

Existe-t-il des conditions météorologiques favorables aux piqûres de tiques?

Utilisation de données issues des sciences participatives et des bases de données météorologiques pour décrire la distribution spatiotemporelle des piqûres de tiques en France métropolitaine.

Hilami Khaldoune, Godard Vincent¹, Cosson Jean-François², Nous Camille³

Department of Geography, Université Paris 8, UMR LADYSS CNRS, F-93200 Saint-Denis, France.

UMR BIPAR, INRAE, F-94700 Maisons-Alfort, France.

1. Résumé:

Dans le cadre d'un programme de sciences participatives de l'INRAE, CiTIQUE, nous avons collecté des signalements géolocalisés de piqûres de tiques sur des humains entre juillet 2017 et avril 2020. Durant cette période, pour la France métropolitaine, 22 000 signalements environ ont été collectés. Pour qualifier les conditions spatiotemporelles de ces piqûres, nous les avons couplées avec les conditions météorologiques qui régnaient au lieu et à la date de chacune des piqûres signalées. Ces déterminants météorologiques résultent de la fouille automatisée de vastes entrepôts de données comme Météo-France et Dark Sky. Parmi toutes ces variables, certaines caractérisent significativement les signalements de piqûres par rapport à des données témoins, mettant en évidence des marqueurs du risque acarologique. Si le taux d'humidité caractérisant les signalements de piqûres n'est pas significativement différent du taux d'humidité du jeu témoin, en revanche la température moyenne quotidienne caractérisant les signalements de piqûres est beaucoup plus élevée que celle caractérisant le jeu témoin, l'écart est de presque 6°C en faveur des signalements. La température moyenne des signalements est de 17.6 °C (intervalle de confiance, IC, à 95 % de [16.3 °C ; 18.9 °C]) alors qu'elle n'est que de 11.7 °C (IC à 95 % de [9.8 °C ; 13.4 °C]) pour les températures témoins moyennes pour les mêmes périodes. Cela signifie que pour qu'il y ait un risque acarologique, il ne faut pas seulement que les tiques soient actives et à la recherche d'un hôte, ce qui commence à des températures plus basses, mais que l'enjeu humain soit présent et suffisamment « accessible » (tenue, comportement...) pour que l'interaction transforme l'aléa en risque. La température maximale quotidienne est également un marqueur significatif avec un écart de 6.7°C en faveur du signalement. La température maximale quotidienne moyenne des signalements est de 23.1 °C (IC, à 95 % de [21.6 °C ; 24.7 °C]) alors qu'elle n'est que de 16.4 °C (IC à 95 % de [14.2 °C ; 18.7 °C]) pour les températures maximales quotidiennes moyennes témoins, sur les mêmes périodes. Combinant la température et l'humidité relative, la température du point de rosé est également un marqueur significatif du risque acarologique. L'écart est de 5°C en faveur des signalements. La température du point de rosé moyenne des signalements est de 11.5 °C (IC à 95 % de [10.3 °C ; 12.7 °C]) alors qu'elle n'est que de 6.5 °C (IC à 95 % de [4.7 °C ; 8.1 °C]) pour les températures moyennes du point de rosé témoins pour les mêmes périodes. Enfin, l'intensité du rayonnement ultraviolet maximale sur 24h nous révèle que la majorité des signalements se produit lorsque l'indice UV est moyennement à assez élevé alors que, dans le même temps, pour les cas-témoins, cette valeur est plus faible. En effet, la moyenne des signalements se produit pour un indice UV de 5.5 (IC à 95 % de [4.8 ; 6.1]) alors que celui du jeu témoin présente une moyenne de 3.1 (IC à 95 % de [2.5 ; 3.8]). Pour ces variables significatives d'un marqueur de risque acarologique, nous proposons dans le texte des valeurs seuils pour aider les élus et responsables des espaces à risques pour déclencher le « porter à connaissance » de l'information en direction du public en nous appuyant principalement sur le décile des signalements des piqûres de tiques.

Mots clefs : Analyse de données, Environnement, Épidémiologie spatiale, Fouille de données, Maladies à tiques, Météorologie, Sciences participatives

¹ Department of Geography, Université Paris 8, UMR LADYSS CNRS, F-93200 Saint-Denis, France; vgodard@univ-paris8.fr

² UMR BIPAR, INRAE, F-94700 Maisons-Alfort, France, passed away

³ Laboratoire Cogitamus, <https://www.cogitamus.fr/camille.nous@cogitamus.fr>

2. Introduction:

Les maladies transmises par les tiques sont en constante augmentation en Europe et en Amérique du Nord, sans que l'on sache vraiment si cela correspond à une augmentation de leur incidence, ou à une augmentation de leur détection par les services de santé (*Steere et al., 2016 ; Kilpatrick et al., 2017*). Largement répandue dans les régions tempérées de l'hémisphère nord, la borréliose de Lyme (BL), la plus emblématique de ces maladies à tiques, est la maladie à transmission vectorielle la plus fréquente sur l'ensemble de son aire de distribution depuis de nombreuses années (*Ward and Brown, 2004*). Depuis sa mise en évidence chez l'Homme en 1977 (*Steere et al., 1977*), elle est considérée comme maladie émergente, car son incidence a rapidement augmenté au cours des dernières décennies (*Stone et al. 2017*). Longtemps associée à la ruralité et à ses forêts, la BL semble pourtant poser une nouvelle problématique de santé publique dans les espaces fortement urbanisés (*Rizzoli et al., 2014*), et ce, en raison d'une forte concentration humaine et de la capacité polarisante des grands massifs forestiers périurbains. Pour autant, la présence des tiques ne se cantonne pas à la forêt, elles sont également rencontrées dans les jardins, les pâtures, les friches... (*Mulder et al., 2013 ; Zeman et al., 2015*). Alors qu'elle est maintenant assez bien connue à l'échelle planétaire, la répartition des tiques à l'échelle régionale et à une échelle plus fine encore, celle des massifs forestiers, par exemple, n'est qu'imparfaitement connue, voire méconnue.

Du rural à l'urbain dense en passant par un périurbain plus ou moins lâche, la présence des tiques est attestée, mais la connaissance des lieux d'interaction avec la population - là où les morsures se produisent - reste à construire. De même, cette morsure se produit-elle au printemps, en été voire en hiver, par temps sec, par temps humide ? Là encore, les connaissances sont lacunaires. Jusqu'à présent, il paraissait difficilement envisageable d'aller plus loin que la simple écologie des espèces de tiques après des campagnes de collectes au drapeau sur la végétation (*Cohnstaedt et al., 2012; Bord et al., 2014*) ou par collectage sur des animaux abattus à la chasse (*Gilot et al., 1994; Kriz et al., 2014*) ou bien encore sur des troupeaux domestiques (*L'Hostis, 1994; Grech-Angelini et al., 2016; Bord and Agoulon, 2017*), en extrapolant cette infestation aux paysages fréquentés. De plus, dans le cas de la BL qui n'est pas une maladie à déclaration obligatoire en France, malgré la présence de réseaux de médecins volontaires, comme ceux du réseau « Sentinelles »⁴, il est extrêmement difficile de connaître la répartition géographique des cas. Au mieux, c'est à l'échelle régionale, grâce aux cartographies « Sentinelles », qu'il est possible de percevoir les zones et les périodes où la contamination semble se concentrer croître ou décroître. De ce fait, pour faire de la prévention ou du « porté à connaissance », il est quasi impossible à l'heure actuelle d'analyser les déterminants paysagers et météorologiques qui pourraient être les marqueurs d'une situation favorable pour contracter des morsures de tiques, première étape vers une BL ou une autre maladie transmise par les tiques, si celles-ci sont infectées.

Pour progresser dans la connaissance des lieux et conditions de morsures, donc de contamination potentielle, il est indispensable d'accroître le volume des données à traiter en dépassant la seule collecte effectuée par des équipes scientifiques (*Laaksonen et al., 2017*). Impliquer les citoyens dans la constitution de bases de données sur des questions de santé est maintenant bien documenté (*Ranard et al., 2014*). Recourir à la contribution citoyenne pour collecter des données portant sur les morsures de tiques est relativement récent. En Europe, les premières expérimentations sont attribuées aux Pays-Bas (*Garcia-Marti et al., 2018*) et consultables sur les sites de Natuurkalender⁵ et Tekenradar⁶. C'est la solution qui a été retenue pour faire rentrer des gros volumes d'informations sur des situations et des lieux variés qui seuls pourront permettre de faire ressortir les déterminants d'exposition aux morsures et donc progresser vers la connaissance du risque. Actuellement la partialité des données ne permet pas de savoir si, pendant la saison acarologique, les jardins ruraux sont plus « à risque » que les forêts périurbaines, en nombre de morsures constatées par exemple. Elle ne permet pas non plus de connaître s'ils le restent toute la saison ou seulement au printemps, avant la dessiccation liée aux chaleurs estivales, qui se feront moins sentir dans les litières forestières ? Cette progression des connaissances est un préalable à la constitution d'observatoires dédiés aux maladies transmises par les tiques dont l'objectif serait de faire de la prévention ou du « porté à connaissance » à partir de signaux météorologiques avant-coureurs concernant les espaces les plus favorables à l'interaction tiques-humains, ceux où se produisent les morsures.

Les maladies à tiques sont le résultat d'une combinaison complexe de facteurs écologiques et sociologiques. En quelques années elles sont devenues un problème important en santé publique et

⁴ <https://websenti.u707.jussieu.fr/sentiweb/?page=carte> (d.c 17/05/2021)

⁵ <http://www.natuurkalender.nl> (d.c 17/05/2021)

⁶ <https://www.tekenradar.nl/> (d.c 17/05/2021)

vétérinaire dans de nombreux pays développés (Vayssier-Taussat, Cosson, et al., 2015 ; Vayssier-Taussat, Kazimirova, et al., 2015). Elles sont complexes et relèvent typiquement d'une approche dite « One Health », tant les santés humaine, animale et environnementale y sont intriquées et impliquées dans leur épidémiologie (Vayssier-Taussat, Cosson, et al., 2015). Leur impact économique (direct et indirect) est considérable (Lohr et al., 2015 ; van den Wijngaard et al. 2017). Ces maladies convoient également une très forte charge émotionnelle dans les sociétés occidentales, en Amérique du Nord comme en Europe, où les citoyens s'inquiètent de cette recrudescence et interpellent les gouvernements et les services de santé (Salomon and Vayssier-Taussat, 2016). Dans ce contexte anxiogène, plusieurs pays européens comme les Pays-Bas, la Belgique, la Suisse et la France, ont initié des plans nationaux ou des projets de recherche participative (Cosson, 2018) dans le but d'impliquer les citoyens pour améliorer les connaissances et la prévention de ces maladies. En France, le projet CiTIQUE⁷, initié par l'INRAe, la DGS et l'Anses, lancé le 17 juillet 2017⁸ a tout de suite suscité une très forte participation. Les résultats présentés ici s'appuient sur l'implication des citoyens dans la collecte d'informations sur les conditions de la survenue de piqûres de tiques, grâce à l'application « Signalement TIQUE⁹ ». Rappelons que l'utilisation d'internet, puis des smartphones, pour la collecte des données de santé remonte aux années 2000 (Freifeld et al., 2010 ; Dickinson et al., 2012) et au début des années 2010 pour les signalements de piqûres de tiques (Haddad et al., 2015). La littérature scientifique croisant sciences participatives, collecte de tiques et applications mobiles était encore peu abondante ces dernières années. Quelques exemples commencent d'être disponibles (Bord et al., 2019). Une des toutes premières publications, concernant une application pour animaux de compagnie, essentiellement les chiens, a été proposée en 2018, située aux Pays-Bas (Jongejan et al., 2019) et à destination des vétérinaires.

