

Université de Perpignan Via Domitia

Master Biodiversité, Ecologie, Evolution

Parcours « Biodiversité et Développement Durable »

Etude des facteurs écologiques liés à la distribution de la tique *Ixodes ricinus* dans le sud de la France

ROVERA Marie

Année universitaire : 2018 - 2019

Sous la direction de : Hélène VERHEYDEN

CEFS



Table des matières

Introduction.....	1
Matériel et Méthode.....	4
1) Matériel biologique.....	4
a) Cycle de vie d' <i>Ixodes ricinus</i>	5
2) Choix des sites de collectes	5
a) Détermination des sites de collectes par SIG	6
3) Collecte des tiques.....	7
a) Conditions des collectes.....	7
b) Méthode du drap.....	7
4) Données obtenues.....	8
a) Données tiques	8
b) Données environnementales	9
c) Données météorologiques.....	9
d) Données climatiques.....	9
e) Traitement des données.....	10
Résultats.....	11
1) Examen des données.....	11
2) Modèles GLM.....	13
3) Données sur le nombre de tiques.....	13
a) Données environnementales.....	13
i) Nymphes.....	14
ii) Adultes.....	15
b) Données climatiques.....	15
i) Précipitations.....	16
ii) Température.....	16
c) Données météorologiques.....	17
Discussion.....	18
1) Distribution de la tique <i>Ixodes ricinus</i>	18
2) Effet des données environnementales sur les tiques.....	20
3) Effet des données climatiques sur les tiques.....	21
4) Effet des données météorologiques sur les tiques.....	22
Conclusion.....	23
Bibliographie.....	23

Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier Hélène VERHEYDEN pour m'avoir accueillie au sein de son équipe et permis de réaliser mon stage et gagner en rigueur scientifique.

Je remercie Nicolas CEBE et Benoit CORACIN de m'avoir accompagn  e et aid  e à mener à bien mes collectes de tiques. Merci    Valentin Ollivier et Maxime DUHAYON pour les moments passés sur le terrain dans l'Hérault, le Gard et dans l'Ardèche.

Merci    Laurence VIAL de m'avoir int  gr  e dans son équipe et de m'avoir fait participer aux collectes de *Hyalomma Marginatum* sur les chevaux. Merci    Bruno LOURTET de m'avoir apporté son aide pour la partie cartographique de mon stage.

Merci à l'équipe d'EPIA, Karine CHALVET-halvet-Renvois pour m'avoir aiguill  e pour le traitement des données. Merci    Isabelle LEBERT et Valérie POUX pour leur aide pour les collectes en Ardèche et pour m'avoir fait parvenir les données climatiques.

Merci    Laura GERVAIS, ma collègue de bureau pour ton aide et tes encouragements. Merci    Delphine DUCROS et à Jeffrey CARBILLET pour leurs conseils.

Merci    Marie-Claude BONIFACE qui m'a fait parvenir l'offre de stage et pour ces encouragements. Merci à ma famille pour leur soutien pendant mes deux années d'étude de master. Merci à mon Valentin pour tout.

Contexte

Le CEFS (Comportement et Ecologie de la Faune Sauvage) est spécialisé dans l'étude du comportement des grands herbivores (cervidés et bovidés) et des écosystèmes dans lesquels ils sont consommateurs de végétaux et des proies pour les chasseurs et les grands carnivores. Ces travaux favorisent une approche centrée sur l'individu et le suivi à long terme d'individus marqués, de leur naissance à leur mort si possible. Les objectifs scientifiques du CEFS sont de comprendre le fonctionnement des populations d'ongulés sauvages en relation avec les facteurs environnementaux et les activités humaines, et proposer des outils de suivi et de gestions des populations, de leurs impacts sur les populations agricoles et sylvicoles ainsi que sur la biodiversité.

Le projet CLIMATICK est commun à plusieurs unités : EPIA (Unité Mixte de Recherche Épidémiologie) de Clermont Ferrant, UMR ASTRE (Animal, Santé, Territoires, Risques & Écosystèmes) de Montpellier et le CEFS (Comportement et Ecologie de la Faune Sauvage) à Auzeville-Tolosane. Le projet porte sur le risque actuel représenté par les tiques indigènes (*Ixodes ricinus*) et ses pathogènes mais également sur les nouveaux risques liés aux tiques exotiques des régions plus chaudes potentiellement invasives (*Hyalomma marginatum* vecteur du virus FHCC, établi dans le sud de la France). À l'aide d'observations et d'expérimentations, des modèles dynamiques seront développés pour étudier l'activité des tiques en fonction de la météo, des hôtes et de la répartition des forêts en lien avec le changement climatique. La projection en climat futur sera faite pour 2050.

Introduction

Au cours des dernières décennies, la hausse de la température de l'air en surface dans certaines régions de notre planète a suscité un débat au sein de la communauté scientifique sur les causes et les impacts de cette augmentation, en particulier si elle provient d'activités anthropiques ou d'origine naturelle (Varotos, 2019). Cette augmentation de température est corrélée avec une augmentation du risque d'extension de nombreuses maladies à transmission vectorielle (Andrew K. Githeko et al., 2000). À ce jour, la question de l'impact du changement climatique sur l'épidémiologie des maladies et de l'émergence de maladies vectorielles est largement débattue et est devenue un thème préoccupant pour nos sociétés. De plus, les récentes émergences en zones tempérées de maladies considérées comme tropicales alimentent les spéculations. (S. de La Rocque & J.A. Rioux, 2008 ; Gérard Duvallet, 2006). Les épidémiologistes s'interrogent sur les conséquences que pourraient avoir les bouleversements climatiques sur l'évolution des infections transmises à l'homme par des vecteurs hématophages, moustiques et tiques (Claude Chastel, 2002).

Ces émergences sont avant tout à associer à l'important accroissement des transports, des personnes, des biens ainsi qu'à la disparition des barrières physiques qui, jusqu'il y a encore peu, limitaient l'extension des pathogènes et de leurs vecteurs. L'évolution des paysages et des pratiques humaines ont créé des conditions écologiques favorables à la transmission des vecteurs et les changements des paramètres climatiques y participent également (S. de La Rocque & J.A. Rioux, 2008). Les modifications de la température, des précipitations et de l'humidité supposément induites par le réchauffement climatique affectent la biologie des vecteurs, notamment la prolificité, la survie, l'abondance des insectes, l'écologie des vecteurs et des hôtes intermédiaires et par conséquent, le risque de transmission de maladies. De plus, le réchauffement climatique aurait des répercussions sur la distribution latitudinale et altitudinale des vecteurs. De manière moins directe, les modifications de cycles saisonniers, de régimes pluviométriques ou la plus grande fréquence d'événements extrêmes peuvent affecter les interfaces avec les hôtes, les modalités de transmission de certaines maladies et par là leur répartition ou leur incidence (S. de La Rocque & J.A. Rioux, 2008 ; Gérard Duvallet, 2006 ; Andrew K. Githeko et al., 2000).

Les tiques constituent un groupe important de vecteurs arthropodes, elles sont caractérisées par la diversité des agents pathogènes (*Borrelia*) qu'elles transmettent, par leur impact sur la santé humaine et animale et par leurs implications socio-économiques. En Europe, *Ixodes* est la tique

la plus importante en raison de sa large répartition dans les écosystèmes et de la diversité des agents pathogènes transmis, en particulier de *Borrelia* qui est responsable de la maladie de Lyme. Leur présence accrue dans l'environnement depuis le début du 20^{ème} siècle est indéniable, en raison de modifications majeures de la biodiversité causées par l'homme (Boulanger, 2019).

L'augmentation de l'abondance des tiques, dû à un meilleur taux de survie de ces dernières, est liée aux changements globaux, incluant à la fois le réchauffement climatique (températures et précipitations), les modifications directes du paysage par l'homme, avec des actions de déforestation, d'enfrichement et de transformation de zones agricoles en zones boisées, ainsi que les modifications indirectes liées à l'introduction ou l'augmentation de l'abondance et de la répartition de plantes et d'animaux qui favorisent la prolifération de tiques (Léger et al., 2013 ; Medlock et al., 2013). Ces changements environnementaux pourraient permettre une meilleure disponibilité des hôtes, essentiels pour la survie des tiques et pour l'achèvement du cycle de vie (Dumic, 2018). De plus, les modifications dans les comportements humains ont entraîné une hausse de la fréquentation des écosystèmes infestés par les tiques avec l'augmentation des activités récréatives en plein air (Boulanger and McCoy, 2016).

Le climat n'est pas le seul à agir sur la modification de la dispersion des tiques. En effet, *I. ricinus* ne peut par elle-même se déplacer sans mode de transport. La dispersion des tiques est ainsi facilitée par les hôtes qui acheminent les tiques vers les sites qui sont maintenant devenus favorables à la survie de ces dernières (Danielova et al., 2006). Le chevreuil est un des ongulés le plus abondants en Europe de l'Ouest (Linnel et Sachos, 2011). En France, l'expansion numérique et géographique de l'espèce est probablement due à l'instauration des plans de chasse après la guerre, la fragmentation accrue du milieu forestier par le maillage agricole urbain dans les plaines cultivables, mais aussi l'accroissement des surfaces boisées. Du fait de leur fréquentation des habitats boisés, favorables aux tiques, les grands ongulés comme le chevreuil sont considérés comme des hôtes importants et pourraient favoriser l'apparition d'une nouvelle population d'*Ixodes ricinus* (Brown et al., 2008, Medlock et al., 2013).

La présence des tiques de plus en plus importante dans l'environnement s'accompagne d'une augmentation du nombre de cas de maladies à tiques chez l'homme et chez les animaux domestiques (Boulanger and McCoy, 2016). Les tiques sont le vecteur le plus important après les moustiques de maladies qui touchent les humains et les animaux domestiques). La faune sauvage et les animaux domestiques sont les réservoirs de certains agents infectieux qui se multiplie et persiste sans vraiment provoquer une symptomatologie clinique sévère chez eux (Boulanger and McCoy, 2016).

L'homme constitue alors la plupart du temps un hôte accidentel et une impasse pour l'agent infectieux. La maladie de Lyme est la maladie vectorielle la plus répandue en Europe (Vayssier-Taussat et al., 2015, Cosson, 2018). En France, l'incidence moyenne de la maladie était de 84 cas pour 100 000 habitants, cependant dans certaines régions, cette dernière pourrait être supérieure à 200 cas (Cosson, 2018). En 2018, le nouveau nombre de cas diagnostiqués en France est de 104 cas pour 100 000 habitants, soit plus de 67 000 nouveaux cas contre 69 pour 100 000 habitants en 2017 avec 45 000 cas (FuturaScience). Depuis les deux dernières décennies, l'incidence de la maladie de Lyme est en constante augmentation, notamment en Europe et en Amérique. Cette maladie entraîne de l'arthrite, des douleurs aux articulations ou encore des problèmes neurologiques (Passeport-santé). En France, le nombre de cas de la maladie de Lyme reporté augmente chaque année. Cette augmentation peut être due soit à une augmentation de l'incidence de la maladie, soit à une augmentation du nombre de déclarations, suite à une meilleure connaissance de la maladie de Lyme (Cosson, 2018).

Dans le domaine des maladies transmissibles, l'un des principaux défis de santé publique est de pouvoir prédire l'arrivée et la localisation des populations courant un risque d'être infectées par un agent pathogène (Hauser, 2018). Dans le cadre de maladie à transmission vectorielle, ce genre de prévisions nécessite des connaissances écologiques importantes notamment sur le cycle de vie du vecteur et sur les conditions environnementales favorables ou défavorables à son établissement ainsi qu'à son maintien (Hauser, 2018). Il apparaît alors essentiel de bien comprendre le fonctionnement des associations hôtes-tiques dans leurs milieux naturels et des conditions environnementales favorables aux tiques afin de mieux prévoir les risques qui y sont associés, et ainsi, améliorer les conditions de vie de l'homme et de l'animal domestique. (Boulanger and McCoy, 2016)

Mon stage intervient dans le cadre du projet CLIMATICK de l'INRA. Les objectifs de ce projet sont dans un premier temps, de projeter les schémas spatio-temporels de l'activité future des tiques indigènes et exotiques dans le scénario de changement climatique. Puis, en réponse aux projections obtenues, de proposer l'adaptation de la stratégie de communication, de surveillance et de gestion de l'environnement afin d'améliorer la prévention des maladies. CLIMATICK se focalise sur le risque actuel représenté par les tiques indigènes (*Ixodes ricinus*) et ses agents pathogènes parmi les menaces les plus graves pour la santé humaine et animale. En utilisant des données d'observations et expérimentales, des modèles mathématiques et statistiques seront développés pour prédire l'activité des tiques en tenant compte des variables météorologiques, des populations hôtes et de la répartition de la forêt en lien avec le changement climatique.

