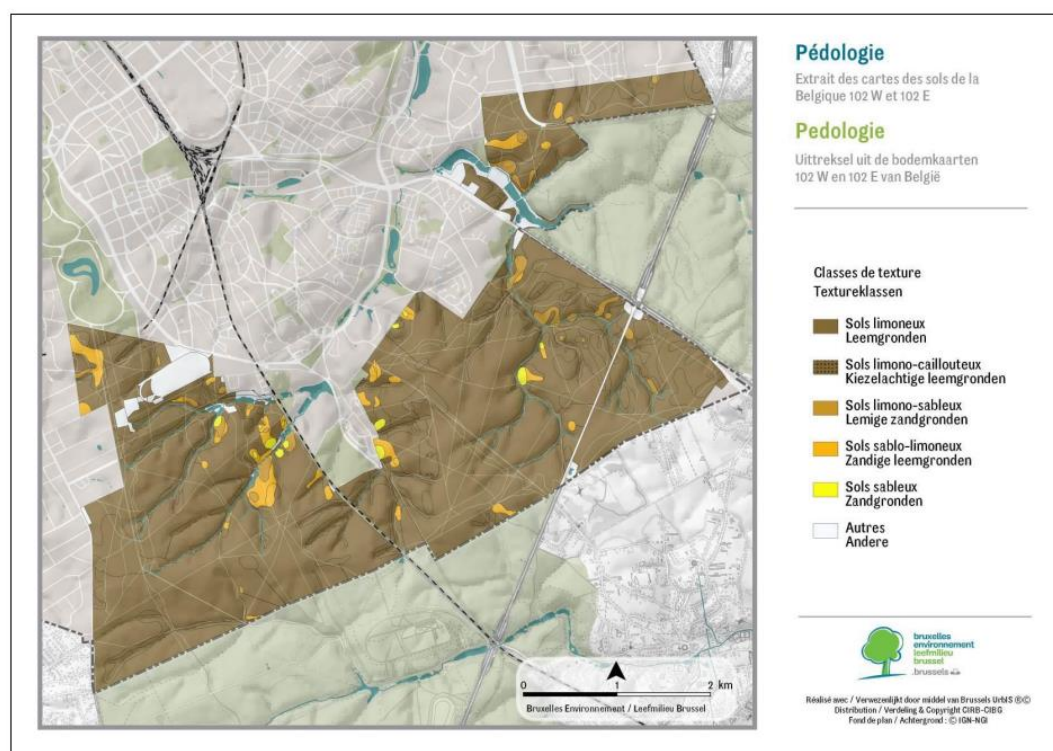
**Annexe 2 : Cartes provenant du « Plan de gestion de la forêt de Soignes bruxelloise »,
fournies par l'administration Bruxelles-Environnement et des gardes forestiers.**

Annexe 2 – Carte 1 : Pédologie (drainage)



Carte 3.10 – Classes de drainage des sols de la Forêt de Soignes bruxelloise

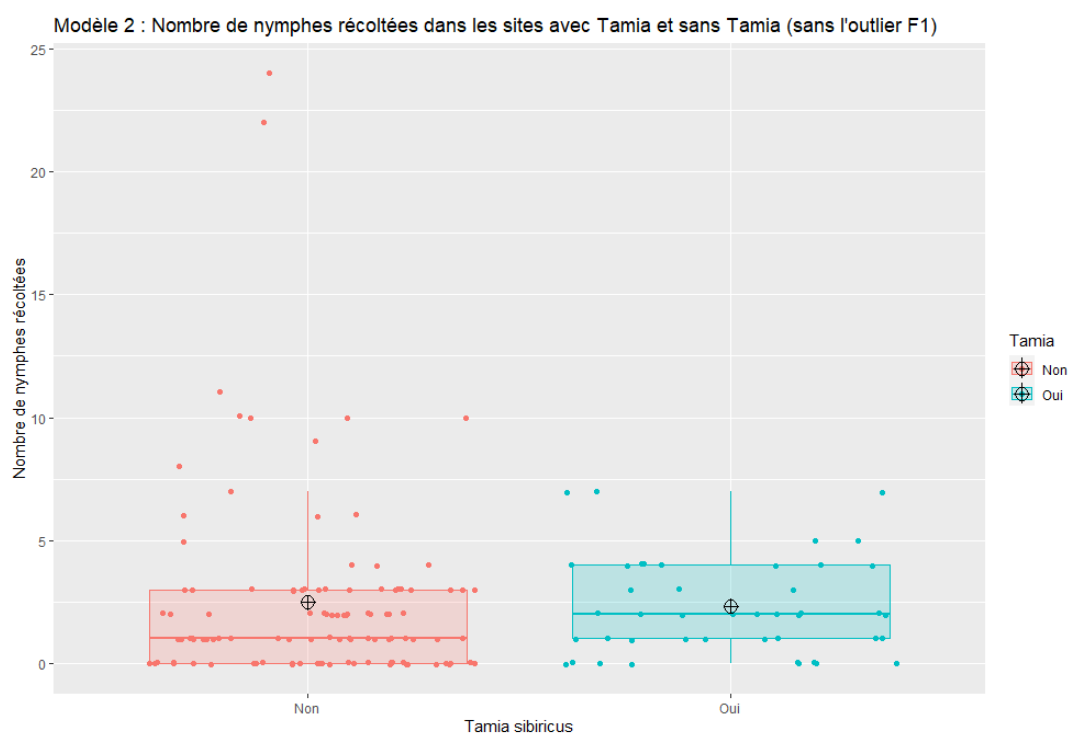
Annexe 2 – Carte 2 : Pédologie (Texture du sol)



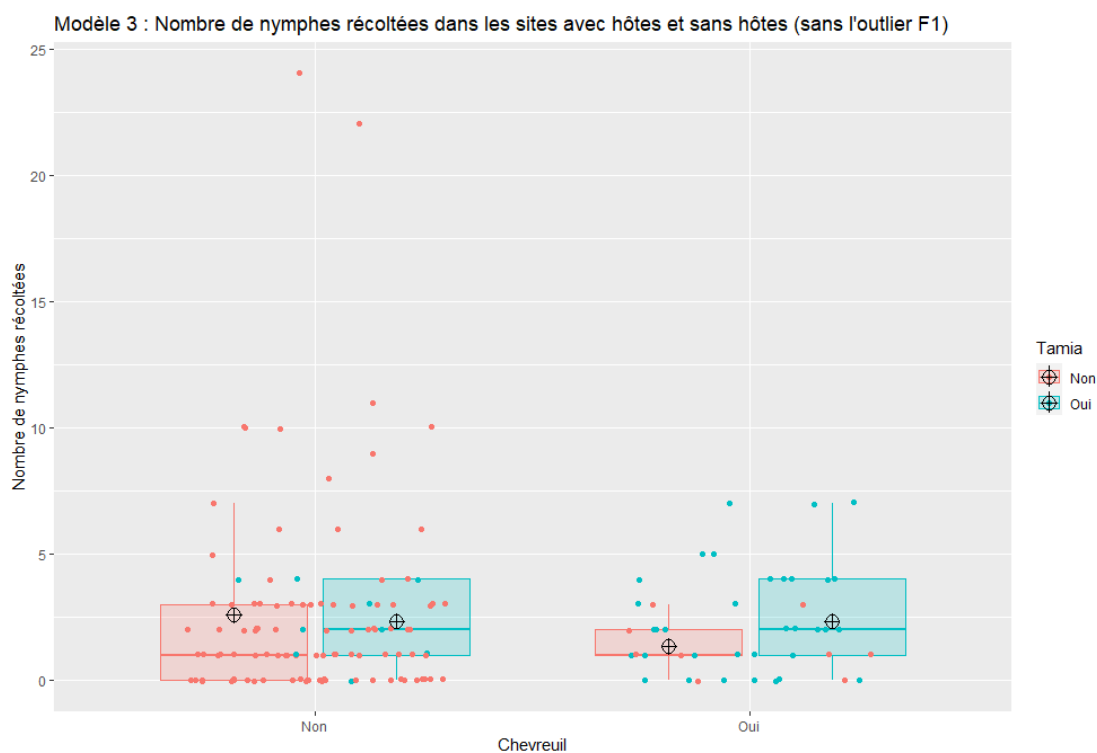
Carte 3.9 – Classes de texture des sols de la Forêt de Soignes bruxelloise