Pour notre part, sur les trente premiers mois de fonctionnement, entre juillet 2017 et avril 2020, après nettoyage de la base de données, plus de 22 000 signalements ont été enregistrés, dont plus de 17 000 sur des humains et 5 000 sur les animaux de compagnie. Parmi les plus de 20 000 tiques qui ont été archivées dans les « tiquothèques » de l'INRAe, à la suite d'envois liés au programme de sciences participatives CiTIQUE, plus de 1 400 tiques piqueuses ont analysées à ce jour pour étudier la distribution géographique en France des agents pathogènes qu'elles contenaient¹⁰. Ce n'est pas cet aspect qui sera présenté ici, mais celui de la participation citoyenne aux signalements et surtout l'enrichissement de ces données par de la donnée météorologique pour essayer de comprendre les conditions d'exposition aux piqûres de tiques au travers des conditions météorologiques concomitantes ou préalables aux piqûres.

Si les premières analyses de cette masse de données confirment la nécessité de poursuivre la compréhension des ressorts de la participation citoyenne pour interpréter les résultats, surtout pour analyser la localisation des piqûres, il demeure intéressant de compléter et qualifier ces signalements par de la donnée météorologique, l'objet de cette publication, pour faire le lien entre aléa (présence des tiques dans le paysage), et enjeu (présence concomitante des humains dans ce même paysage) pour évoquer un risque d'exposition. En effet, la littérature scientifique nous renseigne sur l'écologie des tiques et en particulier sur celle qui a le plus fréquemment été fournies par les participants lors des signalements, à savoir *Ixodes Ricinus*, dans 90 % des cas pour la France métropolitaine¹¹. Si les conditions de températures, de précipitations, hygrométries, etc. des signalements s'écartent significativement des conditions météorologiques représentatives de l'ensemble du territoire au même moment et collectées sur un jeu de données témoin, nous faisons l'hypothèse qu'il existe une météorologie caractérisant les lieux et conditions de piqûres de tiques et que celle-ci diffère de celle des conditions générales. Notre objectif étant également de trouver une ou plusieurs variables servant de signal pour déclencher un « porté à connaissance » d'un accroissement du risque acarologique. Nous savions déjà, par les données disponibles dans la littérature, comme le rappellent Ostfeld et Brunner (Ostfeld and Brunner, 2015), que ces variables abiotiques, comme le sont les données météorologiques, diffèrent, en valeurs, entre le laboratoire et le terrain.

Avec l'analyse des données de signalements couplées à de la donnée météorologique, nous allons essayer d'apporter ici des informations sur les conditions d'exposition réelles au risque acarologique pendant ces trois dernières années en France métropolitaine, mais également de fournir un repère climatique spatio-temporel, point de départ des conditions futures d'exposition aux tiques, celles qui conditionneront nos promenades dans les espaces de nature relativement au changement climatique en cours et futur.

⁷ <https://www.citique.fr/> (d.c 25/03/2020)

⁸ <https://www.inrae.fr/actualites/signalement-tique-nouvelle-version-lapplication-signaler-piqures-tiques> (d.c 17/05/2021)

⁹ <https://www.citique.fr/signalement-tique/> (d.c 25/03/2020)

¹⁰ <https://www.citique.fr/actualites-2/> (d.c 25/03/2020)

¹¹ Résultats préliminaires présentés aux rencontres naturalistes 2018

<http://www.arb-idf.fr/article/retour-rencontres-naturalistes-2018> (d.c 25/03/2020)

3. Méthodologie:

Les données qui ont servi à cette étude sont issues d'actes volontaires de citoyens qui ont décidé de contribuer à un programme de science participative, CiTIQUE en l'occurrence. Comme cela a déjà été signalé, depuis une quinzaine d'année avec l'essor des sciences participatives (Cohn, 2008 ; Bonney et al., 2009 ; Silvertown, 2009 ; Wang Wei et al., 2016), l'information, la motivation, l'implication des participants sont des paramètres aussi importants, si ce n'est plus, que la présence de l'objet d'étude. Comme le résume J. Durand¹², pour qu'il y ait signalement, il faut simultanément : « la présence d'un humain ET la présence d'une tique active ET que cette tique soit en quête d'un mammifère à piquer ET qu'il y ait effectivement piqûre ET que le citoyen ait connaissance de l'application Signalement TIQUE ET qu'il ait la motivation de participer et signaler sa piqûre » ! Cela fait beaucoup de conditions. Nous sommes loin des données protocolées des sciences expérimentales obtenues en laboratoire. La carte présentée sur la Fig. 4.2 en est un parfait exemple. Elle n'indique pas forcément où se trouvent les concentrations, ou les absences de concentrations, de tiques à l'affut mais où se trouvaient des personnes informées et souhaitant signaler une piqûre. Un grand nombre de signalements dans un secteur donné, comme on peut le voir sur cette figure, peut être le résultat d'une communication plus efficace, comme en Alsace-Lorraine où est basé le siège de CiTIQUE, ou de la présence d'une forte population, comme en Île-de-France, etc. Si le biais induit par les différences de quantité de population pourrait être corrigé, celui lié à l'information, voire à la motivation et par la même celui lié à l'engagement citoyen est plus difficile à corriger. Conscient du manque de comparaison avec des données protocolées pour en évaluer la fiabilité et ayant connaissance d'une littérature nombreuse portant sur l'évaluation des biais des données collectées par les citoyens (Ratnieks et al., 2016 ; Aceves-Bueno et al., 2017, Balázs et al., 2021), nous resterons prudents quant à la portée des résultats obtenus surtout en matière de répartition fine, en particulier locale.

Signalement tique / CiTIQUE

La connaissance de l'aire de distribution d'*Ixodes Ricinus* s.l. en France est bien décrite et depuis longtemps. Une synthèse reprenant les travaux de B. Gilot (Gilot, 1985), de Gilot et Pérez-Eid (Gilot and Perez-Eid, 1998), ou de Pérez-Eid (Pérez-Eid, 2007), puis complétée par des travaux du réseau VBORNET¹³ et de l'EFSA¹⁴ permet de considérer que peu de parties du territoire métropolitain français échappent à cette tique dure (Fontenille et al., 2013, p.3). Cette synthèse indique qu'à l'exception de zones au-delà de 1 500 m d'altitude et des zones les plus sèches du pourtour méditerranéen, *Ixodes Ricinus* est potentiellement partout.

Depuis les années 1980, différents auteurs se sont penchés sur l'évolution de l'aire de répartition des tiques hématophages en général et d'*Ixodes Ricinus* en particulier. Une synthèse d'une large part des travaux disponibles permet de constater que cette aire de répartition a tendance à gagner en altitude et en latitude vers le nord (Léger et al., 2013). Il est souvent admis que les principaux facteurs qui influencent cette extension se regroupent en une composante paysagère et une composante climatique (Marsot et al., 2017). Toutes les deux étant influencées par les activités humaines (Medlock et al., 2013). C'est de la composante climatique sur le court terme dont il s'agit dans cet article et en particulier de la collecte des données météorologiques au moment, et aux jours précédant le moment, où le participant a « collecté » la tique responsable de la piqûre détectée. Cette donnée météorologique ponctuelle est à l'échelle des paysages car elle provient du distributeur et agrégateur de données météorologique Darksky.net¹⁵ ainsi que de Météo-France, et non pas de capteurs disséminés à hauteur des tiques dans les sous-bois, les parcs ou les jardins. Cette donnée météo doit venir qualifier les données issues des signalements envoyés par les « collecteurs » et fournies par l'application « Signalement TIQUE¹⁶ », que ce soit via un smartphone ou un ordinateur, fixe ou portable.

Les données de signalements consistent principalement en : un identifiant unique généré à la saisie ; des dates (de piqûre, de saisie) ; un couple de coordonnées géographiques (obtenu par un pointeur sur une carte numérique géo-référencée) ; le sexe du répondant et son âge ; le nombre de tiques collectées ; une estimation de la précision du lieu et de la date de la collecte de la tique qui a occasionné la piqûre ; un descriptif du paysage supposé de la collecte (forêt, jardin privé, parc urbain, prairie, zone agricole

¹² https://www.citique.fr/distribution_signalements_2019/ (d.c 25/03/2020)

¹³ <http://www.vbornet.eu/> (d.c 17/05/2021)

¹⁴ <https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2903/j.efsa.2010.1723> (d.c 17/05/2021)

¹⁵ la plate-forme acquise par Apple inc. en Mars 2020 maintient une API fonctionnelle jusqu'à fin 2021 pour les développeurs ayant souscrit un compte avant la date d'acquisition. Le reste des services a été suspendu. Plus de détails sur <https://blog.darksky.net/> (d.c 17/05/2021)

¹⁶ <https://www.citique.fr/signalement-tique/> (d.c 25/03/2020)

cultivée ou autre à préciser) ; l'activité qui était pratiquée (activité professionnelle, lieu de résidence, randonnée-promenade-pique-nique, sortie scolaire, scoutisme ou autre à préciser). Un formulaire papier comprenant toutes ces rubriques est également téléchargeable sur le site de CiTIQUE¹⁷.