Mon stage se déroule dans la première partie du projet CLIMATICK. Cette première partie du projet permettra de fournir une base de connaissances pour la réalisation des modèles statistiques de prédiction de l'activité des tiques sous l'effet du changement climatique. Il est attendu sous l'effet du changement climatique que le climat méditerranéen du sud de la France remonte de plus en plus vers le nord et l'ouest de la France ainsi qu'en altitude. Toutefois, nous manquons de connaissances pour comprendre les capacités d'adaptation de la tique *Ixodes ricinus* à ce climat globalement plus chaud et sec. L'objectif de mon stage est d'étudier les facteurs écologiques liés de la distribution de la tique *Ixodes ricinus* dans le Sud de la France aux limites sud de son aire de répartition. Pour cela j'ai recherché des sites à priori favorables à la présence de tiques le long de deux gradients (ouest-est et sud-nord) dans le sud de la France. J'ai sélectionné ceux qui se prêtaient à l'échantillonnage de tiques puis j'ai effectué 3 campagnes de comptages et prélèvements des tiques à la période favorable entre avril et juin 2019. J'ai ensuite analysé les données collectées afin de déterminer les variables écologiques et climatiques influençant la distribution de la tique *Ixodes ricinus* le long de ces gradients.

Matériel et Méthode

1) Matériel biologique

L'espèce de tique étudiée dans le cadre de mon stage est la tique *Ixodes ricinus*, appartenant à la famille des *Ixodidae*. Cette tique est la plus fréquemment rencontrée en Europe et sa présence a été également reportée en Afrique du nord, en Tunisie et au Maroc (Hauser, 2018). *I. ricinus* est une tique ubiquiste, c'est-à-dire que cette dernière est en capacité d'infester une gamme importante d'hôtes tels que les oiseaux, les ongulés ainsi que l'homme. Cette ubiquité n'empêche pas une préférence pour certaines espèces d'hôtes, mais permet que le cycle ne soit pas interrompu si l'hôte recherché est absent. *I. ricinus* se disperse dans la nature par le biais du déplacement de ses hôtes lors de ses phases parasitaires, déplacement qui peuvent être très important lorsqu'ils impliquent notamment des oiseaux (Boulanger and McCoy, 2016). La très large gamme d'hôtes qu'*I. ricinus* est susceptible d'infester explique en grande partie qu'elle soit vectrice de nombreux agents, bactéries, parasites et virus, qui peuvent l'infester simultanément. Le rôle d'*I. ricinus* dans les transmissions d'agents infectieux est largement connu en Europe depuis les années 1980 pour les bactéries *Borrelia* responsable de la maladie de Lyme (Boulanger and McCoy, 2016). La distribution de cette tique n'est pas uniforme et dépend du climat (température et hydrométrie), de l'altitude et de la végétation rencontrée (Tack et al., 2012).

a) Cycle de vie d'*Ixodes ricinus*

Les larves, les nymphes et les adultes sont les principales étapes de la vie de ces tiques. Ces différents stades se différencient généralement par leur taille et certains détails anatomiques (Plantard et al., 2015). Ces tiques sont strictement hématophages et peuvent vivre entre 2 et 3 ans (Sonenshine et Roe, 2014 ; Bonnet et al., 2015). Au cours d'un repas, la tique peut prendre jusqu'à cent fois son poids de sang. Un repas sanguin dure entre deux et cinq jours au cours desquels la tique reste accrochée à son hôte. Après son repas de sang, elle se détache de son hôte et tombe au sol où elle se métamorphose au stade suivant. Une fois au sol, la tique se hisse sur un brin d'herbe à faible hauteur où elle se met à l'affût en étendant ses pattes avant et attend qu'une proie passe à proximité. Sur ses pattes avant, elle possède un organe sensoriel appelé organe de Haller (Haller, 1881). Grâce à cet organe, la tique détecte sa proie qui passe et essaie alors de s'agripper avec ses pattes avant. Une fois sur son hôte, la tique peut se déplacer un moment avant de choisir un endroit où piquer, ces derniers sont généralement des endroits bien irrigués, chauds et humides et où la peau est fine. Tous les stades, larves, nymphes et adultes, piquent sauf le mâle adulte qui ne se nourrit pas mais tente quand même de grimper sur un hôte pour rechercher et féconder les femelles. Les femelles fécondées tombent au sol et pondent de 2000 jusqu'à 3000 œufs qui éclosent quelques semaines plus tard puis les femelles meurent. Les larves sont prêtes à rechercher un hôte pour se nourrir au bout de quelques jours seulement. En général, elles restent à proximité de l'endroit où les œufs ont éclos et forment ce qu'on appelle des «nids», ce qui explique qu'on peut parfois se faire piquer par plusieurs dizaines de larves si on a la malchance de se frotter à un nid (Jean-François Cosson, 2018).

2) Choix des sites de collectes

Les sites de récoltes de tiques sont situés le long de deux gradients situés dans la Sud de la France. Le premier gradient ouest-est se situe entre Toulouse (31) et la presqu'île de Sainte Lucie (66) et le second gradient sud-nord va des alentours de Montpellier (34) jusqu'aux alentours d'Aubenas (07).

Les potentiels sites de collectes sont choisis au préalable par SIG selon certains critères puis seront précisés lors de prospections sur le terrain. Les sites sont sélectionnés en fonction des facteurs écologiques favorables à la présence de tiques, notamment la présence d'ongulés sauvages qui sont des hôtes importants pour les tiques. Cette présence est attestée par les chasseurs locaux (plans de chasse) et par la vérification sur le terrain de traces de présence d'ongulés sauvages. Les sites doivent offrir un habitat convenable aux tiques, c'est-à-dire être sous une couverture arborée (bois, lisière de bois ou haie), et des caractéristiques

topographiques favorables à un climat frais. De plus, afin de faciliter l'accès aux différents sites de collectes, ces deniers sont situés non loin des axes routiers et sur des terrains en accès libre. Enfin, pour ne pas confondre un effet altitude avec un effet distance à la Méditerranée, les sites sont placés à une altitude de moins de 500 m.

a) Détermination des sites de collectes par SIG

Une fois les deux gradients climatiques représentés sur QGIS, le but était de trouver 6 sites équidistants par gradient. Dans un premier temps, il fallait repérer les bois ou les haies pour les collectes. Pour cela, deux couches raster fournies par l'IGN ont été utilisées. La première est une couche orthophotographie de résolution 50 cm, la seconde est une couche représentant la carte IGN de randonnées au 25 millièmes. Après avoir sélectionné plusieurs sites potentiels, nous vérifions qu'ils soient assez grands pour pouvoir y installer nos transects de collectes. A la suite du travail du SIG et de la prospection sur le terrain, des sites définitifs ont été repérés à l'intérieur de l'emprise définie pour les gradients ouest-est et sud-nord. Après la prospection terrain, 13 sites de collectes ont été retenus (Figure 1). 7 sites se situent sur le gradient ouest-est : Gardouch (31), Payra sur l'Hers (11), Arzens (11), Floure (11), Lézignan-Corbières (11), Fontfroide (11) et Sainte Lucie (11). 6 sites sont le long du gradient sud-nord : Saint Jean de Cuculles (34), Logrian-Florian (30), La Grand Combe (30), Les Vans (07), Montréal (07), Saint Julien du Serre (07).



Figure 1 : Carte de l'emplacement des gradients ouest-est et sud-nord (encadrement) et de la position des sites de collectes (points).

Un site est une zone suffisamment grande pour contenir soit un cheminement de 300 m soit une zone permettant de prospecter 10 transects de 10m x 1m séparés d'au moins 20 mètres les uns des autres. Sur chaque transect un drap de 1 m² est tiré au sol. Les tiques qui sont à l'affût sur la végétation dans l'attente du passage d'un hôte s'accrochent sur le drap lors de son passage. Les tiques sont ensuite récoltées et comptées. Les transects sont choisis selon plusieurs critères. Ces derniers sont situés en forêt ou lisière de haie et à au moins 20 mètres d'une route goudronnée, le terrain ne doit pas être accidenté, ni trop en pente afin qu'il soit facilement accessible à pied. Les transects ont une végétation basse, inférieure à 40 cm ou possèdent un sol recouvert de feuilles mortes. De plus, la végétation doit être homogène entre les différents transects de chaque site. Pour une récolte efficace, les zones boueuses et contenant des flaques et des ronces sont à éviter. En effet, si le drap est mouillé, les tiques ne s'accrocheront pas et si le drap est trop sale, les tiques seront difficiles à voir.

3) Collecte des tiques

a) Conditions des collectes

Les collectes de tiques se dérouleront uniquement lorsque les conditions météorologiques sont favorables à ces dernières, les jours avec une température inférieure à 25 °C (Boulangier and McCoy, 2016) avec une probabilité de précipitations faibles et pas de grand vent. Les récoltes de tiques ont lieu le matin avant 12h00 car une chaleur importante n'est pas favorable à la présence de tiques. Cependant, si lors des jours de collectes, la chaleur n'est pas très importante, les relevés pourront s'effectuer durant toute la journée. Il y a 3 sessions de collectes pendant 3 mois, au mois d'avril, mai et juin. La première session se déroule du 23.04.2019 au 1.05.2019, la deuxième du 15.05.2019 au 22.05.2019 et la troisième du 4.06.2019 au 7.06.2019.

b) Méthode du drap

Les tiques seront récoltées avec la méthode dite « du drap ». L'échantillonnage par la méthode du drap permet de prélever les tiques à l'affût en simulant le passage d'un hôte. Ce leurre mécanique est réalisé à partir d'une pièce de tissu, appelée drap attachée à un bâton. Ce drap est trainé sur la végétation par le préleveur à l'aide d'une corde fixée aux deux extrémités du bâton. Le tissu mesure en général un mètre carré (1 m X 1 m). Pour visualiser plus facilement les tiques, ce tissu est de couleur claire. Sur chaque transect de chaque site, 3 tirages du drap sont effectués afin de collecter les tiques.

Le tirage du drap (Figure 2) est effectué en marchant lentement sur le côté du transect, avec le bras qui tient la cordelette tendue sur le côté de manière à éviter le plus possible de marcher là où le drap va passer et d'attraper des tiques sur le pantalon à la place du drap. Le tirage

commence en positionnant la fin du drap sur la ligne du début du transect et s'arrête quand le début du drap touche la ligne de fin du transect, ainsi 10 m² sont parcourus. Le drap doit être en contact en permanence avec le sol lors du tirage et le collecteur marche environ 1 m devant le drap.

Une fois le premier tirage effectué, l'inspection minutieuse du drap peut commencer en débutant pour l'inspection de la face supérieure puis la phase inférieure en retournant le drap par la baguette.

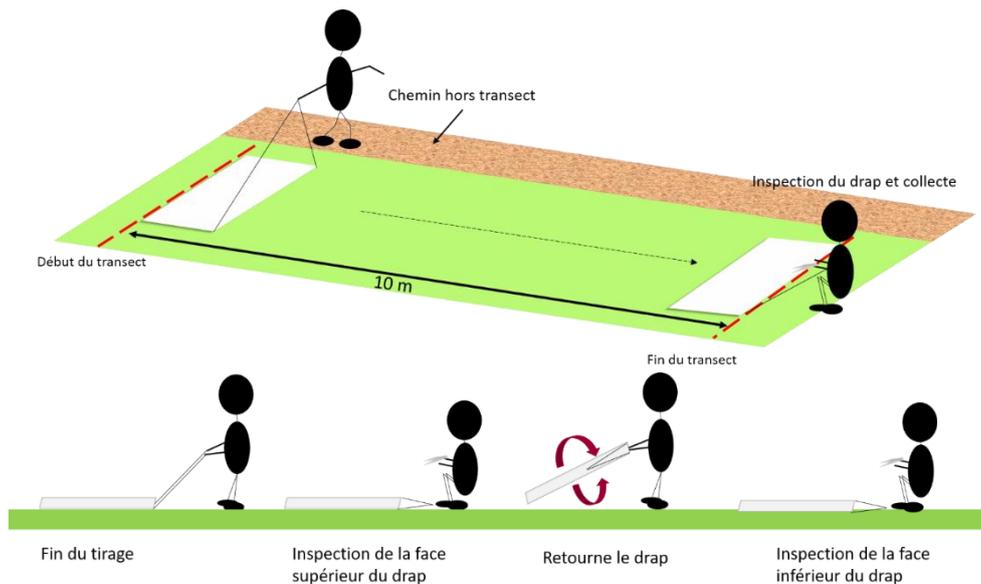


Figure 2 : Schéma de la méthode de collecte et comptage des tiques au drap

Les tiques sont comptées, prélevées et mises dans les pots. Le nombre de tique est reporté sur une fiche de terrain (Annexe 9), l'absence ou la présence de larves est indiquée mais elles ne sont pas collectées. Les larves sont retirées du drap à l'aide de scotch et jetées.