Annexe 4 : Graphiques modèles sans F1

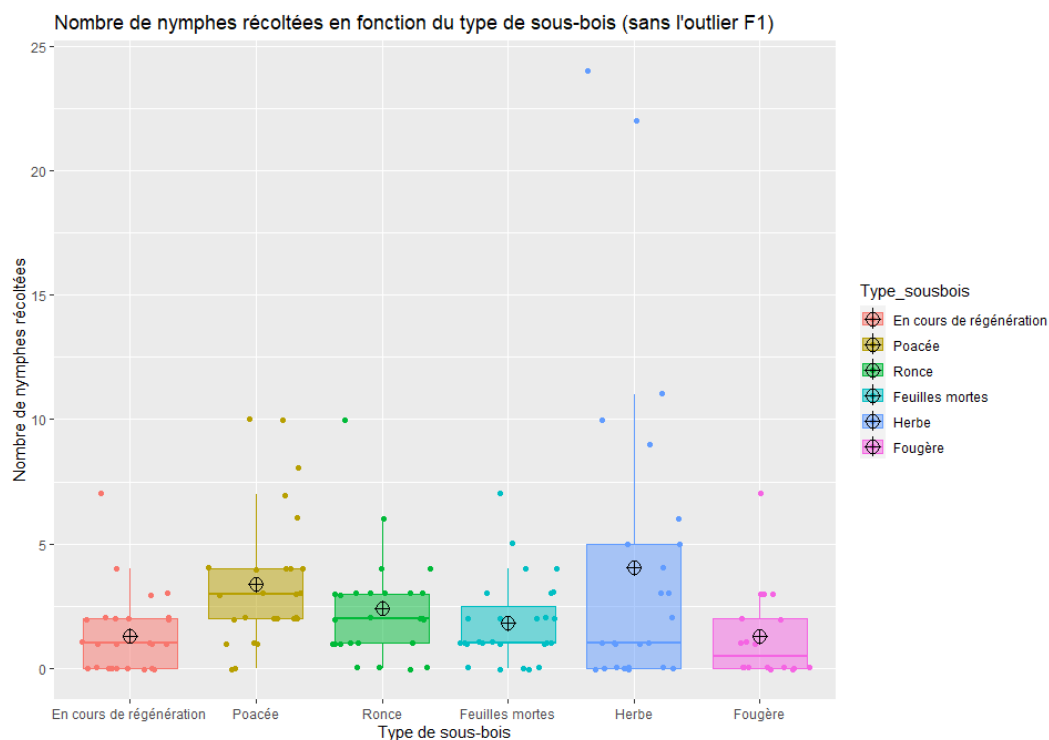
Annexe 4 – Graphique 1 : Modèle 2, l'impact de la présence du *Tamia* de Sibérie sur l'abondance des nymphes sans l'outlier F1



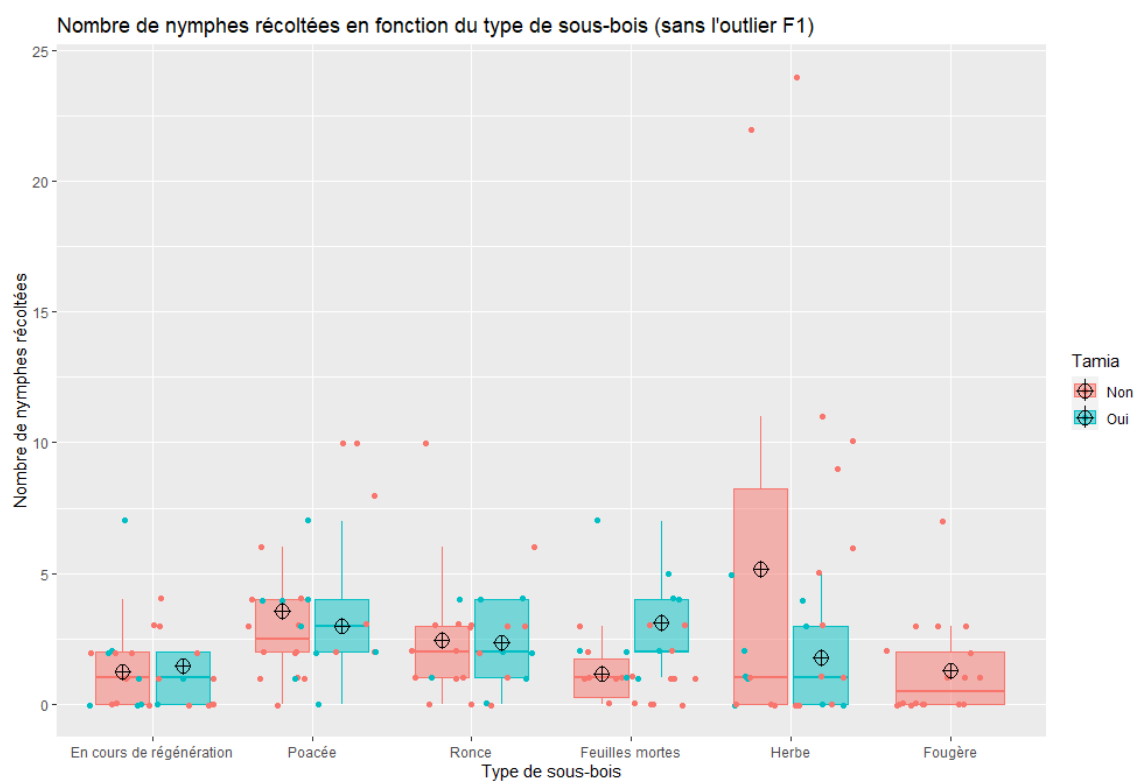
Annexe 4 – Graphique 2 : Modèle 3, l'impact de la présence des hôtes sur l'abondance des nymphes sans l'outlier F1.



Annexe 4 – Graphique 5 : Modèle 5, l'impact des sous-bois sur l'abondance des nymphes sans l'outlier F1.