Collecte des données météo Dark Sky et Météo-France

Préparation des données

Le jeu de données brutes issu des collectes du projet CiTIQUE comporte des signalements concernant les humains et les animaux de compagnie. Ces signalements s'étalent sur une fourchette temporelle allant du 17 janvier 2017 au 04 avril 2020. Les « saisons » de collecte, quant à elles, sont qualifiées selon les quatre années principales d'activité, soit : 2017, 2018, 2019 et 2020. L'analyse directe en partant de la donnée brute s'est avérée impossible. Les formulaires de collecte ayant utilisé des séparateurs de champs de données ambigus, ainsi que des champs libres avec des séparateurs ayant une valeur sémantique¹⁸ interprétée, cela rendait le traitement direct impossible et compromettait la structure de la donnée. Une phase de prétraitement et de nettoyage s'est avérée indispensable avant de qualifier les signalements géographiquement et météorologiquement. Un géocodage inverse¹⁹ a permis au préalable de déterminer les localités administratives exactes de chaque lieu de morsure. Les serveurs de géocodage publics étant soit très coûteux, soit sujets à des quotas d'utilisation, il a été nécessaire de compiler un serveur local de géocodage²⁰ sur une machine sous le système d'exploitation GNU/Linux. C'est une opération techniquement exigeante et gourmande en ressources informatiques. Une automatisation de ces processus grâce au langages Python²¹ et SQL²² a permis d'effectuer ces tâches avec précision en tenant compte des irrégularités structurelles de la donnée brute. Dans les deux cas de langages utilisés, un recours intensif aux expressions régulières (Aho 1990) a été nécessaire. Dans le cadre de la politique dite « Open Data » les codes et scripts ayant permis ce traitement sont disponibles et consultables dans un dépôt à contrôle versionné ou Git²³. Le tableau (cf. Table 3.1) présente le nombre de signalements bruts, pré-traités et nettoyés, puis finaux et qualifiés prêts à l'analyse :

Saison de collecte	Humains			Animaux ²⁴		
	PT ²⁵	T	NET	PT	T	NET
2017	3 586	3 271	2 979	1 920	991	952
2018	8 636	7 546	6 412	2 376	2 052	1 914
2019	5 516	5 277	5 266	2 096	2 070	2 060
Total	17 134	16 094	14 657	5 762	5 113	4926

Table 3.1: Nombre des tiques signalées et conservées en fonction de l'étape du traitement informatique

La première phase de nettoyage ou prétraitement « PT » consiste à séparer les latitudes des longitudes stockées dans la même colonne, puis de changer le séparateur de champs de la virgule « , » en point-virgule « ; » moins ambigu car moins utilisé dans les champs libres. La deuxième phase « T » consiste à géolocaliser les enregistrements, éliminer les localités altérées ou aberrantes (étranger, mers et océans, Antarctique, etc.) et uniformiser les dates et temps (timestamps) au format « ISO 8601 »²⁶. Pendant la phase finale de traitement « NET », un « objet météo » est associé à chaque point localisé dans le temps et l'espace. Une fois la donnée géolocalisée, qualifiée météorologiquement et nettoyée, elle est stockée dans une base de donnée relationnelle augmentée d'une extension géospatiale²⁷ où chaque enregistrement est converti en « objet géographique » ou géométrie ponctuelle géolocalisée. La qualification par la météo se fait à partir de la coordonnée géographique exacte de la morsure ainsi que par la date de signalement, ce qui donne à chaque enregistrement un caractère spatio-temporel précis. Le silo de donnée météorologique Dark Sky offre un ensemble d'outils programmatiques basiques (API)²⁸ permettant d'interroger leurs installations sur les conditions météo survenues à un instant « T » dans

¹⁷ <https://www.citique.fr/telechargements/download-info/formulaire-papier-signaler-une-et-envoyer-une-piqure-de-tique/> (d.c 14/04/2020)

¹⁸ Toute expression interprétée comme ayant une valeur algorithmique et non pas simplement textuelle.

¹⁹ Attribution d'un contexte spatial exacte à partir d'une paire de coordonnées géographiques.

²⁰ <https://nominatim.openstreetmap.org> (d.c 14/04/2020)

²¹ <https://www.python.org/> (d.c 18/05/2021)

²² <https://www.postgresql.org/> (d.c 18/05/2021)

²³ <https://github.com/spicysardine/pycitique>

²⁴ La fourchette temporelle pour les animaux s'étale entre le 13/01/2017 et le 28/02/2020

²⁵ PT=pré-traitement. T=traitement. NET=nettoyé

²⁶ <https://www.iso.org/fr/iso-8601-date-and-time-format.html> (d.c 18/05/2021)

²⁷ <https://postgis.net/> (d.c 18/05/2021)

²⁸ Application Programming Interface

une localité « L ». Le programme Pycitique (*cf. note n°23*), développé spécialement pour l'étude présentée dans cet article, constitue un ensemble d'outils pratiques construits autour de l'engin d'interrogation Dark Sky, le stock Météo-France, le serveur de géocodage et la machine permettant le traitement et l'accueil de la base de données. Le déclarant ayant fourni uniquement la date de morsure, l'interrogation récupère une valeur journalière interpolée à la localité sur vingt-quatre heures²⁹. Les principaux paramètres météorologiques quotidiens sont les suivants : températures enregistrées et ressenties (moyenne, min, max, jour et nuit avec l'heure d'enregistrement) ; couvert nuageux estimé (en pourcentage) ; point de rosée (en degrés C°) ; humidité (en pourcentage) ; précipitations [quantité, intensité moyenne par heure (mm/h), maximum d'intensité (mm/h)...] ; pression atmosphérique en hectopascal (hPa) au niveau de la mer ; indice de rayonnement ultra-violet (plus le temps d'enregistrement du maximum de rayonnement ultra-violet) ; visibilité atmosphérique (en km) ; vent (direction, force moyenne, vitesse des rafales et heure d'enregistrement) et sources des données météorologiques. La liste complète et extensive est disponible sur le site relatif à l'API³⁰ de Dark Sky et de Météo-France. Deux documents récapitulatifs et explicatifs sont également disponibles sur le Git du projet³¹. Certains paramètres comme la température sont déclinés en températures nocturne et diurne, vues les différences évidentes entre les deux périodes de la journée. Le demi-intervalle fut toutefois calculé pour donner une idée moyenne de la température du jour du signalement. La position des morsures remontée étant imprévisible et distribuée sur l'ensemble du territoire français, la puissance de Pycitique réside dans la possibilité d'extraire la donnée correspondante en un point quelconque de la carte.

Comparaison des sources de données météorologiques

Nous avons choisi de tester la pertinence de la donnée Dark Sky avec la donnée de référence, en France, à savoir Météo-France et les 554 stations métropolitaines du réseau Radome³² et en particulier de ses 42 stations synoptiques (*cf. Fig. 3.1*) en libre accès³³. Pycitique comporte des outils permettant d'exploiter les silos de données issus de Dark Sky avec les stations synoptiques provenant des 42 stations uniformément réparties sur le territoire métropolitain et la Corse proposées par Météo-France et de les comparer à l'aide de tests statistiques. Les résultats de ces tests sont présentés au chapitre des résultats comme ceux des signalements caractérisés par la donnée météorologique issue de données Dark Sky.

Les données synoptiques Météo-France présente toutefois deux particularités par rapport à celles de Dark Sky. La première est qu'elles offrent des relevés granulaires, sur la base d'une « fraction » de journée d'une durée de trois heures à partir de minuit. La deuxième est qu'elles ne proposent pas de températures différenciées tel que Dark Sky le fait mais une colonne unique de températures, toutes périodes d'éclairement confondues. Il a donc fallu créer les variables correspondantes, grâce à des expressions régulières (*Aho 1990*), par date et par station synoptique. Une fois la correspondance établie une moyenne arithmétique journalière est calculée par journée. Météo-France proposant des valeurs en température absolue une conversion en Celsius s'impose afin de permettre la comparaison avec les paramètres de Dark Sky. Les deux jeux de données sont uniformisés et limités aux dates précisées ci-dessus, soit 1 191 dates possibles qualifiées météorologiquement pour enrichir les données de signalements. Les comparaisons effectuées entre les données Météo-France et Dark Sky sont présentées au chapitre des résultats.

²⁹ <https://darksky.net/dev/docs#time-machine-request> (d.c 15/04/2020)

³⁰ <https://darksky.net/dev/docs> (d.c 15/04/2020)

³¹ <https://github.com/spicysardine/pycitique/tree/master/PDF/documentation>

³² https://donneespubliques.meteofrance.fr/?fond=produit&id_produit=93&id_rubrique=32 (d.c 18/05/2021)

³³ https://donneespubliques.meteofrance.fr/?fond=produit&id_produit=91&id_rubrique=32 (d.c 18/05/2021)