Une fois le drap débarrassé de toutes les tiques, un deuxième passage est effectué en repartant du début du transect, puis un 3ème passage est réalisé. Il faut prendre garde à ne pas marcher sur le transect et à ce que le drap ne touche aucune végétation pendant le retour au départ du transect. Ce dernier pourrait être contaminé par des tiques qui ne sont pas présentes sur le transect. Les étapes pour les 2^{ème} et 3^{ème} passages sont exactement les mêmes que pour le 1^{er} passage.

4) Données obtenues

a) Données tiques

A la suite des différentes séances de collectes, nous obtenons un nombre de tiques des différentes espèces et stades (nymphe, adultes ou autre espèce) par site et par session de

collecte. A la fin de chaque session de collectes, les tiques sont envoyées à l'unité d'épidémiologie animale de Clermont-Ferrand afin de procéder à une identification.

b) Données environnementales

Sur chaque site de collectes, des variables écologiques sont mesurées afin de décrire les conditions environnementales dans lesquelles vivent les tiques. La première variable collectée est le type de forêts. Pour chaque site, deux variables binaires sont alors créées : la présence de feuillus et la présence de conifères. Pour chaque site, est noté « oui » s'il y a présence de feuillus ou de conifères. A l'inverse, pour une absence de feuillus et de conifères, « non » est noté pour les deux variables. Le type de végétation au sol est observé sur chaque site. Une liste des éléments relevés sur chaque site de collectes est créée. Ces éléments sont ensuite transformés en variables afin de pouvoir observer leurs effets indépendamment. Nous disposons ainsi des variables suivantes : feuilles mortes, herbes hautes, aiguilles de pin. Pour ces 3 variables, une présence sera notée par un « oui » et une absence est notée « non ». Ensuite, nous regardons la taille de la végétation sur chaque site, cette dernière est mesurée en cm. Les fédérations de chasse départementales concernées par les collectes de tiques (Haute-Garonne, Aude, Hérault, Gard et Ardèche) ont fourni les plans de chasses des communes où les collectes ont eu lieu. Ces plans de chasse indiquent le nombre de chevreuils prélevés sur les communes et permettent d'estimer une abondance de chevreuils. En effet, une commune où le nombre de chevreuils prélevés est élevé indique que le nombre de chevreuils présents est élevé.

c) Données météorologiques

Les données météorologiques horaires pour les 13 sites de collectes ont été fournies par Météo France via l'équipe d'Agroclim. Les variables choisies sont des variables météorologiques importantes pour la survie et l'activité des tiques: la température, les précipitations, l'humidité et la vitesse du vent. Les données météorologiques s'étendent du 1^{er} février jusqu'au 31 juin afin de couvrir les quelques mois avant le début des collectes et la fin des collectes. Pour chaque session de collecte les données sont moyennées 30 jours avant la collecte afin d'avoir une idée des conditions météorologiques (Annexe 3). Les données permettent de vérifier si toutes les collectes se sont déroulées dans de bonnes conditions.

d) Données climatiques

Les données climatiques sont issues d'une classification européenne du paysage (Mücher et al., 2010), nommée LANMAP3 utilisant des données spatiales à hautes résolutions. Les paysages proposés dans LANMAP3 sont classés à partir de données des facteurs suivants : le climat, l'altitude, le sol et le paysage. 350 types de paysages ont été proposés. Dans le cadre de mon

projet, les données sur le climat ont été utilisées notamment les précipitations et la température. Ces deux variables ont été collectées entre les années 1900 et 2000 pour les mois de janvier, avril, août et octobre pour l'ensemble des sites de collectes. Les 3 variables climatiques sont composées de 3 variables : une valeur minimale, une valeur maximale et la moyenne pendant la période 1900 à 2000 (voir Annexe 2).

e) Traitement des données

Nous calculons la somme des tiques comptées par site et par mois (avril, mai et juin). Cette variable est décrite d'un point de vue statistique au moyen de graphiques et du calcul d'écart type. Nous allons également représenter dans un graphique des différents stades de développement de tiques par mois et par site.

Le nombre total de tiques et l'abondance des nymphes et des adultes par site sont ensuite mise en relation avec des variables environnementales, météorologiques et climatiques pour tester l'hypothèse qu'elles jouent un rôle sur l'abondance et la présence des tiques au moyen de modèles GLM.

Des modèles GLM (Generalized Linear Model) ont été utilisés afin de déterminer quelles variables climatiques, environnementales et météorologiques influencent le nombre de tiques dans le sud de la France. Plusieurs groupes de modèles sont créés pour les différentes variables étudiées afin de voir leurs effets sur l'abondance des tiques de façon indépendante. Le tableau 1 représente toutes les variables testées avec le modèles GLM.

Tableau 1 : Les différents groupes de modèles testés

Nombre de tiques <i>Ixodes ricinus</i>	Données environnementales
	Données climatiques
	Données météorologiques
Nombre de nymphes <i>Ixodes ricinus</i>	Données environnementales
Nombre d'adultes <i>Ixodes ricinus</i>	Données environnementales

La variable nombre de tiques est donc testée dans un premier temps avec les variables des données environnementales puis, avec les données climatiques et enfin, avec les données météorologiques.

Les modèles GLM sont utilisés en univarié car nous ne disposons pas d'un nombre d'échantillons suffisamment nombreux (13 sites) pour pouvoir appliquer des modèles multivariés impliqués plusieurs facteurs explicatifs. Pour les modèles testés avec la présence et absence de tiques, un modèle GLM simple est utilisé. La distribution du nombre de tiques par

site varie de valeurs très basses à très hautes, dans ce cas, un modèle linéaire généralisé binomial négatif est utilisé. La variable sites étant répétée au sein du jeu de données, pour analyser les données météorologiques, un modèle généralisé à effet mixtes linéaires (GLMM) est utilisé, en mettant comme effet aléatoire sur l'ordonnées aux origines les sites d'échantillonnages pour s'assurer de l'indépendance des données, Afin de comprendre quel effets expliquent au mieux la présence de tique, une sélection de modèle par critère d'Akaike (AIC) est réalisée. Un modèle est considéré comme bon lorsque le delta AIC est inférieur à 4 (Burnham and Anderson, 2011).

Un tableau de sélection de modèles est créé grâce à la fonction *aictab()*. Ce tableau fournit l'AIC et le poids du delta AIC. Après avoir sélectionné les meilleurs modèles pour chaque groupe de variables testées, c'est-à-dire sélectionner les plus petits delta AIC, nous allons vérifier que le modèle est valide grâce au graphique *Residuals vs Leverage* obtenu par la commande *plot()*. Sur ce graphique, nous vérifions que les points expérimentaux des sites se situent entre la distance de Cook, soit entre 2 et -1. La distance de Cook permet de repérer des points aberrants et des points contribuant fortement à la détermination de modèles. Des points sont suspects si le point est supérieur en valeur absolue à 2 et un point inférieur à 1 contribue trop fortement à la détermination du modèle. Nous allons utiliser encore deux commandes sur Rstudio afin d'obtenir encore des informations sur les modèles. Des prédictions sont ensuite réalisées grâce à la fonction *visreg()* afin d'observer l'effet des différentes variables testées sur la variable du nombre de tiques. Un test ANOVA du modèle est réalisé afin de déterminer si l'effet de la variable testée est significatif, soit une p-value inférieur à 0.05.

Résultats

1) Examen des données

En premier lieu, nous avons vérifié que tous les collectes sur les 13 sites se sont déroulées dans des conditions météorologiques optimales c'est-à-dire avec une température inférieure ou égale à 25°C, sans pluie, ni vent important. Le tableau de l'Annexe 3 décrit les conditions météorologiques pendant chaque collecte. Nous constatons que pour chaque collecte, les conditions favorables à la collecte de tiques sont respectées. Nous pouvons ainsi conserver toutes les données de collectes pour poursuivre les analyses de données.

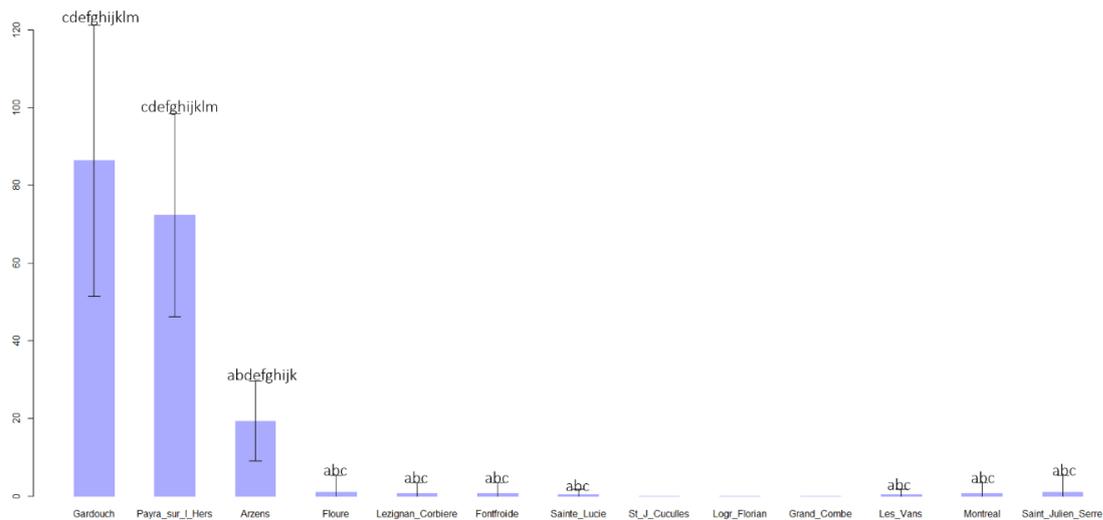
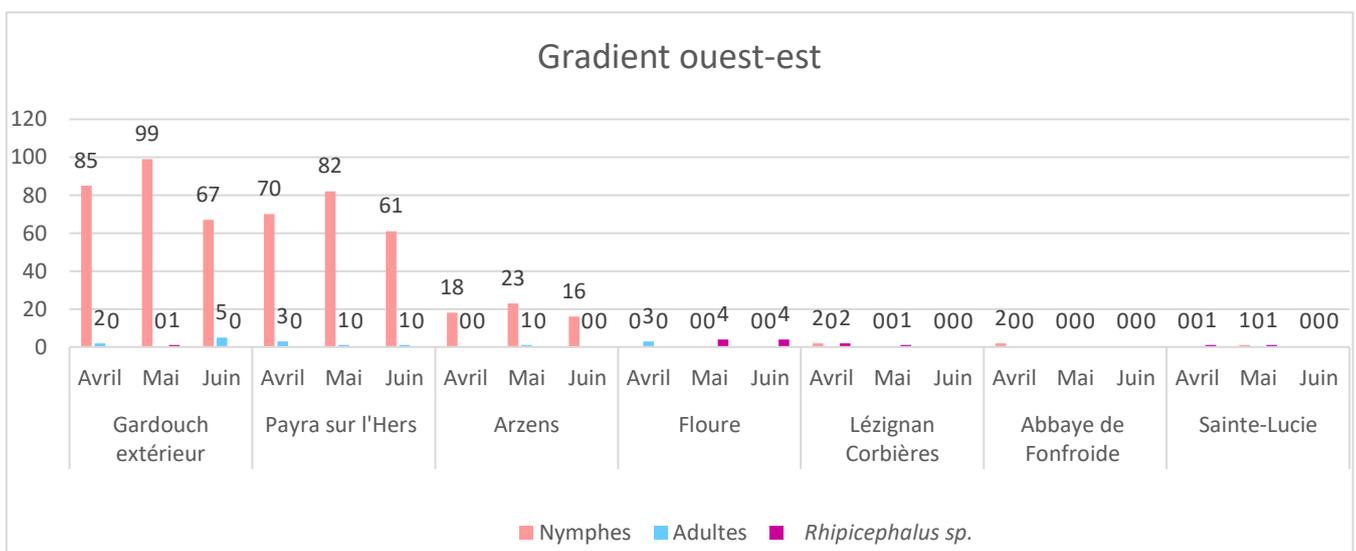


Figure 3 : diagramme représentant le nombre moyen de tiques collecté lors des 3 sessions de collectes sur les 13 sites de collectes. Les sites sont rangés géographiquement, c'est-à-dire, d'ouest en est de Gardouch à Saint Lucie et du sud vers le nord.