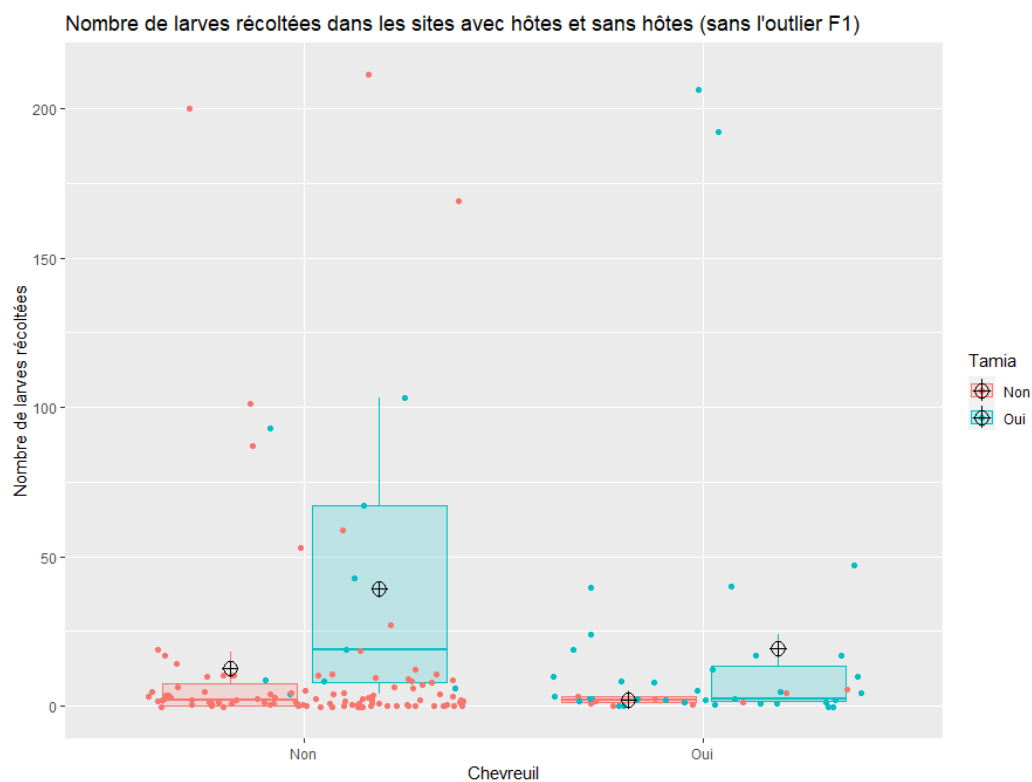
Annexe 4 – Graphique 6 : Modèle 5, l'impact du type de sous-bois et du Tamia de Sibérie sur l'abondance des nymphes sans l'outlier F1.



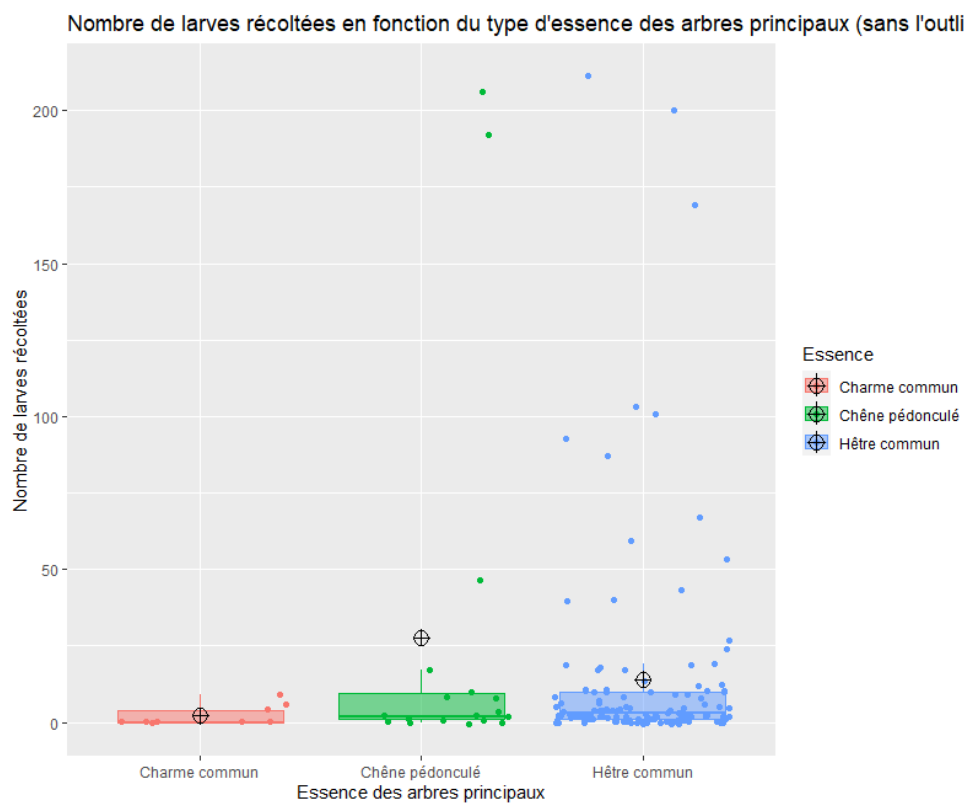
Annexe 4 - Graphique 7 : Modèle 2, l'impact de la présence du *Tamia* de Sibérie sur l'abondance des larves sans l'outlier F1.



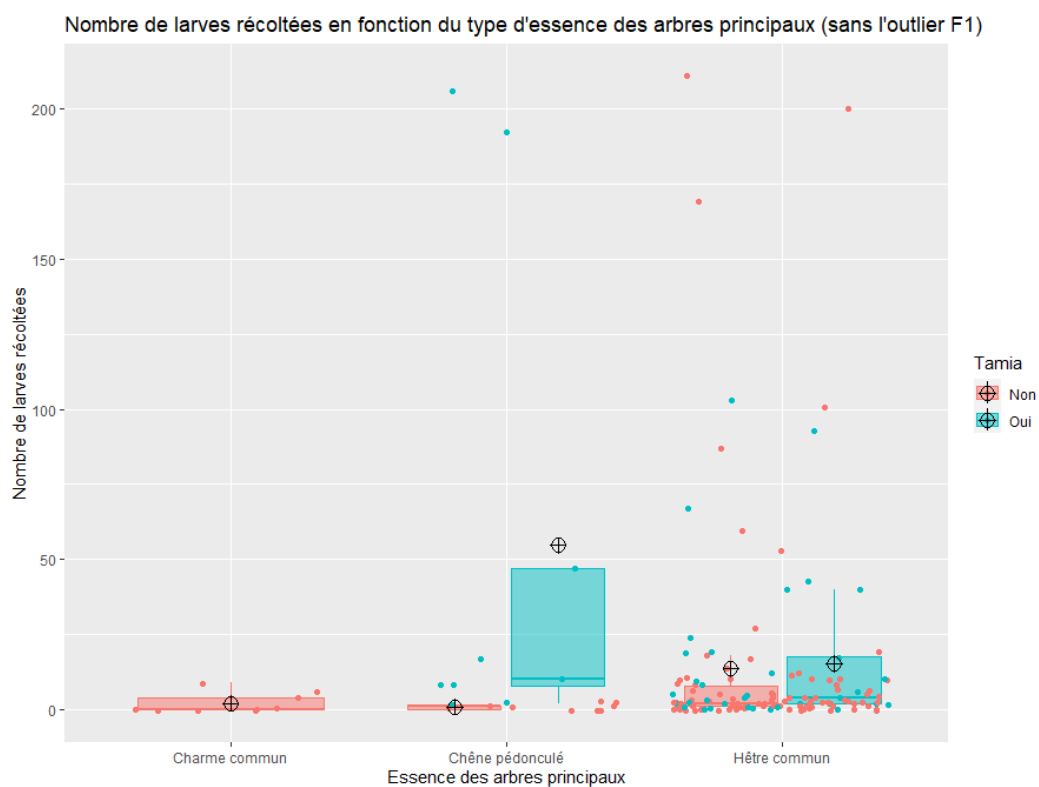
Annexe 4 – Graphique 8 : Modèle 3, l'impact de la présence des hôtes sur l'abondance des larves sans l'outlier F1.