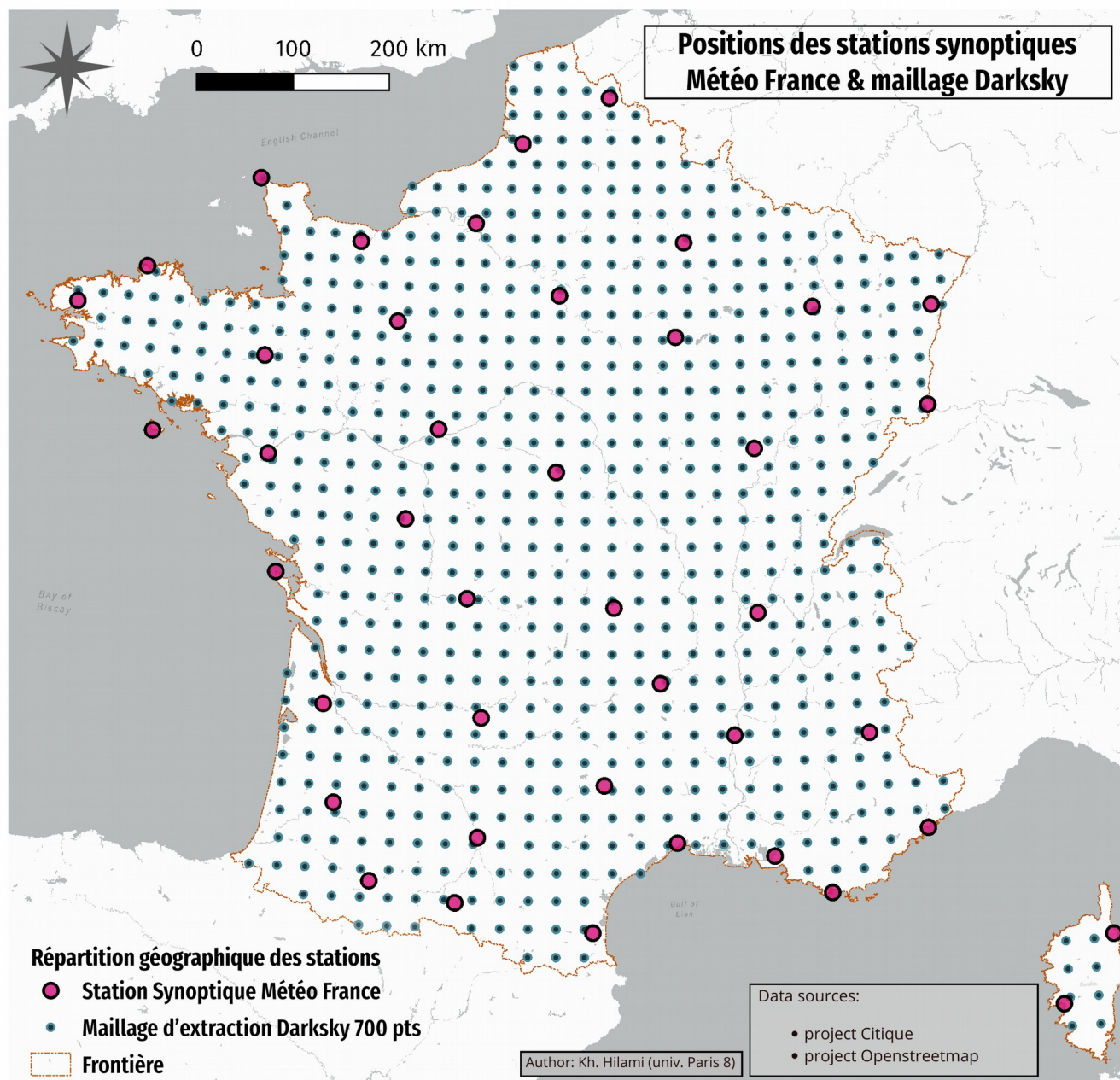


Fig. 3.1: Répartition des 42 stations synoptiques de Météo-France et Maille systématique pour extraire la donnée météorologique de Dark Sky

L'absence de différences significatives entre les données Météo-France et Dark Sky ayant été testées et démontrées sur la majorité des paramètres communs aux deux bases de données (cf. 4 Résultats :), c'est donc la base Dark Sky qui est utilisée pour enrichir les signalements d'une part et d'autre pour constituer un jeu de données témoin « France entière » pour tester si les conditions météorologiques de signalements diffèrent significativement des conditions météorologiques générales, encore qualifiées de « témoin ». L'objectif étant de vérifier si les signalements s'effectuent dans un contexte météorologique particulier ou « standard », c'est-à-dire identique aux conditions météorologiques générales de la même période. Ce jeu témoin « France entière » a été constitué à l'aide d'un maillage spatiale systématique de 700 points (cf. Fig. 3.1). À chacun des 700 points de la maille un prélèvement fut extrait pour les 1 191 journées de la période d'étude, soit 833 700 échantillons. Ce deuxième jeu de données constitue le jeu météorologique témoin auquel est comparé celui qualifiant les signalements (cf. chap. 4 Résultats :).

Activité, biologie des tiques et information météorologique dans la littérature

Si les données qui vont être présentées ici sont bien des données qui caractérisent et/ou influencent le comportement humain, elles caractérisent aussi l'interaction entre les tiques à l'affût et les hôtes potentiels qui fréquentent leur biotope. Elles ne permettent probablement pas de reprendre *in extenso* l'intégralité des données climatiques accumulées dans la littérature scientifique sur les tiques, mais nous pouvons faire l'hypothèse de la transposabilité de certains des paramètres connus comme significatifs, issus de ces articles, pour apporter un éclairage sur les conditions de la rencontre hôte-tique, en fonction de la météorologie de cette interaction ou de celle qui la précède.

Les principaux paramètres météorologiques dont il est question dans la littérature scientifique sont la température et l'humidité. Ces paramètres abiotiques sont connus depuis longtemps pour les principales espèces de tiques, en particulier pour *Ixodes ricinus* sur le continent européen et *Ixodes scapularis* sur le continent américain. Pour ces tiques du genre *Ixodes*, il est établi depuis longtemps que le fonctionnement métabolique est conditionné par la température du milieu tout au long de l'année (Lees and Milne, 1951 ; Macleod, 1932). Que ce soit dans les phases de développement ou dans les phases de survie, la littérature scientifique recense un grand nombre de paramètres relatifs à la température et à l'humidité relative. Le temps de développement est minimal autour de 15°C pour les femelles gorgées et de 20°C pour les larves et nymphes gorgées (Campbell, 1948, Ogden et al., 2004), en deçà et au-delà, ce temps de développement augmente.

L'activité d'*Ixodes ricinus* ne démarre réellement qu'à partir de 5°C. C'est à partir de cette température qu'elle accumule de l'énergie pour initier son développement (Campbell, 1948). Hauser et ses collègues retiennent une température de 7°C calculée avec une moyenne mobile sur 5 jours (Hauser et al., 2018). De même, si la survie est courte en dessous de 0°C (Aeschlimann, 1972 ; Herrmann and Gern, 2013), les températures chaudes ne leur sont guère favorables. Il y a cependant peu d'études, même en laboratoire, qui dépassent les 25°C, d'après une recension réalisée par Julie Cat pour sa thèse (Cat, 2017). Toujours sur le principe des moyennes mobiles sur 5 jours, Hauser et ses collègues retiennent une température de 27°C au-delà de laquelle la densité des nymphes décroît significativement (Hauser et al., 2018). Il est donc courant de retenir un optimal de température compris entre 10 et 20°C.

Comme les tiques s'hydratent par l'humidité atmosphérique, les valeurs d'humidité relative citées comme minimales pour assurer leur développement et leur survie doivent atteindre ou dépasser 80% en milieu naturel (Gray, 1998 ; Boyard et al., 2008). Julie Cat, dans la recension précédemment citée, évoque « Une humidité relative au moins supérieure à 75% [...] pour que les tiques puissent s'hydrater pour les phases en développement comme pour les phases actives (Kahl, 1991, in Cat, 2017) ».

Hormis la température et l'humidité relative, les autres paramètres météorologiques sont numériquement peu présents dans la littérature scientifique. Il sera éventuellement possible de trouver quelques références croisant activité des tiques et précipitations (Hauser et al., 2018 ; Hubálek et al., 2004) ou déficit de saturation (Hauser et al., 2018 ; Perret et al., 2000) ou encore vitesse du vent (Mathews-Martin et al., 2020 ; Hubálek et al., 2004), mais elles sont plus rares et peu citées. Il s'agit donc ici de défricher un domaine relativement vierge car pour le moment seule l'activité des tiques en regard de la météorologie a été analysée et non le risque acarologique pris en compte au travers des signalements de piqûres en relation avec d'autres facteurs climatiques que les seuls températures et taux d'humidité.

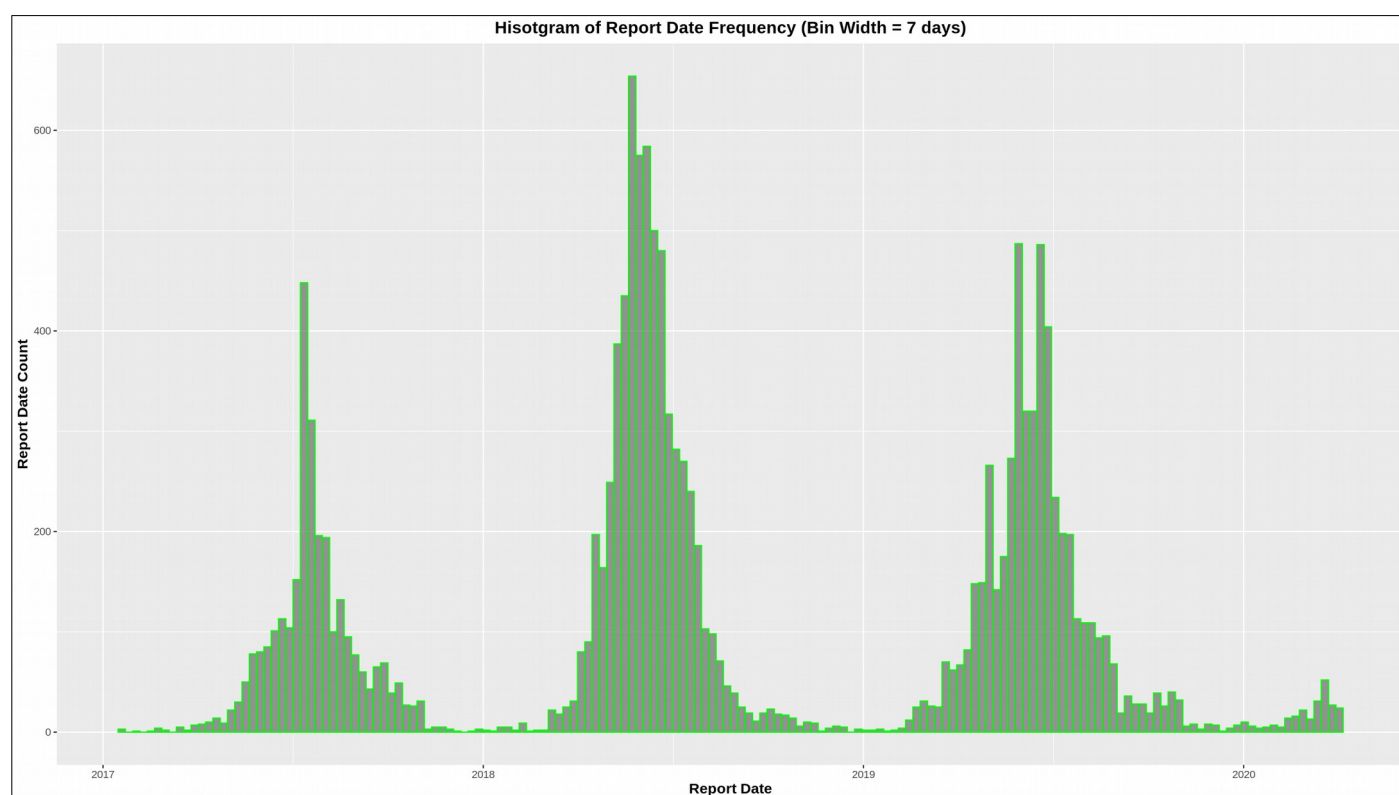
4. Résultats:

Le premier résultat présenté concerne la répartition des signalements sur la période d'étude, soit 1 191 jours répartis du 15 juillet 2017, date officielle du lancement de l'opération de collecte collaborative, jusqu'au 4 avril 2020. Cette date de fin correspond à deux événements. Le premier est lié à la conjoncture économique et à la vie des entreprises. Apple a racheté DarkSky le 31 mars 2020 et commence une politique de fermeture d'accès³⁴. Le deuxième événement est lié à la baisse caractérisée des signalements. Baisse qu'il est légitime d'attribuer au confinement, dû à la Covid19 en France, intervenu le 17 mars, soit 15 jours plus tôt. Cette combinaison d'évènement nous a persuadé qu'un cycle s'achevait et qu'il n'était pas judicieux d'attendre le changement d'interface de l'application « Signalement-tique », le 18 mai 2020³⁵, pour clore la première phase de l'étude et produire une première analyse.