Nous constatons que les sites où ont été collectés le plus de tiques sont les 3 sites les plus à l'est (Figure 3). Le site ayant le plus de tiques collectées est Gardouch avec une moyenne de 83 tiques pour les 3 sessions de collectes suivi de Payra sur l'Hers avec 71 tiques en moyenne. Arzens, quant à lui se classe 3^{ème} avec une moyenne de 19 tiques. Nous avons ensuite comparé les moyennes de chaque site entre eux avec le test de Student. Sur la figure 3, les lettres situées au sommet des barres de l'histogramme indiquent les sites avec lesquelles le nombre moyen de tiques ont une p-value inférieur à 0.05. Nous remarquons que les moyennes du nombre de tiques collectées ont une p-value inférieur à 0.05 entre le site de Gardouch et tous les autres sites sauf le site de Payra sur l'Hers. De même pour le site de Payra sur l'Hers et tous les autres sites sauf Gardouch. Le site d'Arzens a une p-value inférieur à 0.05 par rapport à tous les autres sites.



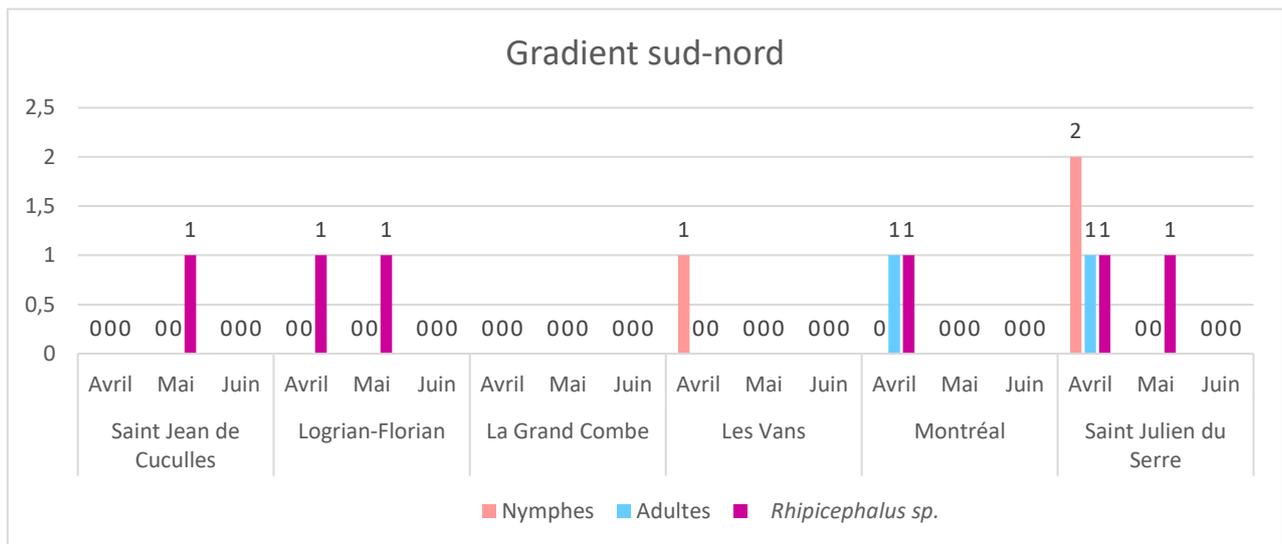


Figure 4 : Nombre de tiques en phase de nymphes, adultes et *Rhipicéphalus sp.* collectées lors des 3 mois de collecte sur chaque site. Le graphique a) contient les données du gradient ouest-est et le graphique b) les données du graphiques sud-nord.

Nous constatons (Figure 4) que lors des sessions de collectes, le stade de tiques le plus collecté est la nymphe *Ixodes ricinus* notamment dans les 3 sites les plus à l'ouest. En effet, plus nous allons vers l'est, moins de tiques sont collectées. Pour la gradient sud-nord, l'espèce de tique la plus retrouvée est la *Rhipicéphalus sp.*. Nous remarquons que pour les sites de Gardouch, Payra sur l'Hers et Arzens, la collecte de tiques est plus importante au mois de mai et que le nombre de tique collecté au mois d'avril est plus élevé qu'au mois de juin. Sur les sites du gradient sud-nord, nous constatons que le mois où le plus de tiques ont été collectées est le mois d'avril. Sur le site de la Grand Combe, aucune tique n'a été collectée lors des 3 sessions.

2) Modèles GLM

Nous utilisons à présent les modèles GLM afin de déterminer quelles sont les variables climatiques, environnementales et météorologiques influençant le nombre de tiques dans le sud de la France.

3) Données sur le nombre de tiques

a) Données environnementales

Les premiers modèles étudiés sont les modèles GLM appliqués sur le nombre de tiques avec les variables environnementales. La table de sélection indique qu'une seule variable possède un delta AIC inférieur à 4 : la variable feuilles mortes. Nous représentons ensuite le graphique *Residuals vs Leverage* de la variable feuilles mortes afin de vérifier que les points se situent

entre la distance de Cook. L'annexe 4 montre que tous les points sont tous situés entre la distance de Cook.

Tableau 2 : Récapitulatif des données obtenues lors du modèle GLM pour la variable feuilles mortes testée sur le nombre de tiques total.

Variable	AIC	delta AIC	p-value
Feuilles mortes	93.91	0.00	6.76e-06 ***
Chasse	100.27	6.36	0.01693 *

Le tableau 2 indique que la variable feuilles mortes a une p-value inférieur à 0.05. La variable chasse quant à elle a un delta AIC supérieur à 4. Le graphique (Figure 5) ci-dessous représente les prédictions pour la variable feuilles mortes.

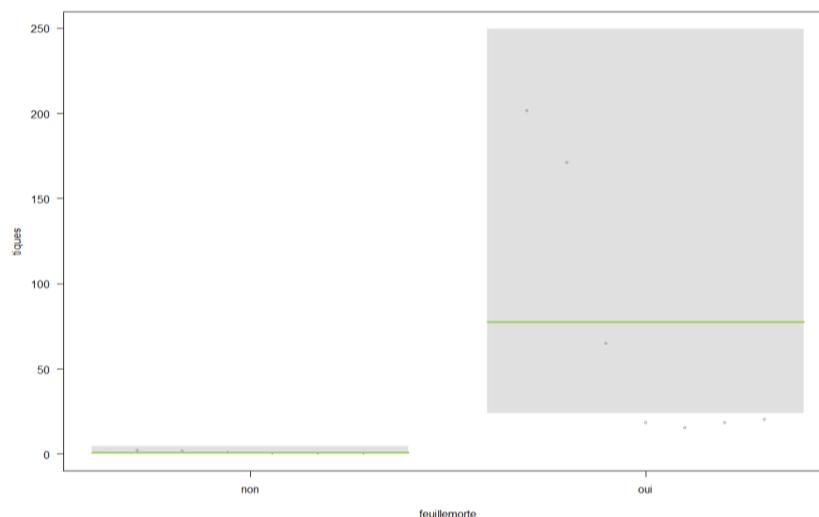


Figure 5 : Prédiction pour la variable feuilles mortes

Nous constatons que lors de la présence de feuilles mortes, le nombre de tiques collectées est important. Au contraire, lorsqu'il n'y a pas de feuilles mortes, on ne trouve pas de tiques.

i) Nymphes

Nous avons ensuite utilisé les modèles GLM avec les variables environnementales sur le nombre de nymphes afin de voir quelles sont les variables qui influencent le nombre de nymphes. La table de sélection des modèles nous informe que 3 modèles sont inférieurs à 4 : présence de conifères, feuilles mortes et taille de la végétation. Nous confirmons ces modèles par l'étude des graphiques *Residuals vs Leverage* et nous constatons que pour les 3 variables environnementales, tous les points sont situés dans la distance de Cook (Annexe 5).

Tableau 3 : Récapitulatif des données obtenues lors des modèles GLM pour les variables conifères, feuilles mortes et taille de la végétation testées sur le nombre de nymphes.

Variable	AIC	delta AIC	p-value
Conifères	83.36	0.00	0.0001073***
Feuilles mortes	84.53	1.17	0.0004633***
Taille végétation	85.21	1.85	0.002922**

Le tableau 3 indique que pour les 3 variables : présence de conifères, présence de feuilles mortes et taille de la végétation ont des p-values inférieures à 0.05

Le graphique (Figure 6) représente les prédictions pour les variables présence de conifères, présence de feuilles mortes et taille de la végétation.

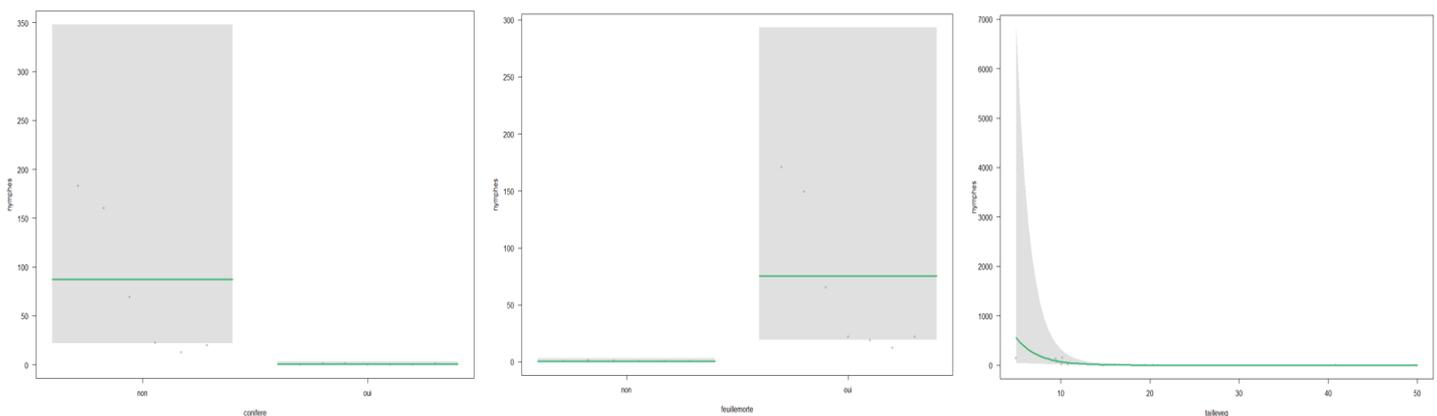


Figure 6 : Prédications pour les variables conifères, feuilles mortes et taille de la végétation.

Nous constatons que pour la variable présence de conifères, très peu de nymphes sont collectées lors de la présence de conifères, alors qu'une absence de conifères permet de collecter un nombre important de nymphes. En regardant le graphique de prédiction de la variable feuille mortes, nous observons que l'absence de feuilles mortes entraîne un nombre faible de nymphes collectées, contrairement à la présence de feuilles mortes qui permet de collecter un grand nombre de nymphes. Enfin, pour le graphique de la taille de la végétation, nous constatons que plus la végétation petite plus le nombre de nymphes collecté est élevé.

ii) Adultes

Pour terminer les analyses avec les variables environnementales, nous avons appliqué les modèles GLM sur le nombre d'adultes collecté. La table de sélection des modèles indique que 6 variables environnementales sont inférieures à 4 : la variable herbe haute, taille végétation, présence de feuillu, présence de conifères, chasse et la présence de feuilles mortes. Nous confirmons ces modèles par l'étude des graphiques *Residuals vs Leverage*. Les graphiques (Annexe 6) nous indiquent que les points des 6 variables se situent entre la distance de Cook.