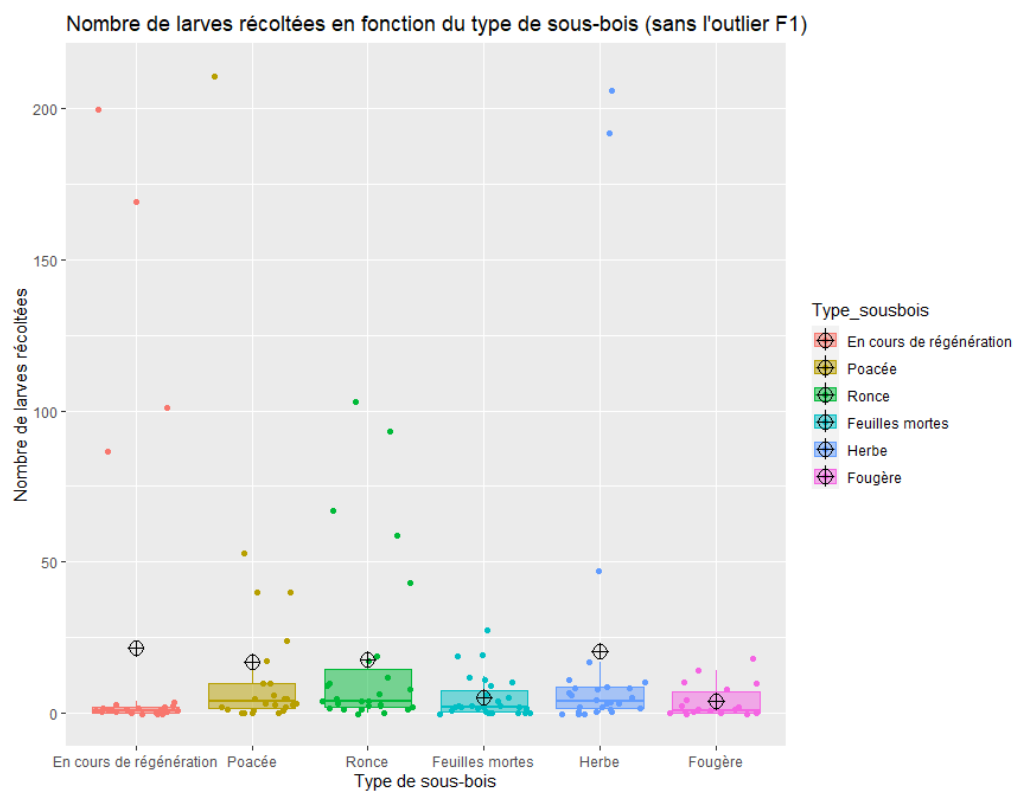
Annexe 4 – graphique 9 : : Modèle 4, l'impact des essences sur l'abondance des larves sans l'outlier F1.



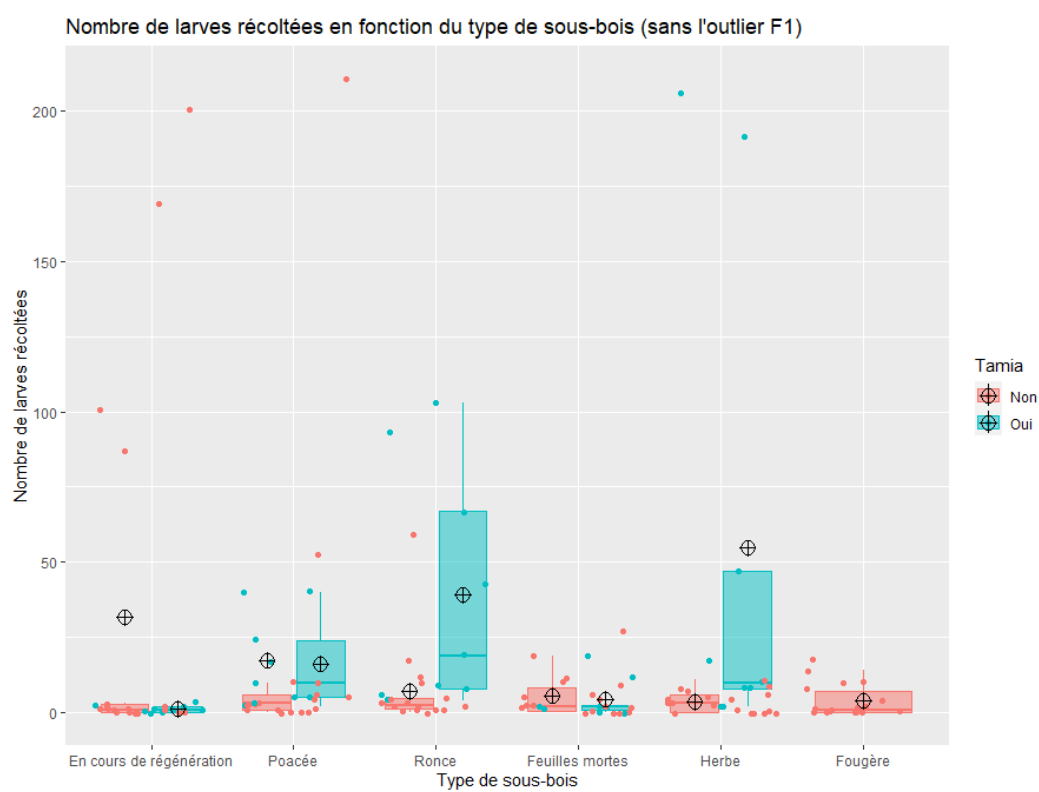
Annexe 4 – Graphique 10 : Modèle 4, l'impact des essences et du *Tamias* de Sibérie sur l'abondance des larves sans l'outlier F1.



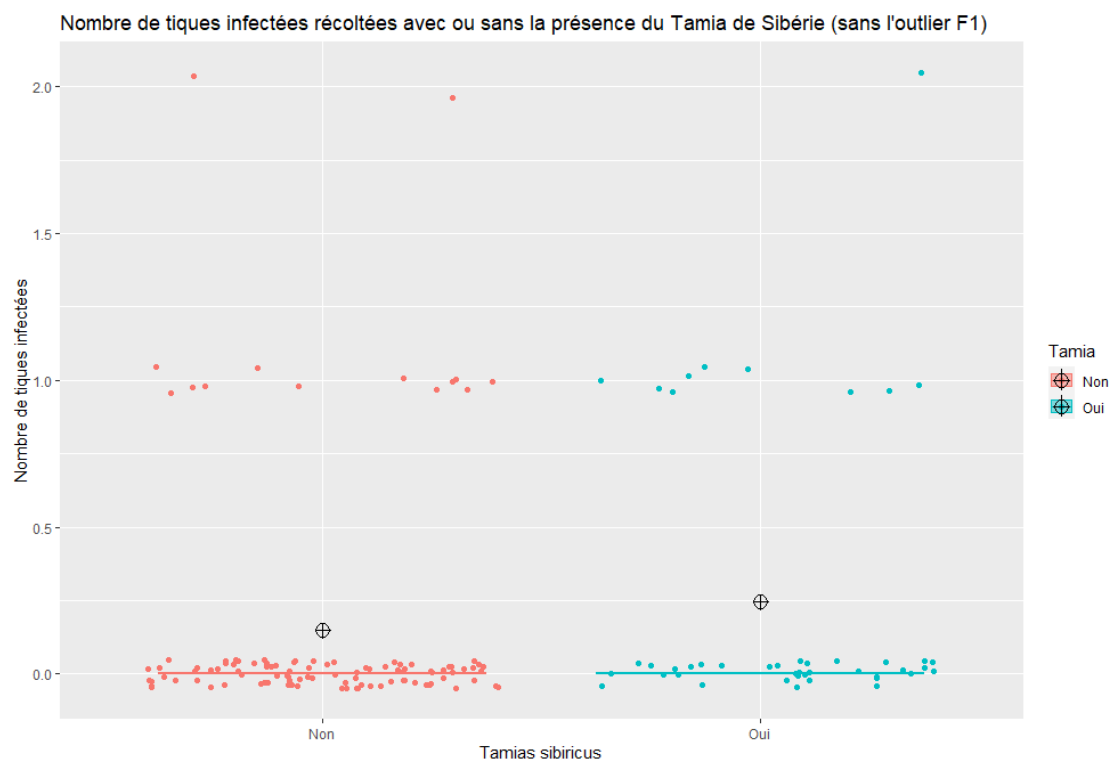
Annexe 4 – Graphique 11 : Modèle 5, l’impact des sous-bois sur l’abondance des larves sans l’outlier F1.