³⁴ <https://blog.darksky.net/> (d.c 09/03/2021)

³⁵ <https://www.citique.fr/signalement-tique/> (d.c 09/03/2021)

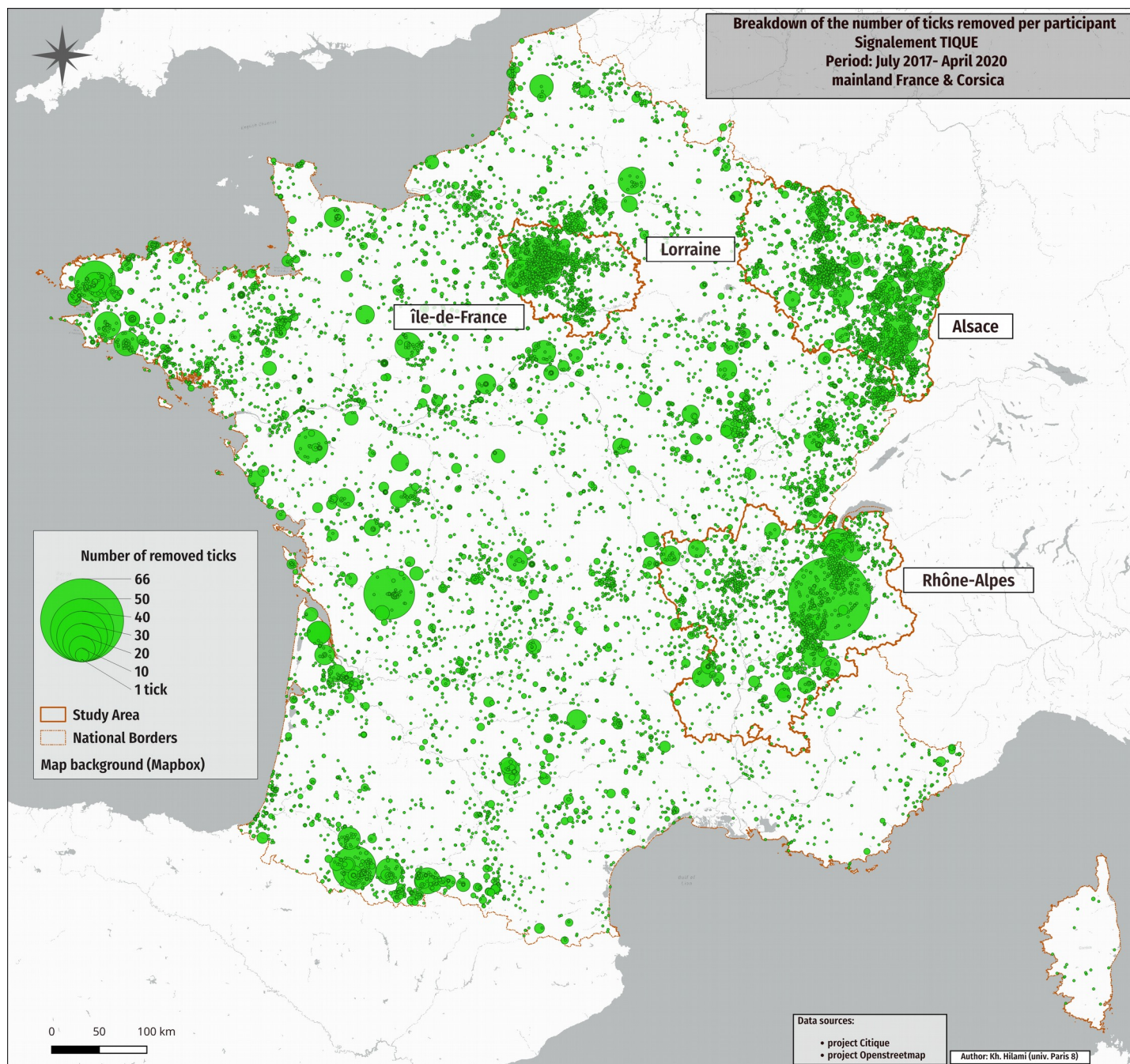
Un histogramme reprenant l'ensemble des signalements sur les humains est présenté sur la Fig. 4.1. La répartition annuelle des signalements, toutefois à peine amorcée en 2020, permet de constater sur les trois premières années des différences de forme qui ne sont pas sans rappeler celles de l'activité des tiques, telle que représentée sur la Fig. 4.3. Cette variabilité interannuelle de l'activité et de l'abondance des tiques est bien documentée à des échelles fines de collecte et sur des durées plus longues, pour le moment, que dans notre cas, par exemple sept ans pour R. Paul et ses collègues (*Paul et al., 2016*). Si les conditions météorologiques, surtout la sécheresse et la chaleur, ont un impact sur la densité des tiques, en revanche, elles ne réduisent pas forcément l'infestation des hôtes, comme les petits mammifères par les larves et nymphes, cas d'*Ixodes scapularis* documenté en Amérique du Nord sur 11 ans (*Burtis et al., 2016*). La météorologie n'est donc pas le seul marqueur de l'activité des tiques. D'autres paramètres, comme la variabilité de la densité des rongeurs (*Krawczyk et al., 2020*), ont une influence avérée sur l'activité des tiques. Seulement, elle est un des plus faciles à appréhender sur de larges territoires grâce aux bases de données. Nous devons toutefois, pour les résultats présentés maintenant, rappeler qu'ils sont les prémisses de séries plus longues et qu'ils devront être consolidés dans les années à venir en accumulant les données de signalements et la météorologie qui leur est associée pour confirmer et accroître leur robustesse.



*Fig. 4.1 : Répartition temporelle des signalements
(France, Janvier 2017 – Avril 2020, soit 1191 jours)
Sources : données du programme CiTIQUE*

Pour comparer les conditions météorologiques caractérisant les signalements de piqûres et les conditions météorologiques générales, il était indispensable de connaître quotidiennement sur un échantillon représentatif de l'ensemble du territoire métropolitain la valeur des principaux paramètres météorologiques. La logique aurait voulu que l'on se tourne vers l'opérateur national français, Météo-France. Or, en 2017, lorsque nous avons initié ce projet, les échanges que nous avons eus avec les services concernés de Météo-France nous ont incité à nous tourner vers un autre fournisseur. Nous avons retenu le fournisseur Dark Sky dont les données ont été comparées, pour information, à celle de Météo-France pour les stations synoptiques pour lesquelles il était aisé d'obtenir un jeu de données³⁶.

³⁶ https://donneespubliques.meteofrance.fr/?fond=produit&id_produit=90&id_rubrique=32 (d.c 17/03/2021)



*Fig. 4.2: Répartition spatiale des signalements
(France, Janvier 2017 - Avril 2020, soit 1191 jours)*

Les comparaisons ont été menées sur les données qui étaient en commun dans les deux jeux constitués à partir de la base synoptique Météo-France et de la base Dark Sky. Il s'agit des données quotidiennes moyennes comme : la couverture nuageuse (Cloud Cover), le point de rosé (Dew Point), le taux d'humidité (Humidity), l'intensité des précipitations (Precipitation intensity), la pression ramenée au niveau de la mer (Pressure at sea level), la température moyenne sur 24 heures (Temperature), la température minimum sur 24 heures (Temperature low), la température maximum sur 24 heures (Temperature high), la visibilité (Visibility), les rafales de vents (Wind Gust) et la vitesse du vent (Wind Speed). Ces paramètres ont été traités comme des données appariées sur lesquelles nous avons appliqué le test de Wilcoxon [paquet wilcox.test] du langage R. Les résultats des tests sont regroupés dans la Table 4.1.

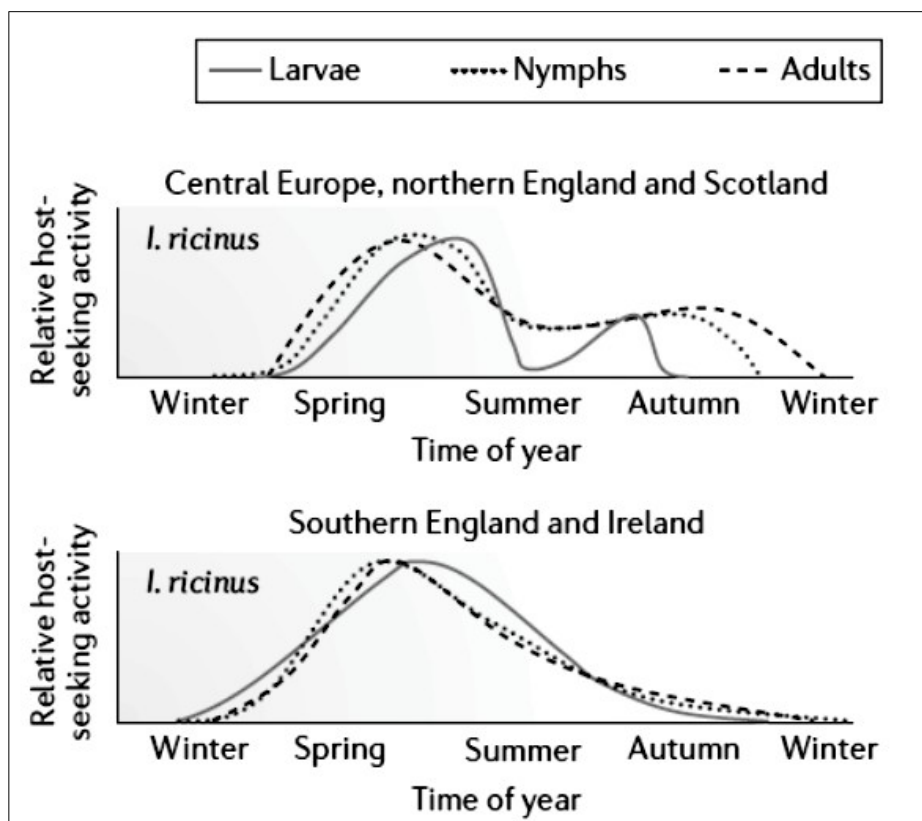


Fig. 4.3: Profil-type de l'activité d'*I. ricinus* sur une année. Sources : Kurtenbach et al., 2006 (in Cat, 2017)

Dans la mesure où les données Dark Sky sont une combinaison de plusieurs sources de données³⁷ nous pensions trouver un décalage important entre les deux jeux de paramètres. Seuls cinq d'entre eux diffèrent significativement. Il s'agit des : couverture nuageuse (Cloud Cover), intensité des précipitations (Precipitation intensity), température minimum sur 24 heures (Temperature below), température maximum sur 24 heures (Temperature high), visibilité (Visibility, que nous éliminerons par la suite en raison d'un artefact probable de collecte) et rafales de vents (Wind Gust). En revanche, pour les six autres paramètres : le point de rosé (Dew Point), taux d'humidité (Humidity), la pression ramenée au niveau de la mer (Pressure at sea level), la température (Temperature) et la vitesse du vent (Wind Speed), la p-value du test de Wilcoxon est trop élevée pour que l'on puisse conclure à une différence significative entre les jeux de données Météo-France et Dark Sky. Cette proximité de comportement nous a donc incité à poursuivre avec les données Dark Sky.