Lors de la vérification de la p-value, nous nous sommes rendu compte qu'elle était supérieure à 0.05 pour chaque modèles.

b) Données climatiques

Les modèles GLM sont utilisés pour étudier la variable nombre de tiques en fonction des variables climatiques de LANDMAP. Les modèles GLM sont appliqués sur le nombre de tiques pour chacune des variables explicatives : précipitations et températures.

i) Précipitations

La table de sélection pour les variables climatiques des précipitations indique qu'une seule variable est inférieure à 4, la variable des précipitations maximales au mois d'octobre. Le graphique *Residuals vs Leverage* (Annexe 7) montre que tous les points représentant les sites de collectes sont situés dans la distance de Cook.

Tableau 4 : Récapitulatif des données obtenues lors du modèle GLM pour la variable précipitations maximales en octobre testée sur le nombre de tiques total.

Variable	AIC	delta AIC	p-value
Précipitation max octobre	94.28	0.00	6.83 ^e -06***

Le tableau 4 indique que la variable précipitation maximum en octobre possède une p-value est inférieur à 0.05. Le graphique (Figure 7), ci-dessous, représente la prédiction pour la variable précipitations maximales en octobre.

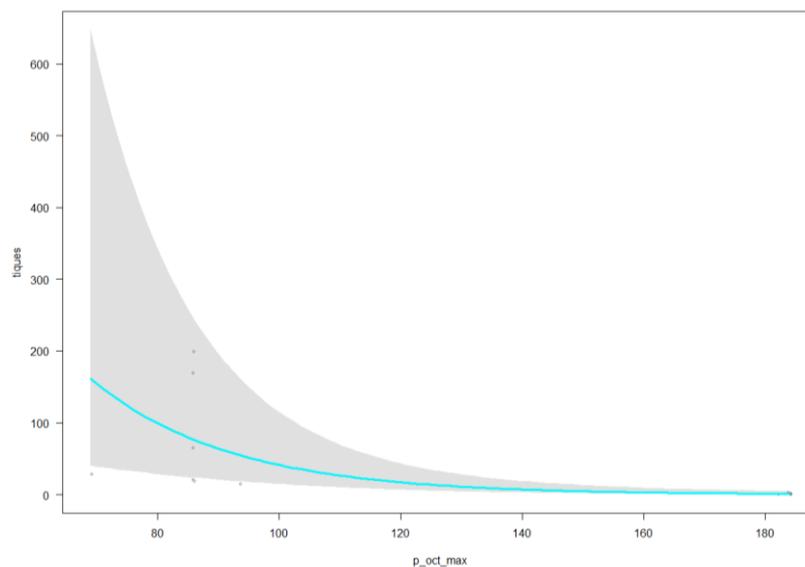


Figure 7 : Prédiction pour la variable précipitations maximales en octobre.

Nous constatons que plus les précipitations en octobre sont importantes, moins de tiques sont collectées.

ii) Température

La table de sélection pour les variables climatiques des températures indique que 3 variables sont inférieures à 4, la variable de la température minimale en avril, la température maximale au mois d'août et la température minimale au mois de janvier. Le graphique *Residuals vs Leverage* (Annexe 8) indique que les points des sites se situent dans la distance de Cook.

Tableau 5 : Récapitulatif des données obtenues lors du modèle GLM pour les variables températures minimales en avril et en janvier et températures maximales au mois d'août testée sur le nombre de tiques total.

Variable	AIC	delta AIC	p-value
T°C min avril	94.18	0.00	0.001298**
T°C max août	95.51	1.33	0.0007647***
T°C min janvier	95.80	1.62	0.001298**

Le tableau 5 nous apprend que pour les variables températures minimales en avril, maximales en août et minimales en janvier, les p-values de toutes les variables sont inférieures à 0.05. Le graphique (Figure 8), illustre les prédictions des variables températures sélectionnées.

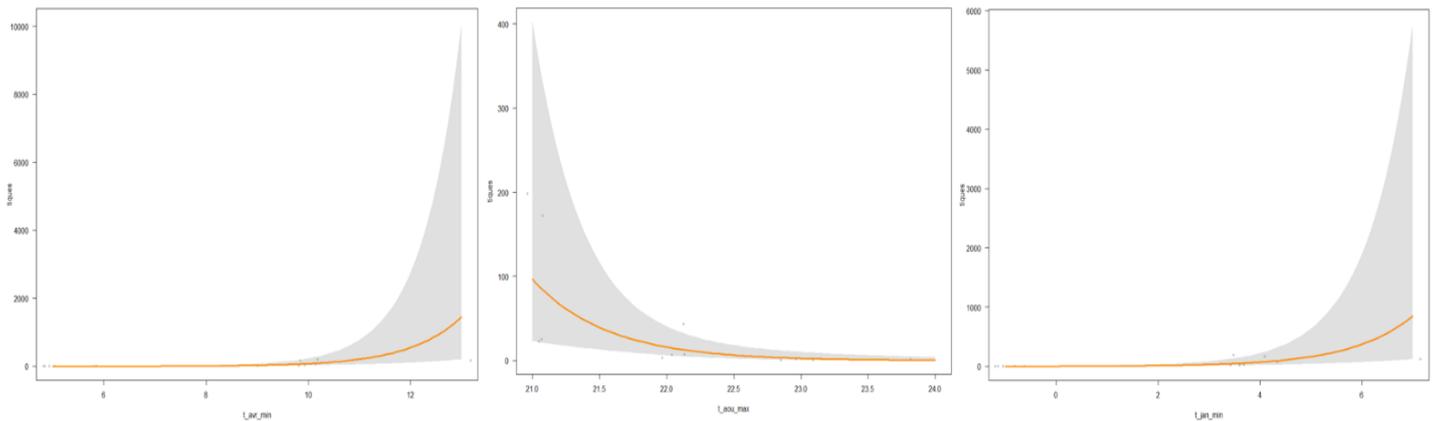


Figure 8 : Prédiction des variables températures minimales en avril et en janvier et maximales au mois d'août.

Nous constatons que pour les variables températures minimales en avril et en janvier, plus ces dernières sont élevées, plus le nombre de tiques collectées sera important. Quant à la variable températures maximales en août, plus cette dernière sera importante, moins le nombre de tiques collectées sera élevé.

c) Données météorologiques

Les modèles GLM sont utilisés pour étudier la variable nombre de tiques en fonction des variables météorologiques. La table de sélection nous indique que 2 variables sont sélectionnées par le delta AIC, la variable mois et humidité.

Tableau 6 : Récapitulatif des données obtenues lors du modèle GLM pour les variables mois et humidité testée sur le nombre de tiques total.

Variable	AIC	delta AIC	p-value
Mois	159.00	0.00	
Avril			0.8902
Mai			0.3949
Juin			0.0268*
Humidité	163.00	4.00	<2e-16 ***

Le tableau 6 indique que la variable de l'humidité ainsi que la variable du mois de juin et les p-values sont toutes les deux inférieures à 0.05. Nous créons ensuite les graphiques représentant les prédictions des variables météorologiques (Figure 9).

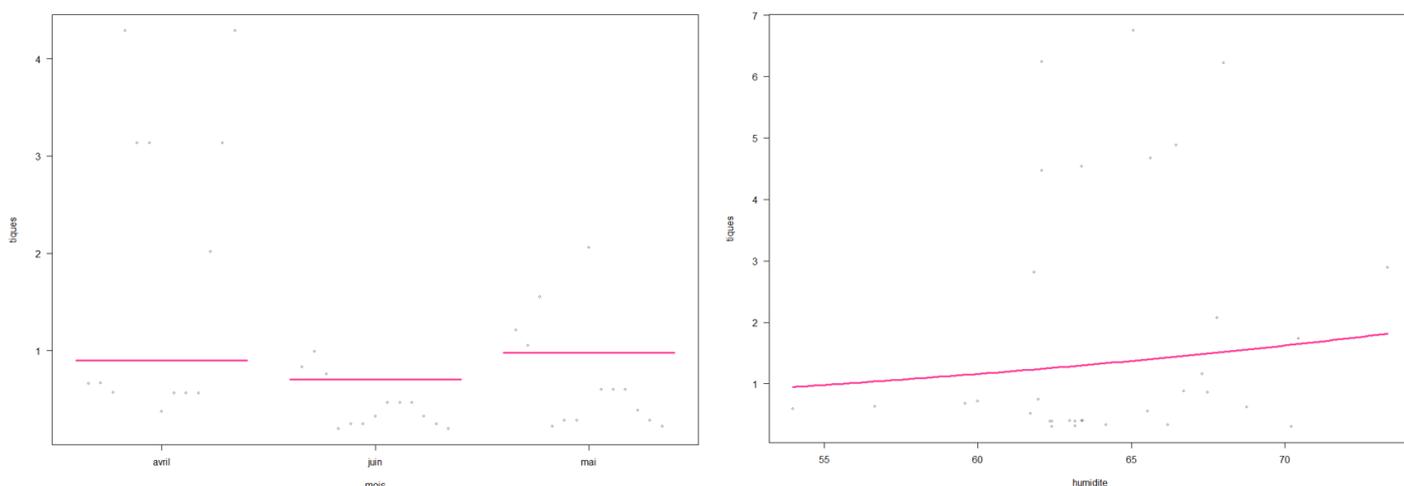


Figure 9 : Prédiction pour les variables mois et humidité

Les prédictions pour les 3 mois de collectes montrent que le nombre de tiques collectées est plus important au moins de mai, suivi du mois d'avril et c'est au mois de juin que le nombre de tiques collectées est moins important. Le graphique de prédiction pour la variable humidité montre que le nombre de tiques collectées est élevé avec une humidité importante.

Discussion

1) Distribution de la tique *Ixodes ricinus*

La densité de tiques lors des 3 sessions de collecte est beaucoup plus forte sur les trois sites les plus à l'ouest, Gardouch et Payra sur l'Hers, et, dans une moindre mesure, Arzens, par rapport à l'ensemble des autres sites prospectés. Le site de Gardouch par sa localisation, est amené à avoir une importante population de tiques. En effet, ce site est situé en bordure de l'installation expérimentale du CEFS où une vingtaine de chevreuils sont élevés. La corrélation entre la densité de chevreuils et la densité d'*I. ricinus* sur la végétation a été démontrée en France

(Boulanger and McCoy, 2016). Le comportement spatial des chevreuils pourrait être un élément important pour la dispersion des tiques dans l'environnement (Ruiz-Fons et Gilbert, 2010). Lors de leurs déplacements habituels, ils peuvent transporter des tiques entre les zones d'habitats favorables, notamment dans les bois, mais aussi contribuer à la dissémination des tiques entre zones boisées et les zones ouvertes, comme les pâturages. Les chevreuils peuvent aussi transporter des tiques à moyenne distance lors de leurs déplacements en période de reproduction (Richard et al., 2008) et à grande distance lors de la dispersion natale (Debeffe et al., 2012). Au cours des résultats, nous n'avons pas trouvé d'effet de l'abondance des chevreuils sur l'abondance des tiques. Ceci peut-être dû à la mesure d'abondance qui était trop imprécise. En effet, ce qui nous a permis de déterminer une quantité de chevreuils par site étaient les plans de chasse. Les plans de chasse indiquent le nombre de chevreuils prélevés chaque par commune mais n'indiquent pas précisément le nombre de chevreuils sur chaque commune.