Annexe 4 – Graphique 12 : Modèle 5, l’impact du sous-bois et du Tamia de Sibérie sur l’abondance des larves sans l’outlier F1.



Annexe 4 – Graphique 13 : Modèle 6, l’impact de la présence du Tamia de Sibérie sur l’abondance des tiques infectées par *Borrelia burgdorferi s.l* sans l’outlier F1.



Annexe 4 – Graphique 14 : Modèle 6, l’impact de la présence du Tamia de Sibérie sur l’abondance des tiques infectées par *Borrelia afzelii* sans l’outlier F1.

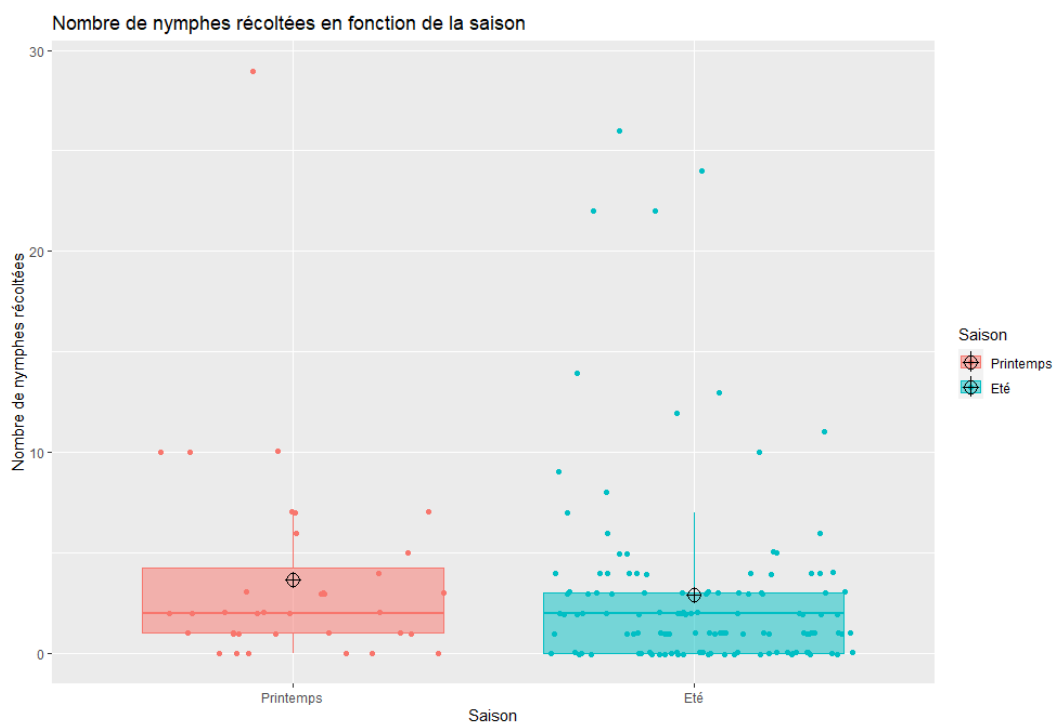


Annexe 5 : Tableau des résultats statistiques des modèles complets sur l'abondance des tiques en Forêt de Soignes.

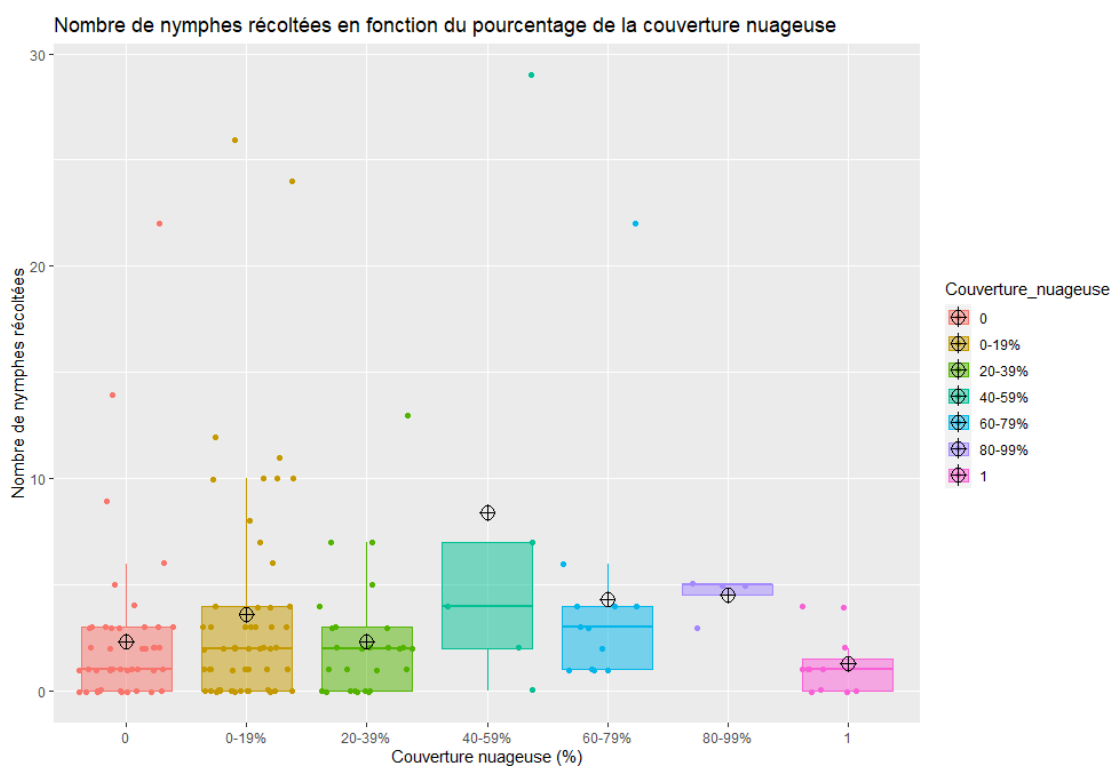
Variables explicatives		Modèle Nympe		Modèle Larve		Modèle Infecté		Modèle B. afzelii	
		Estimate	IRR	Estimate	IRR	Estimate	IRR	Estimate	IRR
Intercept		-1.8947.	0.15.	-0.2191	0.80	-0.8689	0.42	-1.2594	1
Saison	Printemps	0.3214.	1.38.	0.9423 ***	2.57 **				
	Eté	Référence		Référence					
Essence	Charme commun	Référence							
	Chêne pédonculé	2.5631 *	12.98 *						
	Hêtre commun	2.3386 *	10.37 *						
Couverture nuageuse	0%	Référence							
	0-19%	0.4175 *	1.52 *						
	20-39%	-0.0122	0.99						
	40-59%	0.8273.	2.29.						
	60-79%	0.6574 *	1.93 *						
	80-99%	0.6057	1.83						
	100%	-0.1263	0.88						
Taille du sous-bois				0.0369 ***	1.04 ***				
Peuplement	CC			Référence					
	FACM			3.5241 ***	33.92 ***				
	IV			-0.1337	0.87				
	HCCPM			2.415 ***	11.19 ***				
	HI			0.6369	1.89				
	HR			2.8824 ***	17.86 ***				
	P/C			1.4865 *	4.42 *				
	PR			-0.4556	0.63				
	HC			2.8809 ***	17.83 ***				
Humidité				-0.0192 *	0.98 *	-0.0216 *	0.98 *	-0.0261 *	0.97 *
Réserve naturelle	Non			Référence		Référence		Référence	
	Oui			0.8751 *	2.4 *	1.8864 ***	6.6 ***	1.5584 *	4.75 *
AIC		666.9		1084		188.8		137.7	