Ces données Dark Sky ont servi à représenter des profils temporels météorologiques de l'activité des tiques au moment des signalements de piqûres, profils que nous avons comparés avec ceux des témoins collectés sur l'échantillon représentatif de l'ensemble du territoire précédemment décrit. Nous avons représenté, en fonction des dates des signalements, les différents paramètres - des températures aux indice UV - sous la forme d'un semis de points bleus pour les signalements et rouges pour les valeurs témoins. Chaque semi a été lissé avec la fonction « `geom_smooth()`³⁸ » de `ggplot`³⁹ du logiciel R (version 4.0.3), pour obtenir les courbes d'interpolation présentées sur les Fig. 4.5 A à F. Ce mode de représentation en fonction du temps permet également de repérer les différences saisonnières et éventuellement les irrégularités et dérives annuelles. Pour ne pas rester sur une impression graphique qui peut être trompeuse, les différences saisonnières ont été testées et le résultat des tests stocké dans la Table 4.7.

³⁷ <https://darksky.net/attribution> (d.c 17/03/2021)

³⁸ https://ggplot2.tidyverse.org/reference/geom_smooth.html (d.c 31/05/2021)

³⁹ <https://ggplot2.tidyverse.org/index.html> (d.c 31/05/2021)

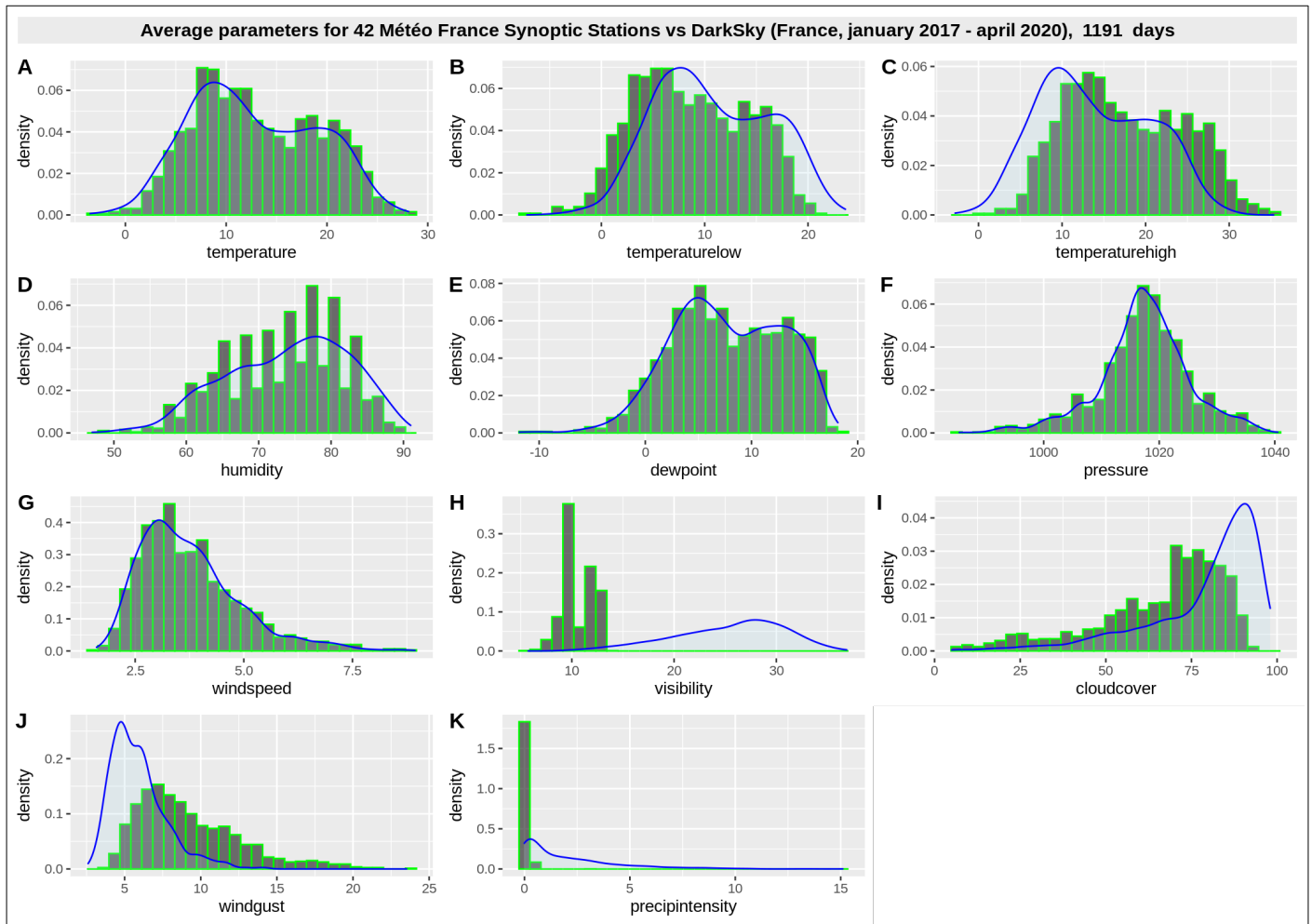


Fig. 4.4: Profils comparés de 11 paramètres météorologiques pour 42 stations synoptiques de Météo-France et leur équivalent Dark Sky (France, Janvier 2017 – Avril 2020, soit 1191 jours). Sources : données météorologiques Météo-France et Dark Sky. **Légende: ligne bleu, Random, Histogramme: Reportings.**

Ces figures permettent déjà, dans un premier temps, de détecter un artefact pour la visibilité moyenne (cf. Fig. 4.5). En effet, cette donnée ne semble pas exploitable. Nous avons déjà constaté un fort décalage sur la Fig. 4.4 **H** entre les données Dark Sky et les données Météo France. Cette fois-ci c'est à l'intérieur même des données Dark Sky où ce décalage est constaté et daté à partir de la mi 2018. Nous n'avons pas trouvé d'explication. Cela correspond peut-être à un mode de collecte ou de codage qui a changé. Nous avons préféré ne pas taire ce genre de problèmes inhérent à la méthodologie utilisée ici qui s'appuie sur des bases de données agrégées par des tiers.

Meteorological variables	Wilcox.test_vs_MF	p.value_vs_MF
Cloud Cover	353918,5	1,59340934647312E-99
Dew Point	494687	0,960842955675304
Humidity	682276	0,107909244652755
Precipitation Intensity	120330	2,22659078436252E-247
Pressure at sea level	654606,5	0,510847673593508
Temperature	736229	0,107833828478165
Visibility	7853,5	0
Wind Gust	1080694	1,97669570230878E-163
Wind Speed	719398,5	0,545039039309652
temperaturehigh	913930	3,27137586792281E-34
temperaturelow	563220	3,31292262415113E-18

Table 4.1: Comparaison des moyennes quotidiennes de 9 paramètres météorologiques pour 42 stations synoptiques de Météo-France et leur équivalent Dark Sky (France, Janvier 2017 – Avril 2020, soit 966 jours). Test de Wilcoxon sur des données appariées.

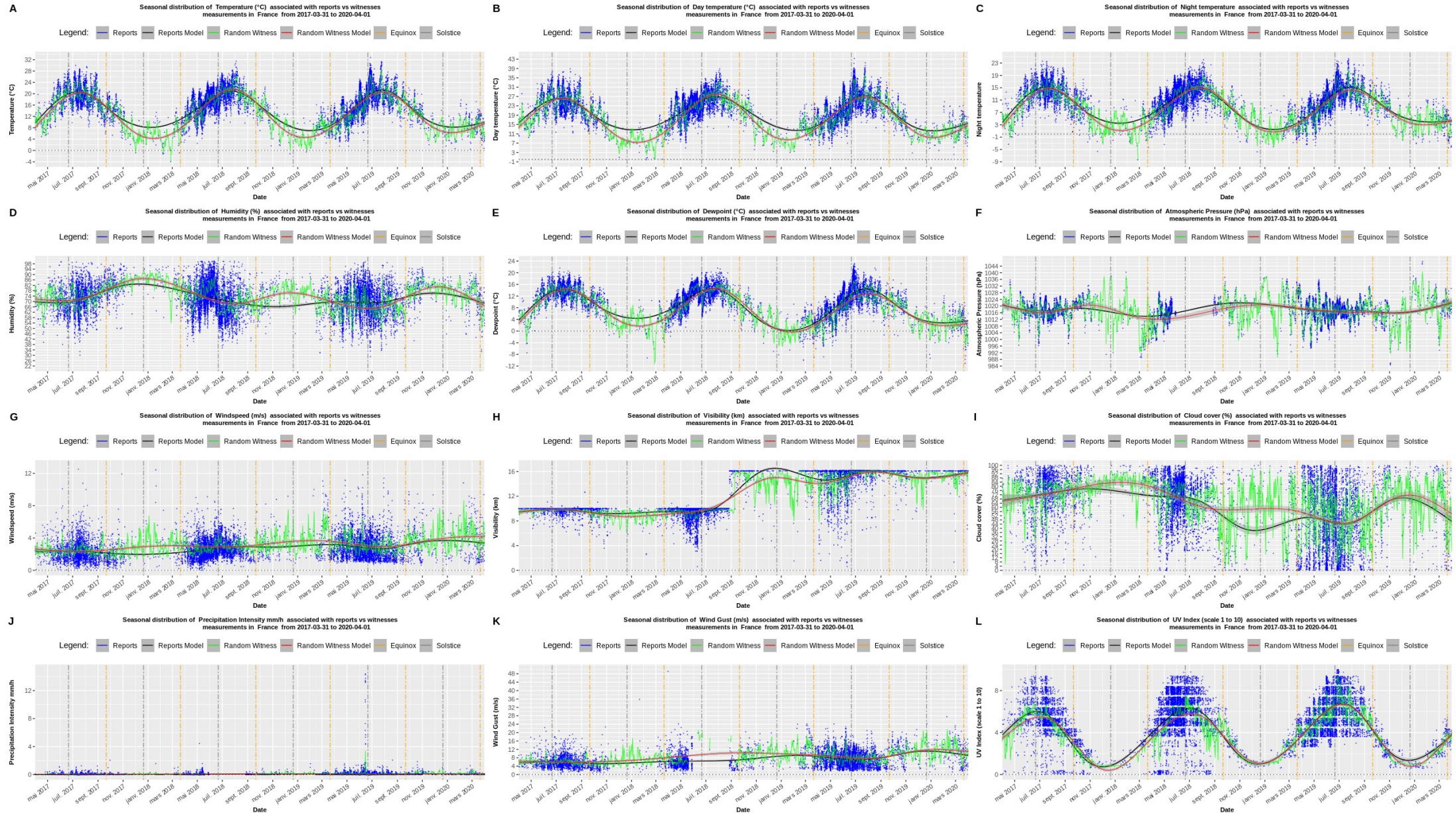


Fig. 4.5: Profils temporels des variables météorologiques associés aux 14 657 lieux et dates de signalements comparés à ceux des mêmes dates mais pour un semis régulier de lieux (France, 31 Mars 2017 – 5 Avril 2020, soit 1100 jours)
Sources : données du programme CiTIQUE, données météo <https://darksky.net/>