Le nombre de tiques trouvés au mois de mai est plus important pour les sites de Gardouch, Payra sur l'Hers et Arzens (Figure 2). De plus, les collectes au mois de juin sont moins favorables pour la présence d'un nombre important de tiques (tableau 6). Depuis 2014, des collectes de tiques ont lieu chaque année à l'intérieur et à l'extérieur des enclos de l'installation expérimentale à Gardouch. Il a été constaté que le pic d'abondance de nymphes avait lieu au mois de mai. Les résultats pour les 3 sites les plus à l'ouest sont conformes avec les résultats obtenus à Gardouch et le pic d'abondance des nymphes a bien lieu au mois de mai. L'activité des tiques *Ixodes ricinus* suit un cycle annuel en fonction des saisons, son activité s'étend du printemps à l'automne dans les régions tempérées d'Europe. En France, la période d'activité des nymphes et des adultes se déroule généralement de mars à octobre (Dautel et al., 2008). En France, *Ixodes ricinus* présente classiquement deux pics d'activités annuelles, au printemps et en automne, pour les nymphes et les adultes, et un à deux pics centrés sur l'été pour les larves. Le pic de printemps est plus important que celui d'automne dans nos régions (Gray, J.S., 1984). Le pic d'abondance des nymphes est dû aux conditions climatiques notamment à la température et à l'humidité. Ces dernières agissent en modifiant la position et l'intensité des pics d'activités saisonnières. Au sein d'une même zone, le microclimat, avec les variations de températures et d'humidité peuvent modifier les pics d'une année à l'autre (Korenberg, 2000). Ainsi, de fortes températures en été permettent un développement rapide des tiques, notamment des larves, et une émergence de nymphes en grand nombre à l'automne. Ces mêmes tiques sortiront de leur seconde mue au printemps de l'année suivante, induisant un fort pic d'activité printanier (Gray et al., 2009). Au contraire, un été très sec provoquera la mort des larves gorgées et induira une diminution du pic automnal. Selon la région et son climat, la répartition annuelle de l'activité

des adultes *Ixodes ricinus* peut fortement varier selon la période de l'année la plus favorable à leur activité (Kraemer, 2018). Dans la région du Lauragais, où se situent Gardouch, Payra sur l'Hers et Arzens, la période optimale pour les nymphes est donc au mois de mai. A l'opposé, nous n'avons pas trouvé de pic d'abondance de nymphes sur les autres sites prospectés, avec toujours peu ou pas de nymphes collectées. Cela peut être dû soit parce que les conditions environnementales n'étaient pas favorables pour une présence ou une abondance importante pour les nymphes soit parce que le pic d'abondance des nymphes a eu lieu antérieurement à la session de collecte. En effet, une température importante n'est pas bénéfique pour *Ixodes ricinus*. Cette dernière pourrait modifier sa phénologie et présenter un pic d'activité des nymphes plus tôt en hiver afin de bénéficier d'une météo douce et humide, et se cacher dans le sol au moment des grosses chaleurs du printemps et de l'été du sud de la France. Ainsi, lorsque nous sommes arrivés au mois d'avril pour les premières collectes, les nymphes présentes sur les différents sites avaient trouvé un hôte sur lequel s'accrocher ou étaient mortes car aucun hôte ne s'était présenté à elles ou à l'abri dans le sol car les conditions climatiques n'étaient plus favorables.

2) Effet des données environnementales sur les tiques

La présence de feuilles mortes a un rôle bénéfique pour l'abondance de tiques (Tableau 2). Les variables environnementales propices pour une abondance importante de nymphes sont la présence de feuilles mortes ainsi que la taille de la végétation. Plus la taille de la végétation est petite plus le nombre de nymphes collectées est importante. A l'inverse, les forêts de conifères ont un effet néfaste sur l'abondance de nymphes (Tableau 3). La végétation influence indirectement le cycle de développement de la tique en procurant un microclimat qui détermine la température et l'humidité relative dans lesquelles se développe la tique ((Boulangier and McCoy, 2016).). Cependant, le fait que nous trouvons de nombreuses nymphes lorsque la végétation est basse est dû à la méthode de la collecte du drap. Lorsque la végétation est basse, le drap se place sans difficulté au contact de la litière de feuilles mortes. Une végétation avec une taille importante ne permet pas au drap de rentrer en contact aussi bien avec les différentes plantes, ni avec la litière. Une litière végétale épaisse composée de feuilles mortes et de mousses permet un bon maintien de l'humidité dans les couches basses de végétations, ce qui est favorable à une densité importante de certaines tiques (Gilot et al., 1975). Pendant les quêtes d'hôtes, les tiques perdent leur humidité, elles doivent donc descendre de la végétation dans la litière afin de se réhydrater. Le fait de revenir dans la litière réduit la probabilité d'entrer en contact avec un hôte et consomme des réserves d'énergie, ce qui nuit à la survie des tiques (Gern, 2008). L'adéquation de la végétation au sol, principalement en termes de degré

d'humidité, est essentielle pour la survie des tiques hors hôte (Milne, 1948). A l'inverse, le caractère beaucoup plus sec de la litière des forêts est probablement à l'origine de l'absence d'*I. ricinus* dans ce biotope (Boulangier and McCoy, 2016).

3) Effet des données climatiques sur les tiques

Les précipitations maximales en octobre ne sont pas favorables pour les tiques (Figure 7). Afin de trouver des conditions optimales pour leur survie, les tiques vont éviter de s'installer dans des habitats trop humides qui peuvent être inondés durant l'hiver (Gray, 1998). Les départements de l'Hérault, du Gard et de l'Ardèche, dans lesquels sont situés tous les sites du gradient sud-nord, sont affectés par des épisodes cévenols à l'automne. Un épisode cévenol provoque de très fortes pluies orageuses localisées, avec des hauteurs d'eau supérieures à 200 mm par jour soit l'équivalent de plusieurs mois de précipitations. L'intensité des pluies et la vulnérabilité des territoires touchés peuvent entraîner de graves inondations, des coulées de boue et des glissements de terrain (Lefigaro). Ce phénomène entraîne donc une détérioration de l'habitat des tiques et leur disparition.

Les variables températures impactant le nombre de tiques sont les températures minimales en avril et en janvier. A l'inverse l'abondance des nymphes décroît avec l'augmentation des températures maximales au mois d'août. La température est un facteur essentiel pour la dynamique des tiques et détermine de façon directe la durée des phases de développement (Peavey et Lane, 1996). Plus il fait chaud, plus des stades se succèdent rapidement. Les cycles sont ainsi accélérés par les températures élevées, ce qui est a priori favorable à l'augmentation du nombre de tiques. Toutefois, la chaleur peut assécher l'air, et perd son influence bénéfique pour la tique, d'où l'importance du microclimat entretenu par la végétation qui protège de la dessiccation. La température va également jouer un rôle important dans l'induction, la modulation ou l'arrêt de la diapause (Boulangier and McCoy, 2016). Au-delà de 30°C, l'effet létal de la température intervient et une humidité relative élevée ne suffit plus à la survie des tiques. Le point de température létal est estimé à 40°C. Durant l'hiver, les tiques *Ixodes ricinus* ont un taux de survie variable selon plusieurs paramètres, tels que la température minimale, la durée d'exposition au froid, le stade et son état de gorgement (Lindsay, 1995). Dans la nature, un sol recouvert de végétation permet d'adoucir les températures et d'augmenter le taux de survie. Ainsi, les nymphes et les adultes peuvent survivre plusieurs mois à -5°C, et jusqu'à 1 mois à -10°C tant qu'elles ne sont pas au contact direct de la glace (Dautel and Knülle, 1997). Les adultes peuvent survivre 24h à des températures atteignant les -20°C. Les larves en revanche survivent difficilement à des températures inférieures à -7°C (Dautel and Knülle,

1997). Les hivers doux réduisent la mortalité des tiques et de leurs hôtes et allongent la période d'activité des tiques, alors que les étés secs augmentent leur mortalité (Boulanger and McCoy, 2016).

Les données climatiques sont des moyennes de chaque variable de 1900 à 2000, elles sont donc assez vieilles en comparaison avec les données de collectes qui ont lieu en 2019. Afin d'obtenir des résultats plus précis, il aurait fallu avoir des données climatiques plus récentes. Les conditions climatiques dans le sud de la France ont considérablement changées depuis le dernier centenaire et leurs impacts sur la dynamique de tiques ont également changés. Les variables climatiques jouant un rôle important sur la dynamique des tiques ne sont peut-être plus les même de nos jours.

4) Effet des données météorologiques sur les tiques

Plus l'humidité est élevée, plus nous trouverons des tiques lors des collectes (Figure 9). L'humidité relative affecte donc l'activité des tiques en déterminant l'espace d'activité de recherche (Vail et Smith, 2002) et le rythme des déplacements nécessaires vers les zones permettant une restauration de l'équilibre hydrique (Gray, 1991). Les tiques vont donc s'installer dans un habitat leur permettant de conserver une humidité relative assez élevée, supérieur à 80% pour *I. ricinus* (Gray, 1991). Pour lutter contre la dessiccation, elles réabsorbent de l'eau lorsqu'elles sont au sol, grâce à des tissus spécialisés situés au niveau de l'hypostome (Gern et al., 2008). La réabsorption de l'eau se déroule uniquement si l'humidité relative au sol est supérieure à 92% (Lees, 1946). Ce processus est coûteux en énergie et épuise les réserves des tiques. Ainsi, lorsque l'humidité relative est basse, les tiques dépensent plus d'énergie pour se réhydrater, épuisant leurs réserves plus rapidement, diminuant la durée de leur survie (Gern et al., 2008). Certaines tiques exophiles ont malgré tout une bonne tolérance pour les microclimats relativement secs, comme *Rhipicephalus sp.* qui a été retrouvée sur certains sites (Figure 2). Cette espèce dite thermophile, parasite des grands mammifères, que l'on peut retrouver dans les formations ouvertes du maquis méditerranéen (Agoulon et al., 2012). En vue de changements climatiques des années à venir, les sites humides deviendront secs, et l'espèce de tique *Rhipicephalus bursa* pourrait remplacer *Ixodes ricinus* qui ne pourrait survivre dans ces conditions climatiques.

Cette année fut la première année de collecte pour le projet CLIMATICK, nous ne disposons donc uniquement des données de collectes et météorologiques de cette année. On peut se demander si tes résultats auraient été identiques l'année dernière qui était plus humide et moins chaude. Le fait qu'il n'y est que 13 sites de collectes et qu'une année de données fait que nous

avons été dans l'impossibilité de réaliser des analyses statistiques multivariées. Ces dernières auraient permis de voir quelles sont les variables bénéfiques pour les tiques en tenant compte des autres variables.

Conclusion

Ainsi, au cours des analyses, nous avons pu constater que certaines conditions climatiques et environnementales influent sur l'abondance de la tique *Ixodes ricinus*, notamment les environnements humides où l'humidité est retenue par la litière du sol composée de feuilles mortes ainsi que d'herbes basses. Le réchauffement climatique pourrait dans les années à venir contribuer à la disparition de l'espèce *I. ricinus* au détriment d'autres espèces résistantes à la chaleur. Afin d'obtenir des résultats plus précis, le nombre de sites de collectes doit être plus importants et les collectes doivent se faire sur plusieurs années. Les tiques font partie des écosystèmes, comme d'autres arthropodes nuisibles, l'homme doit donc apprendre à vivre avec. L'objectif final du projet CLIMATICK est de laisser des vagues de sensibilisation afin d'adapter les risques futurs dans le but de limiter l'impact sanitaire et économique des tiques.

Bibliographie

« La maladie de Lyme ». <https://www.passeportsante.net/>, 3 octobre 2012.

Agoulon A., Malandrin L., Lepigeon F., Vénisse M., Bonnet S., Becker C. A. M., Hoch T., Bastian S., Plantard O., Beaudeau F. 2012. A Vegetation Index qualifying pasture edges is related to *Ixodes ricinus* density and to *Babesia divergens* seroprevalence in dairy cattle herds. *Veterinary Parasitology*, 185(2-4):101-109.

Bonnet S. et al., 2015. Biologie des tiques. In : McCoyK., Boulanger N., eds. Tiques et maladies à tiques : Biologie, écologie évolutive, épidémiologie. *IRD Editions*.

Boulanger and McCoy, 201., eds. « Tiques et maladies à tiques : Biologie, écologie évolutive, épidémiologie ». *IRD Editions*.

Brown KJ, Begon M, Bennett M, Birtles RJ, Burthe S, Lambin X, Telfer X, Woldehiwet Z and Ogden NH (2006) Sympatric *Ixodes trianguliceps* and *Ixodes ricinus* ticks feeding on field voles (*Microtus agrestis*) : potential for increased risk of *Anaplasma phagocytophilum* in the united kingdom ? *Vector Borne Zoonotic Dis* 6 : 404-410.

Burnham, K.P., D.R. Anderson, et Kathryn (Kate) Huyvaert. « AIC model selection and multimodel inference in behavioral ecology: some background, observations, and comparisons ». *Behavioral Ecology and Sociobiology* 65 (1 janvier 2011): 23 35.

Chastel C., (2002). Impact of global climate changes on arboviruses transmitted to humans by mosquitoes and ticks, *Bulletin De l'Academie Nationale De Medecine*, 89 101.

Cosson, Jean-François. « Écologie de la maladie de Lyme », s. d., 19.