Annexe 6 : Graphiques des modèles complets

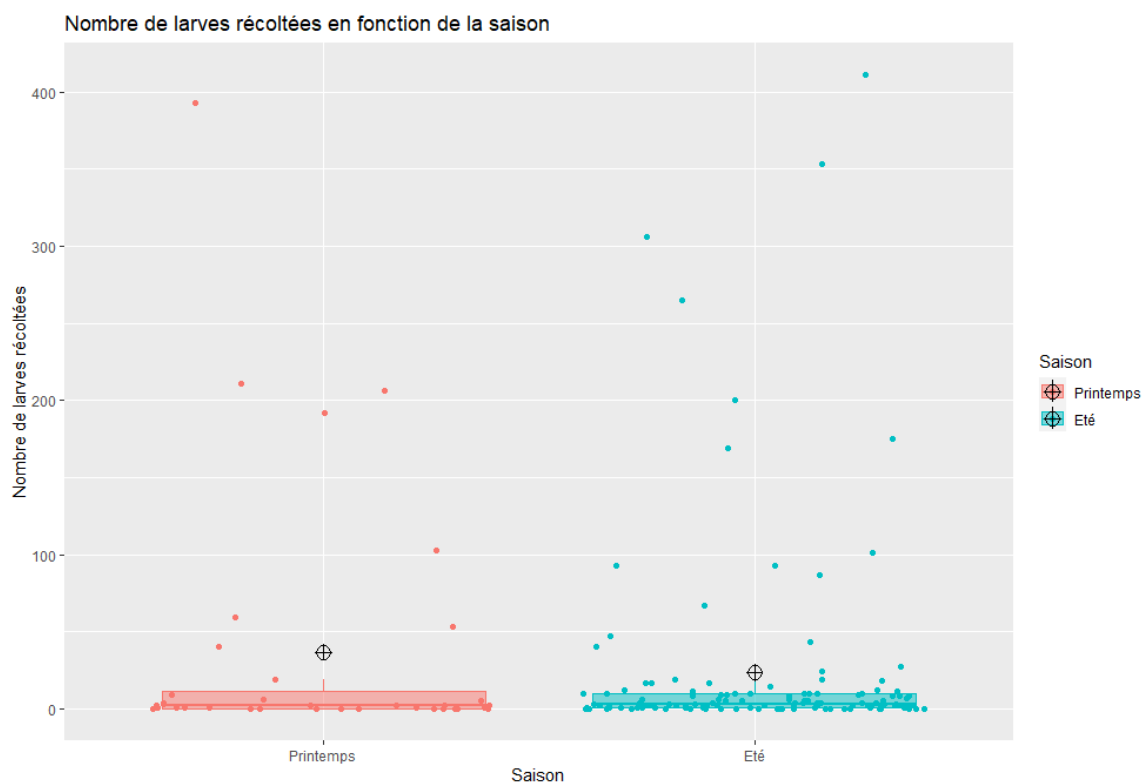
Annexe 6 – Graphique 1 : Modèle complet Nymphes, l'influence de la saison sur l'abondance des nymphes.



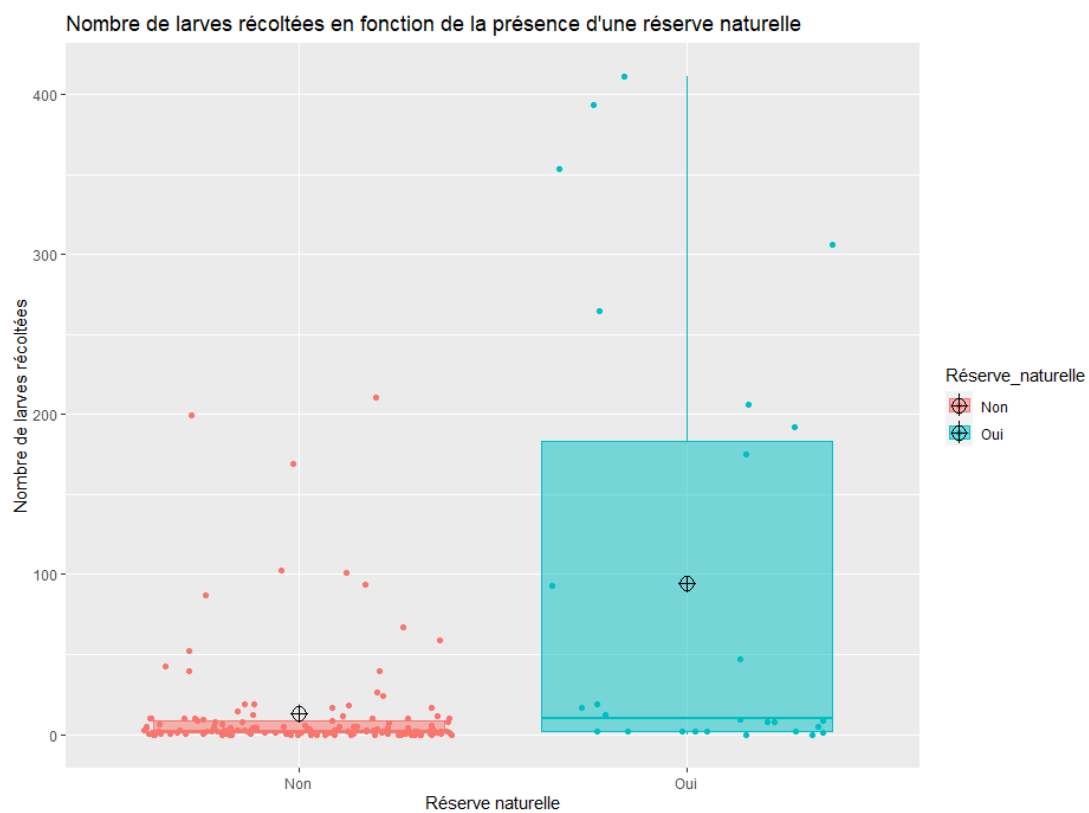
Annexe 6 – Graphique 2 : Modèle complet Nymphes, l'influence de la couverture nuageuse sur l'abondance des nymphes.



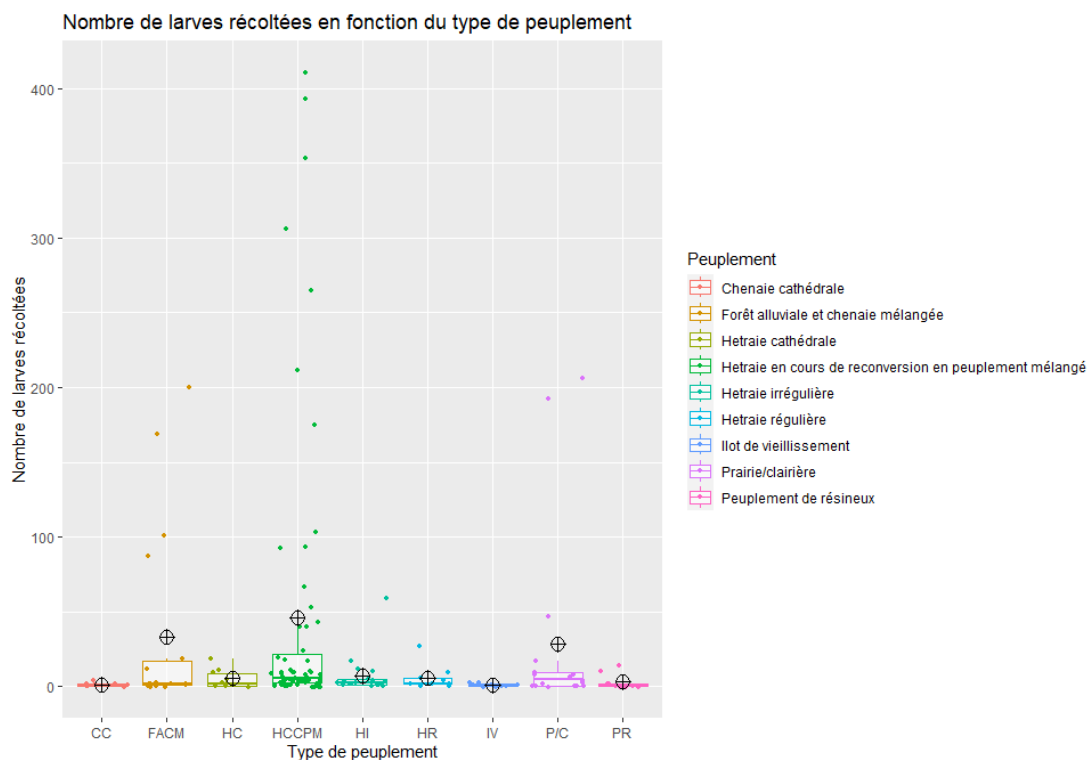
Annexe 6 – Graphique 3 : Modèle complet Larves, l'influence de la saison sur l'abondance des larves