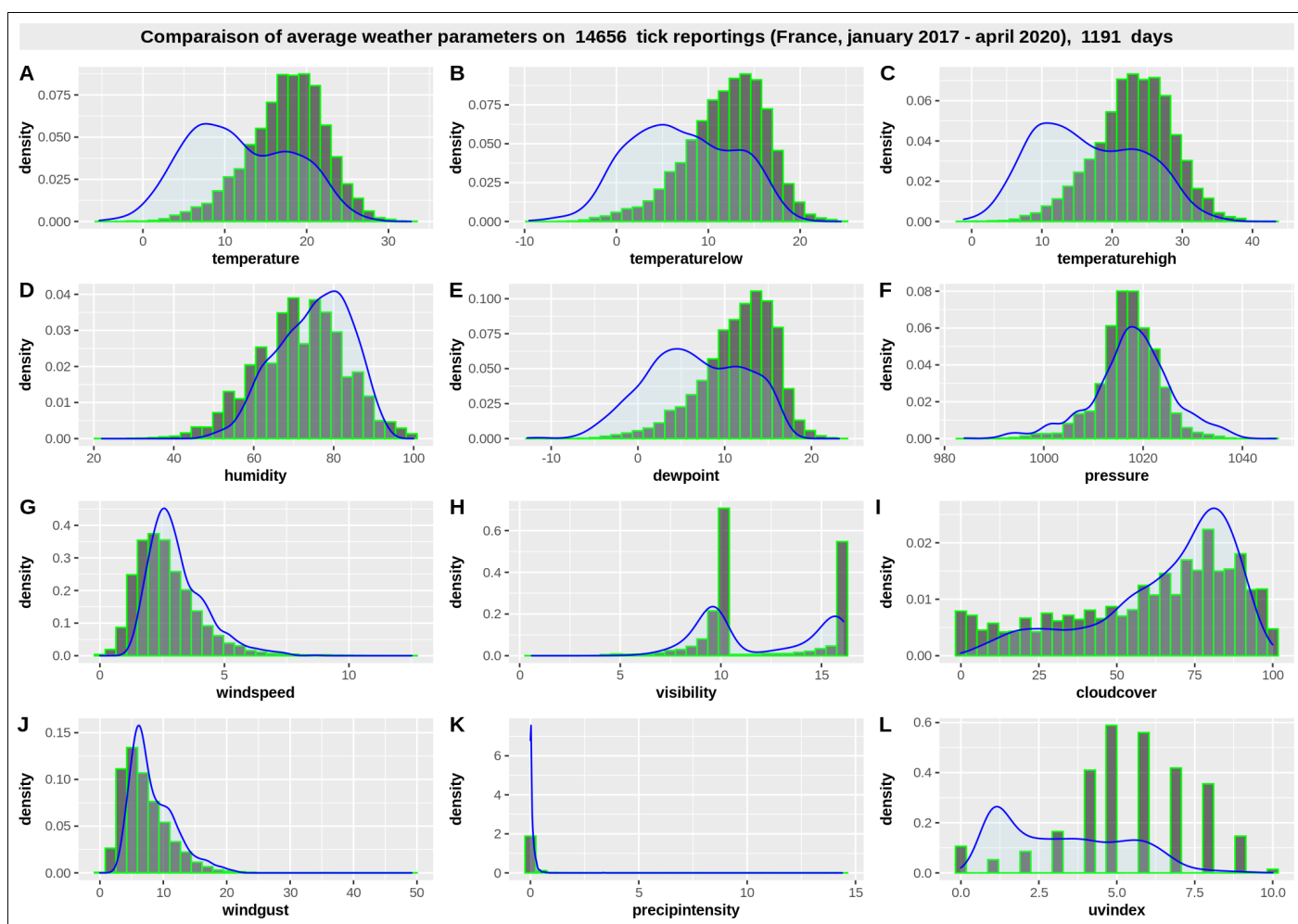


Fig. 4.6: Profils météorologiques associés aux 14657 lieux et dates de signalements comparés à ceux des mêmes dates mais pour un semis régulier de lieux (France, Janvier 2017 - Avril 5th 2020, soit 1191 jours). Sources : données du programme CiTIQUE, données météo <https://darksky.net/>.

Légende: ligne bleu, Random, ligne rouge: Random.

En dehors de cet artefact, les autres profils temporels semblent exploitables pour permettre de repérer, sur les courbes modélisées, les variables météorologiques associées aux signalements qui diffèrent de celles des cas témoins, au moins pour certaines saisons. C'est donc avec cette première approche temporelle que nous allons interroger la caractérisation météorologique des signalements avant de le faire pour l'intensité du paramètre comme représenté sur la mosaïque de figures Fig. 4.6.

Les profils météorologiques présentés sur les figures Fig. 4.6 ont, là aussi, été obtenus en croisant deux séries statistiques collectées les données météorologiques Dark Sky. À la différence des figures de la série n°4.5, les figures de la série n°4.6 présentent le cumul, en valeur relative, des paramètres météorologiques sur les quatre années, ou fraction d'année. Elles permettent d'apprécier si le paramètre météorologique considéré a des chances de s'éloigner du cas témoin, ou non. Quoi qu'il en soit, les différences « signalements vs cas témoins » sont testées et les résultats de ces tests sont présentés dans les tableaux n°4.2 et n°4.3.

Dans le tableau n°4.2, chaque couple de variables « météorologiques » est décliné selon trois indicateurs : le 1^{er} décile, la moyenne et le 9^{ème} décile. La comparaison des moyennes de chaque couple météorologique, signalements et lieux témoin, aurait pu suffire pour pointer les différences, mais il nous a paru intéressant de montrer également l'amplification du décalage selon que l'on s'intéresse aux 10 % des valeurs les plus faibles (1^{er} décile), ou aux 10 % des valeurs les plus élevées (9^{ème} décile) de la variable, car il y a non seulement un décalage dans les courbes, mais bien souvent une asymétrie qui se traduit par un rattrapage d'un pied de courbe sur l'autre (cf. Fig. 4.6) ! Pour compléter les

analyses, nous avons regroupé dans la tableau n°4.3 trois paramètres supplémentaires, le 1^{er} quartile, le 2^{ème} quartile (la médiane) et le 3^{ème} quartile, pour faciliter la lecture.

Meteorological variable	Sample origin	1st decile	CI	Mean	CI	9th decile	CI
temperature	Reporting	11.5 °C	[8.7 °C ; 14 °C]	17.6 °C	[16.3 °C ; 18.9 °C]	23 °C	[21.3 °C ; 24.8 °C]
	Random	3.3 °C	[0.9 °C ; 5.8 °C]	11.7 °C	[9.8 °C ; 13.4 °C]	20.7 °C	[17.8 °C ; 23.6 °C]
temperaturehigh	Reporting	16.2 °C	[13.3 °C ; 19.1 °C]	23.1 °C	[21.6 °C ; 24.7 °C]	29.6 °C	[27.4 °C ; 32 °C]
	Random	6.9 °C	[4.3 °C ; 9.4 °C]	16.4 °C	[14.2 °C ; 18.7 °C]	27 °C	[23.2 °C ; 30.4 °C]
humidity	Reporting	57.6 %	[52.5 % ; 62.8 %]	71.6 %	[68.5 % ; 74.3 %]	85 %	[81 % ; 90.1 %]
	Random	57.3 %	[50 % ; 64 %]	74.7 %	[71.2 % ; 78.3 %]	89.9 %	[85.2 °C ; 94.2 °C]
dewpoint	Reporting	6 °C	[3.3 °C ; 8.6 °C]	11.5 °C	[10.3 °C ; 12.7 °C]	16.2 °C	[15 °C ; 17.3 °C]
	Random	-1.3 °C	[-4.6 °C ; 1.7 °C]	6.5 °C	[4.7 °C ; 8.1 °C]	14 °C	[11.6 °C ; 15.9 °C]
pressure	Reporting	1010.6 hPa	[1005.9 hPa ; 1014.1 hPa]	1017.1 hPa	[1015.2 hPa ; 1019.2 hPa]	1023.6 hPa	[1020.8 hPa ; 1026.8 hPa]
	Random	1006.7 hPa	[1000.4 hPa ; 1011.7 hPa]	1017.6 hPa	[1014.9 hPa ; 1020.2 hPa]	1028 hPa	[1023.8 hPa ; 1032.7 hPa]
windspeed	Reporting	1.4 m/s	[1.1 m/s ; 1.7 m/s]	2.7 m/s	[2.4 m/s ; 3.1 m/s]	4.3 m/s	[3.5 m/s ; 5.2 m/s]
	Random	1.3 m/s	[1 m/s ; 1.7 m/s]	3.2 m/s	[2.7 m/s ; 3.8 m/s]	5.7 m/s	[4.4 m/s ; 7.3 m/s]
visibility	Reporting	9.1 km	[7.9 km ; 9.8 km]	11.9 km	[11 km ; 12.7 km]	16.1 km	[16.1 km ; 16.1 km]
	Random	9 km	[7.3 km ; 9.9 km]	12.96 km	[12 km ; 13.9 km]	16.1 km	[16.1 km ; 16.1 km]
cloudcover	Reporting	18.9 %	[3.6 % ; 38 %]	59.8 %	[51.2 % ; 68.2 %]	90 %	[83 % ; 95.8 %]
	Random	17.5 %	[2 % ; 39 %]	64.2 %	[55.1 % ; 73.2 %]	95.7 %	[90.5 % ; 99 %]
windgust	Reporting	3.3 m/s	[2.3 m/s ; 4.4 m/s]	7 m/s	[5.8 m/s ; 8.3 m/s]	11.7 m/s	[8.9 m/s ; 14.9 m/s]
	Random	3.4 m/s	[2.4 m/s ; 4.6 m/s]	8.9 m/s	[7.4 m/s ; 10.4 m/s]	15.3 m/s	[12.6 m/s ; 18.4 m/s]
uvindex	Reporting	2.9	[1 ; 4]	5.5	[4.8 ; 6.1]	8	[7 ; 9]
	Random	0.8	[0 ; 1]	3.1	[2.5 ; 3.8]	6.2	[5 ; 8]