- Danielova V, Rudenko N, Daniel M, Holubova J, Materna J, Golovchenko M, Schwarzova L : Extention of Ixodes ricinus ticks and agents of tick-borne diseases to mountains areas in the Czech Republic. *Int J Med Microbiol.* 2006, 296 (Supplement 40) : 843-854.
- Dautel, H., Knülle, W., 1997. Cold hardiness, super cooling ability and causes of low-temperature mortality in the soft tick *Argas reflexus* and hard tick *Ixodes ricinus* (Acari : Ixodoidea) from Central Europe *J. Insect Physiol.* 42,843-854.
- Dautel, Hans, Cornelia Dippel, Daniel Kämmer, Anita Werkhausen, et Olaf Kahl. « Winter activity of *Ixodes ricinus* in a Berlin forest ». *International Journal of Medical Microbiology*, Proceedings IX. International Jena Symposium on Tick-borne Diseases (formerly IPS) March 15-17, 2007, 298 (1 septembre 2008): 50-54.
- De La Rocque S., Rioux J. A., Slingenbergh J., (2008). Climate Change: Effects on Animal Disease Systems and Implications for Surveillance and Control, *Revue Scientifique Et Technique (International Office of Epizootics)*, 339-54.
- Debeffe L., Focardi S., Bonenfant C., Hewison A. J. M., Morellet N., Vanpe C., Cagnacci F., (2014) =. A one night stand ? Reproductive excursions of female roe deer as a breeding dispersal tactic. *Oecologia*, 176, 431-443.
- Dumic I., Severnini E., (2018). Ticking bomb : the impact of climate change on the incidence of Lyme disease, *Canadian Journal Infectious Diseases and Medical Microbiology*, 10 pages.
- Duvallet G., (2006). Parasites, vecteurs de pathogènes et changements climatiques, *Hydroécologie Appliquée*, 87-96.
- Futura. « Maladie de Lyme : le nombre de nouveaux cas a augmenté en 2018 en France ». *Futura*. Consulté le 19 août 2019.
- Gern L, Humair PF., (2002). Ecology of *Borrelia burgdorferi* sensu lato in Europe, Lyme Borreliosis : Biology, *Epidemiology and Control*, 149-174.
- Gern, L., Morán Cadenas, F., Burri, C., 2008. Influence of some climatic factors on *Ixodes ricinus* ticks studied along altitudinal gradients in two geographic regions in Switzerland. *Int. J. Med. Microbiol.* 298, 55–59.
- Gilot, B., J. C. Beaucournu, G. Pautou, A. Fayard, et E. Moncada. 1976. Contribution à la connaissance de la répartition et de l'écologie d'*Ixodes trianguliceps* en France, et plus particulièrement dans le Sud-Est. *Acta Tropica* 33:254-286.
- Githeko A.K., Lindsay S.W., Confalonieri U.E., (2000). Changement climatique et maladies à transmission vectorielle : une analyse régionale, *World Health Organization*, 1136-1147.
- Githeko, Andrew Karanja, Steve W. Lindsay, Ulisses E. Confalonieri, et Jonathan A. Patz. « Climate Change and Vector-Borne Diseases: A Regional Analysis ». *Bulletin of the World Health Organization : The International Journal of Public Health* 2000 ; 78(9) : 1136-1147, 2000.
- Gray, J. S. « Studies on the Dynamics of Active Populations of the Sheep Tick, *Ixodes Ricinus* L. in Co. Wicklow, Ireland ». *Acarologia* 25, n° 2 (3 août 1984): 167-78.
- Gray, J.S. « Review The Ecology of Ticks Transmitting Lyme Borreliosis ». *Experimental & Applied Acarology* 22, n° 5 (1 mai 1998): 249-58.
- Haller G (1881) Vorläufige Bemerkungen über das Gehrorgan der Ixodiden. *Zool. Anz.* 4, 165-167
- Hauser G., Rais O., Morán Cadenas F., Gonseth Y., Bouzelboudjen M., Gern L., (2018). Influence of climatic factors on *Ixodes ricinus* nymph abundance and phenology over a long-term monthly observation in Switzerland (2000–2014), *Parasites & Vectors*, 11-289.
- Korenberg, E.I., 2000. Seasonal Population Dynamics of *Ixodes* Ticks and Tick-Borne Encephalitis Virus. *Exp. Appl. Acarol.* 24, 665–681.

- Kraemer « Intra-daily variation of the activity of the ticks *Ixodes ricinus* based on data weather », 2018
- Lees, A.D., 1946. The water balance in *Ixodes ricinus* L. and certain other species of ticks. *Parasitology* 37, 1–20.
- Lees, A.D., Milne, A., 1951. The seasonal and diurnal activities of individual sheep ticks *Ixodes ricinus* L. *Parasitology* 41, 189–208.
- Léger E., Vourch G., Vial L., Chevillon C., McCoy K.D., (2013). Changing distributions of ticks : causes and consequences, *Experimental and Applied Acarology*, 219-244.
- Medlock J.M., Hansford K.M., Bormane A., Derdakova M., Estrada-Peña A., George J.C., Golovljova I., Jaenson T.G., Jensen J.K., Jensen P.M., Kazimirova M., Oteo J.A., Papa A., Pfister K., Plantard O., Randolph S.E., Rizzoli A., Santos-Silva M.M., Sprong H., Vial L., Hendricks G., Zeller H., Van Bortel W., 2013, Driving forces for changes in geographical distribution of *Ixodes ricinus* tick in Europe, *Parasites and Vectors*, 1-6.
- Peavey, C. A., and R. S. Lane . 1996. Field and laboratory studies on timing of oviposition and hatching of the western black-legged tick, *Ixodes pacificus*. *Exp. Appl. Acarol.* 20 : 695-711.
- Piesman, J., et L. Gern. « Lyme Borreliosis in Europe and North America ». *Parasitology* 129 Suppl (2004): S191-220.
- Plantard O. et al., 2015. Evolution, systématique et diversité des tiques . In : McCoy K. D., Boulanger N., eds. Tiques et maladies à tiques : Biologie écologie évolutive, épidémiologie. *IRD Edition*.
- QGIS équipe de développement (AN) QGIS Système d'information géographique Open Source Geospatial Foundation.
- Richard E., Morellet N., Cargnelutti B., Angibault J. M., Vanpe C., & Hewison A. J. M. (2008). Ranging behavior and excursions of female roe deer during the rut. *Behavioral Processes*, 79,28-35.
- Root, Terry L., Jeff T. Price, Kimberly R. Hall, Stephen H. Schneider, Cynthia
- RStudio Team (2015). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, Inc., Boston, MA URL
- Ruiz-Fons, Francisco, et Lucy Gilbert. « The Role of deer as vehicles to move ticks, *Ixodes ricinus*, between contrasting habitats ». *International Journal for Parasitology* 40, n°9 (1 août 2010). 1013-20.
- Sonenshine D.E., Roe R.M., (2014). éd. *Biology of Ticks Volume 2*. Second Edition. Oxford, New York: Oxford University Press, 2014.
- Varotsos, C. A., et M. N. Efstathiou. « Has global warming already arrived? » *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 182 (1 janvier 2019): 31-38.

Annexes

Annexe 1 : Description des variables climatiques

Précipitations		Température	
Janvier	Minimal	Janvier	Minimal
	Maximal		Maximal
	Moyenne		Moyenne
Avril	Minimal	Avril	Minimal
	Maximal		Maximal
	Moyenne		Moyenne
Août	Minimal	Août	Minimal
	Maximal		Maximal
	Moyenne		Moyenne
Octobre	Minimal	Octobre	Minimal
	Maximal		Maximal
	Moyenne		Moyenne

Annexe 2 : Tableau des données météorologiques moyennées 30 jours avant la collecte

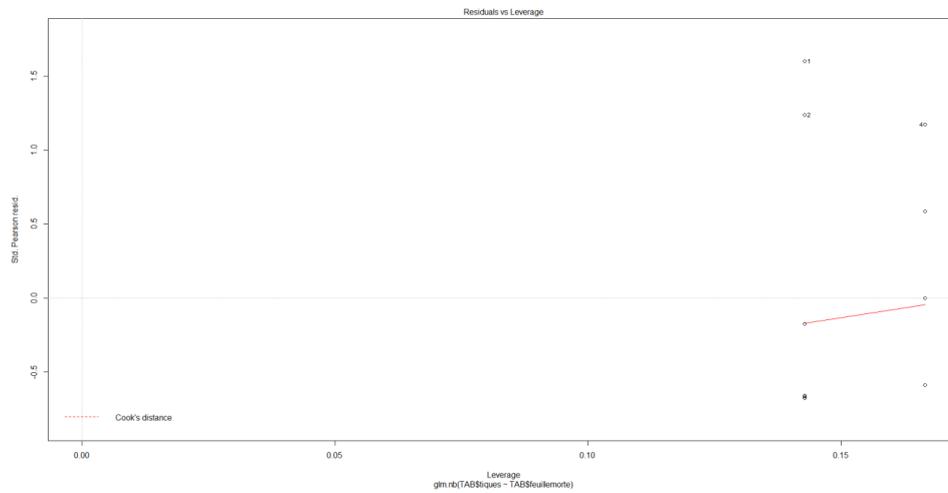
site	mois	tiques	précipitation	température	humidité
Gardouch_extérieur	avril	87	0,08	9,9	67
Gardouch_extérieur	mai	100	0,11	12,6	70
Gardouch_extérieur	juin	72	0,13	14,6	73
Payra_sur_l'hers_	avril	73	0,08	11,4	68
Payra_sur_l'hers_	mai	83	0,07	13,3	68
Payra_sur_l'hers_	juin	62	0,12	15,2	70
Arzens	avril	18	0,03	11,7	67
Arzens	mai	24	0,05	13,7	66
Arzens	juin	16	0,09	15,5	69
Floure	avril	3	0,04	11,7	65
Floure	mai	0	0,05	13,5	64
Floure	juin	0	0,08	15,3	66
Lézignan-Corbières_	avril	2	0,05	12,3	66
Lézignan-Corbières_	mai	0	0,05	14,3	63
Lézignan-Corbières_	juin	0	0,05	16,2	63
Abbaye_de_Fonfroide_	avril	2	0,05	16,1	63
Abbaye_de_Fonfroide_	mai	0	0,05	14,2	62
Abbaye_de_Fonfroide_	juin	0	0,05	16,1	63
Sainte-Lucie	avril	0	0,08	13,1	66
Sainte-Lucie	mai	1	0,08	14,7	62
Sainte-Lucie	juin	0	0,06	16,3	62
Saint_jean_de_cuculles	avril	0	0,16	11,5	67
Saint_jean_de_cuculles	mai	0	0,12	14	62

Saint_jean_de_cuculles	juin	0	0,04	17,5	60
La_grand_combe	avril	0	0,26	10,9	60
La_grand_combe	mai	0	0,23	12,4	57
La_grand_combe	juin	0	0,04	16	54
Les_vans	avril	1	0,13	11,8	62
Les_vans	mai	0	0,13	13,7	63
Les_vans	juin	0	0,03	17	62
Montréal	avril	2	0,46	10,5	62
Montréal	mai	0	0,43	11,9	63
Montréal	juin	0	0,05	15,2	62
Saint_julien_du_serre	avril	3	0,46	10,5	62
Saint_julien_du_serre	mai	0	0,43	11,9	63
Saint_julien_du_serre	juin	0	0,05	15,2	62

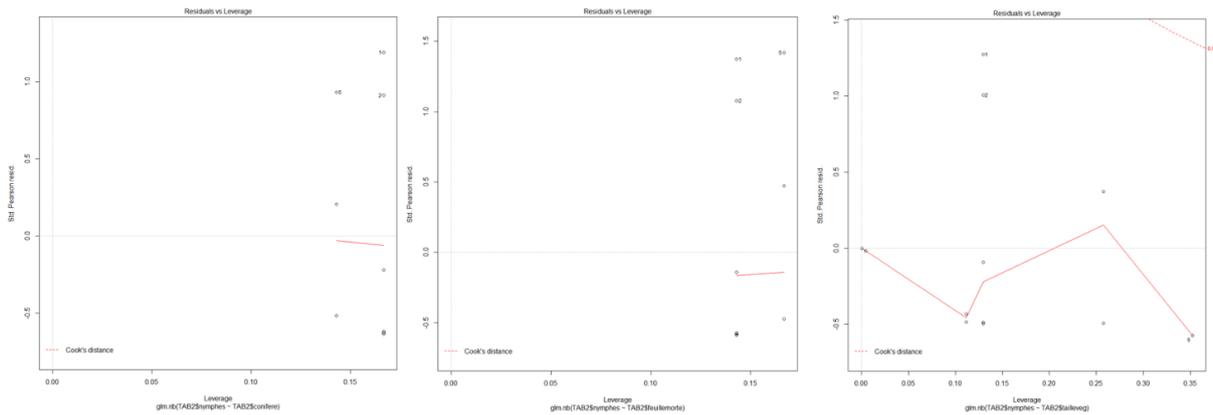
Annexe 3 : Description des conditions météorologiques au moment de chaque collecte