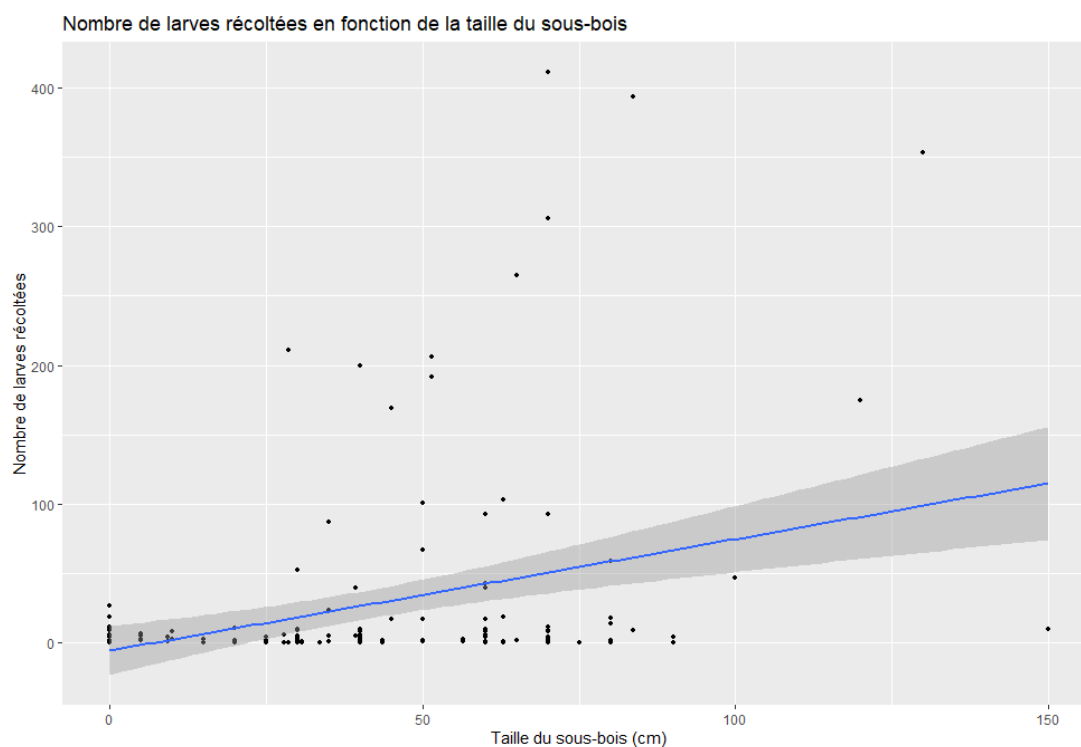
Annexe 6 – Graphique 4 : Modèle complet Larves, l'influence de la réserve naturelle sur l'abondance des larves.



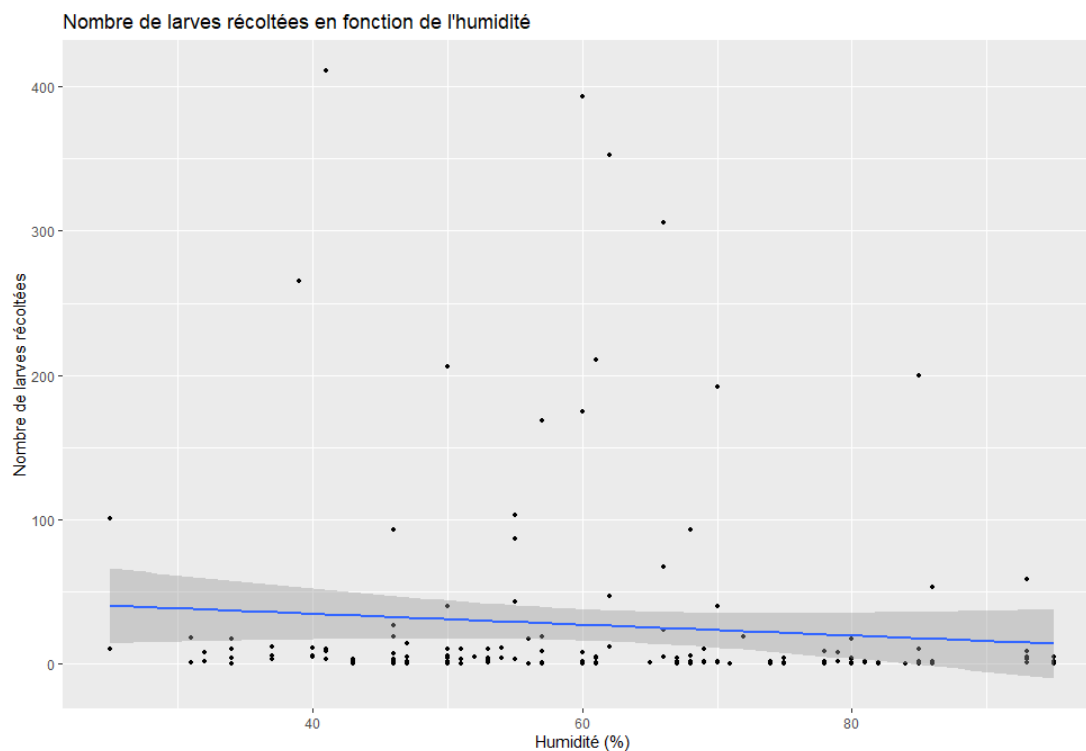
Annexe 6 – Graphique 5 : Modèle complet Larves, l'influence du type de peuplement sur l'abondance des larves.



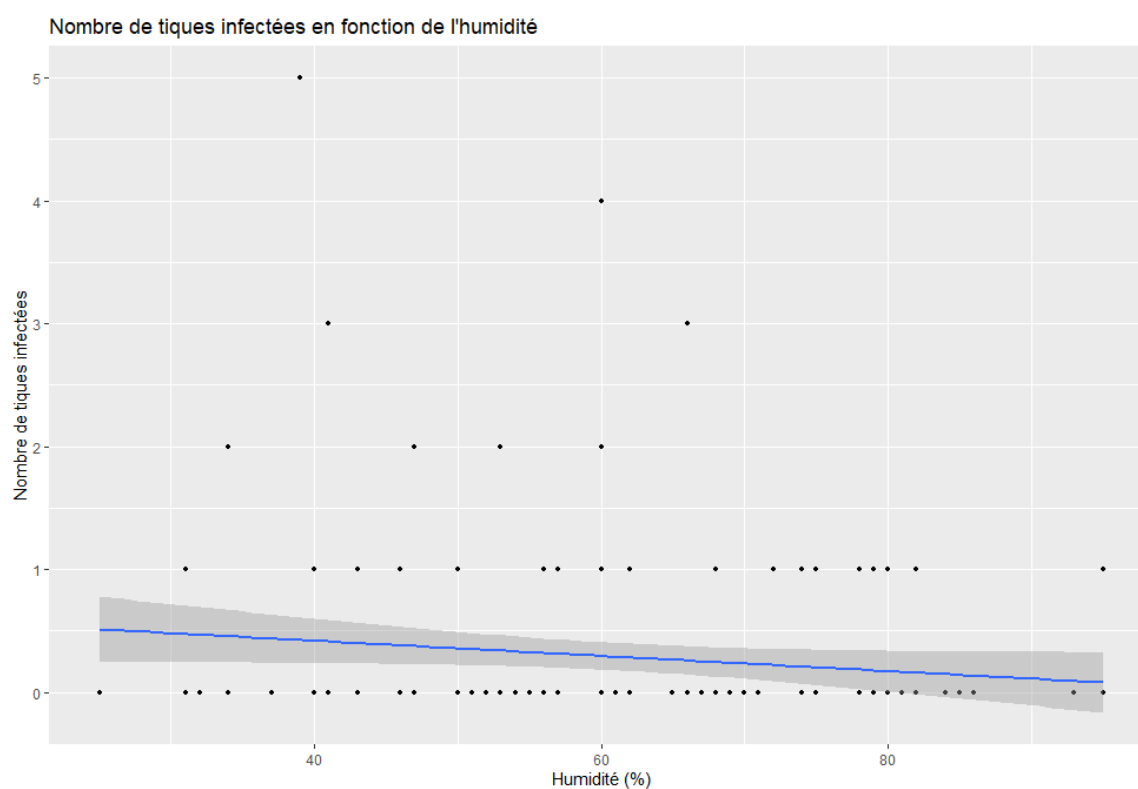
Annexe 6 – Graphique 6 : Modèle complet Larves, l'influence de la taille du sous-bois sur l'abondance des larves.



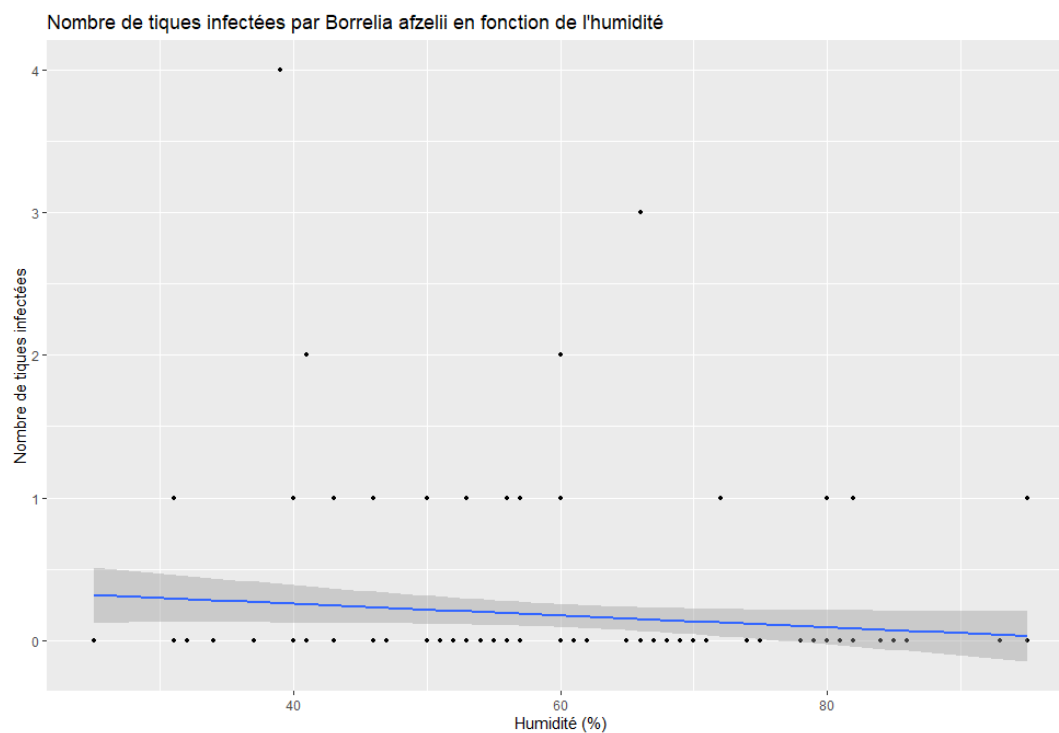
Annexe 6 – Graphique 7 : Modèle complet Larves, l'influence de l'humidité sur l'abondance des larves.



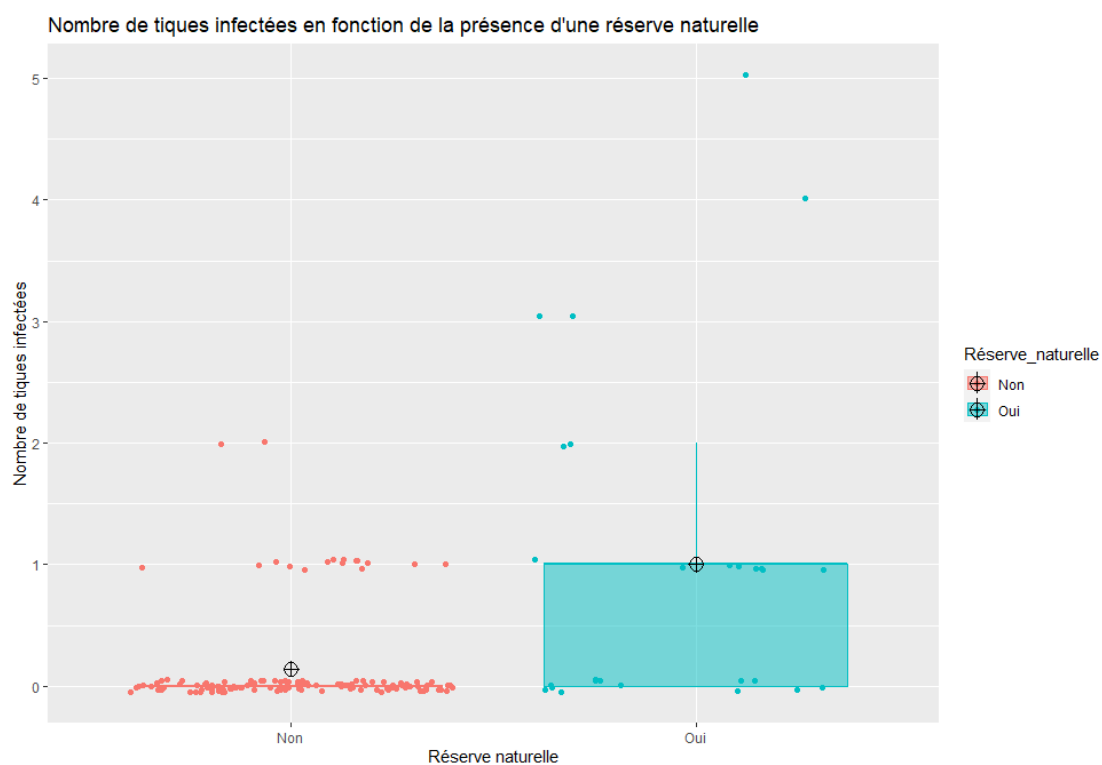
Annexe 6 – Graphique 8 : Modèle complet Infecté, l'influence de l'humidité sur l'abondance des tiques infectées par *Borrelia burgdorferi* s.l.



Annexe 6 – Graphique 9 : Modèle complet Afzelii, l'influence de l'humidité sur l'abondance des tiques infectées par *Borrelia afzelii*.



Annexe 6 – Graphique 10 : Modèle complet Infecté, l'influence des réserves naturelles sur l'abondance des tiques infectées par *Borrelia burgdorferi s.l.*



Annexe 6 – Graphique 11 : Modèle complet Afzelii, l'influence des réserves naturelles sur l'abondance des tiques infectées par *Borrelia afzelii*.