Site	Station	Date	précipitations	températures	vitesse vent	humidité
Gardouch	11076001	17/04/2019	0	13	8,64	74,8
		23/05/2019	0	20,88	2,2	49,4
		07/06/2019	0	12,85	3,8	70
Payra sur l'Hers	11076001	23/04/2019	0	14,9	9,15	80
		14/05/2019	0	20,1	4,05	37,5
		04/06/2019	0	22,4	9,6	61
Arzens	11069001	23/04/2019	0	13,2	6,4	92
		14/05/2019	0	18,5	6,35	44
		04/06/2019	0	20,5	8	68
Floure	11016003	24/04/2019	0	22,1	5,5	24
		14/05/2019	0	17,05	5,7	40,5
		04/06/2019	0	16,6	5,35	85,5
Lézignan Corbière	11203004	24/04/2019	0	20,6	2,1	37
		13/05/2019	0	21,3	11,2	29
		03/06/2019	0	24,85	2	44
Fontfroide	11262005	24/04/2019	0	18,7	6,55	54,5
		13/05/2019	0	20,2	8,75	28,5
		03/06/2019	0	23,6	2,7	53
Sainte Lucie	11202001	25/04/2019	0	15,3	19,95	79,5
		13/05/2019	0	17,95	8,7	30,5
		03/06/2019	0	19,1	3,3	76
Saint Jean de Cuculles	34217001	29/04/2019	0	18,3	4,5	31,7
		16/05/2019	0	20,35	3,45	35,5
		11/06/2019	0	16,8	2,3	65
Logrian Florian	30093003	29/04/2019	0	20	NA	NA
		16/05/2019	0	20,3	NA	NA
		11/06/2019	0	17,05	NA	NA
La Grand Combe	30093003	30/04/2019	0	17	2,8	37,5

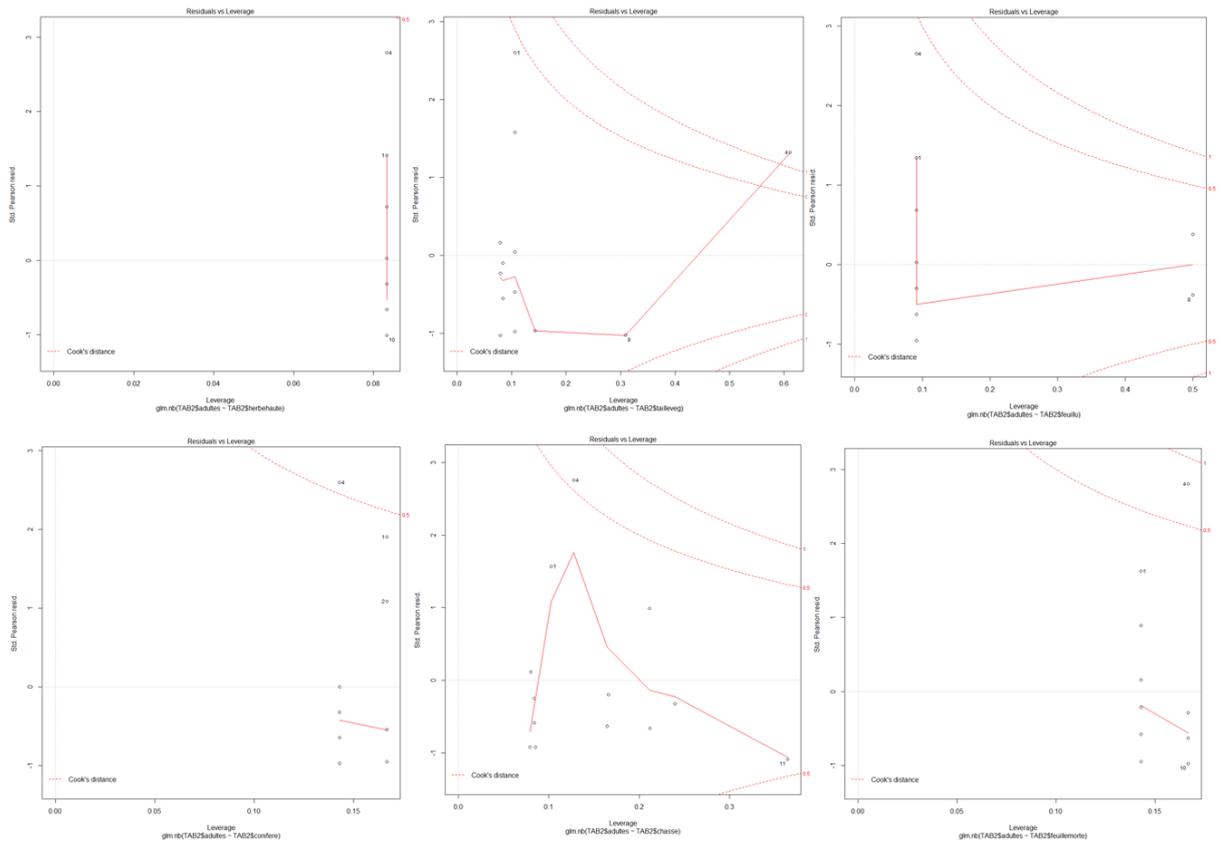
		16/05/2019	0	15,4	1,6	41
		11/06/2019	0	13,15	1,1	67,5
Les Vans	7101002	01/05/2019	0	17	46	NA
		21/05/2019	0	22,1	36	NA
		13/06/2019	0	24,6	NA	19
Montréal	7025001	01/05/2019	0	18,7	1,85	34
		22/05/2019	0	20	2,6	40
		13/06/2019	0	21,45	2,95	30,5
Saint Julien du Serre		01/05/2019	0	20,55	3,8	32
		22/05/2019	0	21,4	3,05	33,25
	7025001	13/09/2019	0	23,35	2,8	29,5



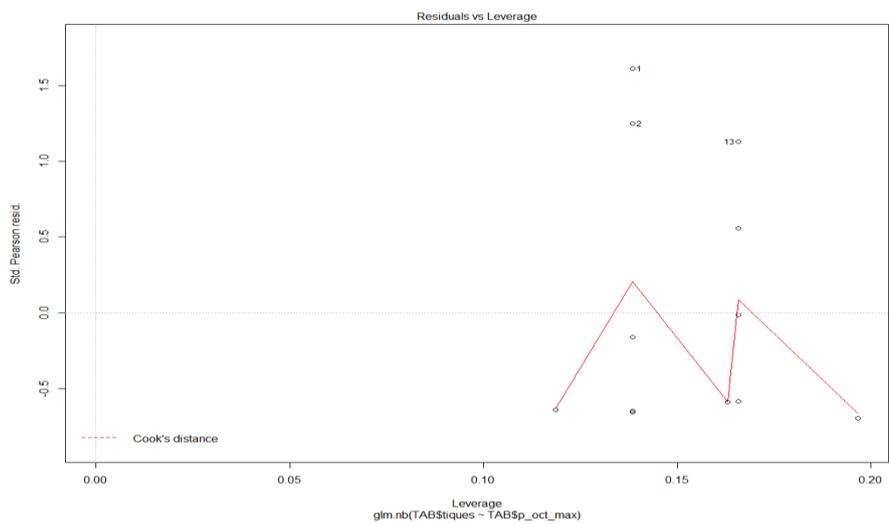
Annexe 4 : Graphique Residuals vs Leverage de la variable présence de feuilles mortes pour le nombre de tiques total



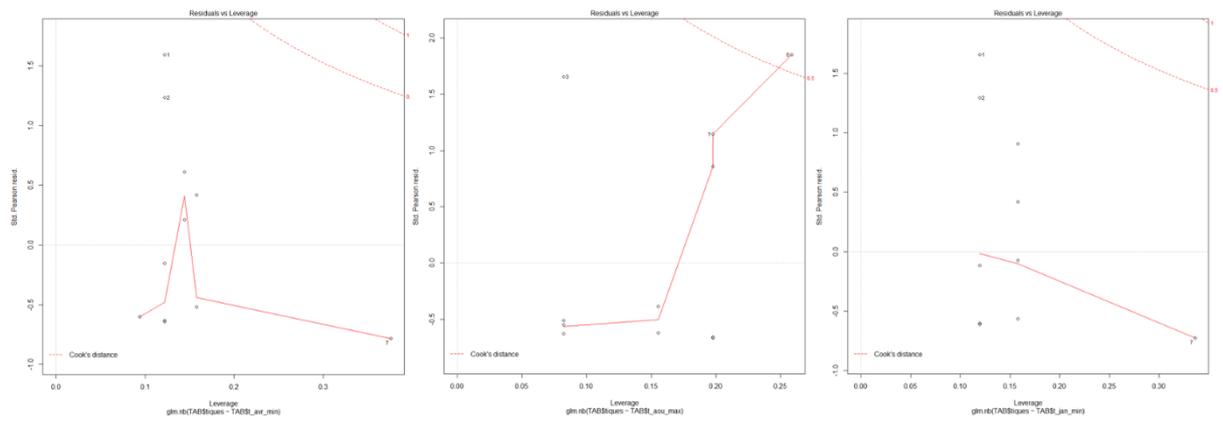
Annexe 5 : Graphique Residuals vs Leverage pour les variables conifères, feuilles mortes et taille de la végétation pour le nombre de nymphe



Annexe 6 : Graphique Residuals vs Leverage pour les variables environnementales sélectionnées par les modèles GLM pour le nombre de tiques adultes



Annexe 7 : Graphique Residuals vs Leverage pour la variable précipitations maximales en octobre pour le nombre total de tiques.



Annexe 8 : Graphique Residuals vs Leverage pour les variables températures minimales en avril et en juin et maximales en août pour le nombre total de tiques.

FICHE DE COLLECTE

Code site :

Date :

JJ/MM/AAAA

Nom et prénom du collecteur :

Initiales du collecteur :

Renseigner le nombre d'individus par passage dans le tableau ci-dessous

Transects		T01			T02			T03			T04			T05		
Passages		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
<i>Genre Ixodes</i>	Adultes mâles															
	Adultes femelles															
	Nymphes															
	Autres genres ou doute															
Présence de larves remplir O / N																

Transects		T06			T07			T08			T09			T10		
Passages		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
<i>Genre Ixodes</i>	Adultes mâles															
	Adultes femelles															
	Nymphes															
	Autres genres ou doute															
Présence de larves remplir O / N																

Résumé

Dans le domaine des maladies transmissibles, l'un des principaux défis de santé publique est de pouvoir prédire l'arrivée et la localisation des populations courant un risque d'être infectées par un agent pathogène. Il apparaît alors essentiel de bien comprendre le fonctionnement des associations hôtes-tiques dans leurs milieux naturels et des conditions environnementales favorables aux tiques afin de mieux prévoir les risques qui y sont associés. Lors des 3 sessions de collectes, nous avons pu constater que les tiques préfèrent les endroits humides composés de feuilles mortes et d'herbes basses. Les températures chaudes assèchent l'air et ont un impact négatif sur les tiques. Selon les sites, le pic d'abondance des tiques n'est pas au même moment dans l'année. Ces données permettront d'établir des modèles mathématiques qui pourront prévoir les futures abondances des tiques. L'objectif final est de proposer une stratégie de communication, de surveillance et de gestion de l'environnement afin d'améliorer la prévention des maladies, notamment la maladie de Lyme.

Mots clés : *Ixodes ricinus*, tique, environnement, climat

Summary

In the case of communicable diseases, one of the main aims for public health is to predict the arrival and location of populations with a risk of being infected with a pathogen. It's very important to understand the functioning of the host-tick associations in their natural environments and the environmental conditions favorable to ticks in order to better predict the risks associated with them. During the 3 sessions of collect, we found that ticks prefer moist areas composed of dead leaves and low grass. Hot temperatures dry up the air and have a negative impact on ticks. Depending on the site, the peak of tick abundance is not at the same time in the year. These data will help to establish mathematical models which can predict the future abundances of ticks. The ultimate goal is to provide a communication, monitoring and environmental management strategy to improve disease prevention, including Lyme disease.

Key words : *Ixodes ricinus*, tick, environment, climate