Table 4.2: Pour la **France** entière, selon le 1^{er} décile, la moyenne et le 9^{ème} décile: Paramètres météorologiques associés aux 14657 lieux et dates de signalements comparés à ceux des mêmes dates mais pour un semis régulier de lieux (France, juillet 2017 – Avril 2020, soit 966 jours). Sources : données du programme CiTIQUE, données météo <https://darksky.net/>

Meteorological variable	Sample origin	1st quartile	CI	median	CI	3rd quartile	CI
temperature	Reporting	14.8 °C	[12.8 °C ; 16.7 °C]	18 °C	[16.5 °C ; 19.5 °C]	20.8 °C	[19.2 °C ; 22.3 °C]
	Random	6.8 °C	[4.6 °C ; 9.2 °C]	11.3 °C	[8.9 °C ; 14.1 °C]	16.5 °C	[13.6 °C ; 19.2 °C]
temperaturehigh	Reporting	19.9 °C	[17.6 °C ; 21.8 °C]	23.6 °C	[21.7 °C ; 25.2 °C]	26.9 °C	[25.1 °C ; 28.6 °C]
	Random	10.4 °C	[8 °C ; 13 °C]	15.6 °C	[12.7 °C ; 19.1 °C]	22.1 °C	[18.3 °C ; 25.5 °C]
humidity	Reporting	64.3 %	[60 % ; 68.3 %]	71.8 %	[68 % ; 75.5 %]	79.1 %	[75 % ; 83 %]
	Random	66.5 %	[60.3 % ; 73 %]	76.4 %	[71.5 % ; 81 %]	84.3 %	[80 °C ; 88 °C]
dewpoint	Reporting	9.3 °C	[7.3 °C ; 10.9 °C]	12.2 °C	[10.7 °C ; 13.5 °C]	14.6 °C	[13.4 °C ; 15.7 °C]
	Random	2.4 °C	[-0.1 °C ; 4.6 °C]	6.7 °C	[4.4 °C ; 9.2 °C]	11 °C	[8.9 °C ; 13.1 °C]
pressure	Reporting	1014.1 hPa	[1011.7 hPa ; 1016.3 hPa]	1017.2 hPa	[1015.2 hPa ; 1019.2 hPa]	1020.5 hPa	[1018.3 hPa ; 1022.7 hPa]
	Random	1012.9 hPa	[1009 hPa ; 1016.2 hPa]	1018.1 hPa	[1015.4 hPa ; 1020.8 hPa]	1022.9 hPa	[1020 hPa ; 1026.1 hPa]
windspeed	Reporting	1.8 m/s	[1.5 m/s ; 2.2 m/s]	2.5 m/s	[2.1 m/s ; 2.8 m/s]	3.3 m/s	[2.8 m/s ; 3.9 m/s]
	Random	1.9 m/s	[1.5 m/s ; 2.3 m/s]	2.8 m/s	[2.2 m/s ; 3.4 m/s]	4.1 m/s	[3.3 m/s ; 5.1 m/s]
visibility	Reporting	9.9 km	[9.5 km ; 10 km]	10.2 km	[10 km ; 13.5 km]	15.5 km	[10.5 km ; 16.1 km]
	Random	10 km	[9.5 km ; 10.6 km]	14.26 km	[10 km ; 16.1 km]	16.1 km	[16.1 km ; 16.1 km]
cloudcover	Reporting	41.2 %	[22.5 % ; 58 %]	66.2 %	[51 % ; 76.5 %]	81.7 %	[73.5 % ; 88 %]
	Random	44.1 %	[24.8 % ; 62.8 %]	72.4 %	[59 % ; 82 %]	88.4 %	[81 % ; 94.5 %]
windgust	Reporting	4.4 m/s	[3.4 m/s ; 5.5 m/s]	6.3 m/s	[5 m/s ; 7.8 m/s]	9 m/s	[7 m/s ; 11.3 m/s]
	Random	5 m/s	[3.7 m/s ; 6.7 m/s]	8.1 m/s	[5.9 m/s ; 10.2 m/s]	12.2 m/s	[9.8 m/s ; 14.5 m/s]
uvindex	Reporting	4.3	[4 ; 5]	5.6	[5 ; 6]	6.9	[6 ; 8]
	Random	1.2	[1 ; 2]	2.8	[2 ; 4]	4.6	[4 ; 6]

Table 4.3: Pour la **France** entière, selon le 1^{er} quartile, le 2^{ème} quartile (la médiane) et le 3^{ème} quartile: Paramètres météorologiques associés aux 14657 lieux et dates de signalements comparés à ceux des mêmes dates mais pour un semis régulier de lieux (France, juillet 2017 – Avril 2020, soit 966 jours). Sources : données du programme CiTIQUE, données météo <https://darksky.net/>

Ces six indicateurs, par couple de variables, ont été obtenus par simulations en échantillonnant avec remise selon la méthode de ré-échantillonnage publiée pour la première fois par B. Efron (Efron, 1979) dite du « bootstrap ». Plusieurs bibliothèques dans R sont disponibles, comme « boot », « bootstrap »..., également la fonction « boot.ci » pour obtenir les intervalles de confiance (Carpenter and Bithelle, 2000). Nous avons toutefois préféré programmer nos itérations à partir des formules proposées par D. Poinot (Poinot, 2005) qui décomposent la procédure.

À titre d'exemple pour la température quotidienne, cinquante températures associées à des dates de signalement sont échantillonnées avec la fonction « sample() » de R sur lesquelles sont calculés le 1^{er} décile qui est stocké dans un tableau de données (dataframe). Cette opération est reproduite mille fois à l'aide d'une boucle pour constituer un tableau de mille 1^{er} déciles. Sur ce millier de 1^{er} déciles, une moyenne est calculée ainsi qu'un intervalle de confiance à 95 % pour encadrer cette moyenne. Cette opération a été faite systématiquement pour les températures associées aux signalements et les températures associées aux lieux témoins. Le même processus est ensuite reproduit par la même méthode du bootstrap en calculant cette fois-ci non plus le 1^{er} décile mais la moyenne de l'échantillon de 50 températures. L'opération est à nouveau reproduite mille fois et sur ces milles moyennes d'échantillon, une moyenne générale et un intervalle de confiance sont calculés sur les températures moyennes des signalements et des lieux témoins. Enfin, la même opération est reproduite sur le 9^{ème} décile, le 1^{er} quartile, le 2^{ème} quartile (la médiane) et le 3^{ème} quartile, sur des échantillons de 50 tirages avec remise, etc. À la suite des températures déjà évoquées, neuf autres variables ont été échantillonnées par bootstrap. Les scripts sous R sont disponibles en libre accès sur la plateforme Git. Les résultats des 1^{er} déciles moyens, des moyennes et des 9^{ème} déciles moyens accompagnés de leur intervalle de confiance respectif sont regroupés dans le tableau n°4.2 des paramètres météorologiques associés aux 14 657 lieux et dates de signalements comparés à ceux des mêmes dates mais pour un semis régulier de lieux (*cf. tab. n°4.2*). Dans le tableau n°4.3, ce sont les résultats des 1^{er} quartiles moyens, des 2^{èmes} quartiles (médianes) moyens et des 3^{èmes} quartiles moyens accompagnés de leur intervalle de confiance respectif.

Meteorological variable	Sample origin	1st decile	CI	Mean	CI	9th decile	CI
temperature	Reporting	12.2 °C	[9.7 °C ; 15.1 °C]	18.2 °C	[16.9 °C ; 19.4 °C]	23.4 °C	[22 °C ; 25.1 °C]
	Random	3.5 °C	[0.8 °C ; 6 °C]	11.7 °C	[9.8 °C ; 13.6 °C]	20.6 °C	[17.7 °C ; 23.4 °C]
temperaturehigh	Reporting	16.6 °C	[14.1 °C ; 19.8 °C]	23.5 °C	[22.1 °C ; 24.8 °C]	29.6 °C	[27.7 °C ; 31.6 °C]
	Random	6.9 °C	[4.2 °C ; 9.6 °C]	16.4 °C	[14 °C ; 18.6 °C]	27.1 °C	[23.5 °C ; 30.6 °C]
humidity	Reporting	56.5 %	[52 % ; 61 %]	69 %	[66.1 % ; 71.6 %]	81.6 %	[77 % ; 86.1 %]
	Random	57.1 %	[49.8 % ; 64 %]	74.7 %	[70.7 % ; 78.3 %]	90 %	[86 °C ; 94.1 °C]
dewpoint	Reporting	6.7 °C	[3.9 °C ; 9 °C]	11.7 °C	[10.6 °C ; 12.7 °C]	16.1 °C	[15.1 °C ; 17.2 °C]
	Random	-1.4 °C	[-4.4 °C ; 1.5 °C]	6.5 °C	[4.8 °C ; 8.2 °C]	14 °C	[11.6 °C ; 16 °C]
pressure	Reporting	1009.5 hPa	[1004.7 hPa ; 1013.2 hPa]	1016.9 hPa	[1014.6 hPa ; 1019.1 hPa]	1023.5 hPa	[1021.2 hPa ; 1026.9 hPa]
	Random	1006.8 hPa	[1000.5 hPa ; 1012 hPa]	1017.7 hPa	[1015 hPa ; 1020.2 hPa]	1027.9 hPa	[1023.9 hPa ; 1033 hPa]
windspeed	Reporting	1.5 m/s	[1.1 m/s ; 1.8 m/s]	2.7 m/s	[2.4 m/s ; 3 m/s]	4 m/s	[3.4 m/s ; 4.6 m/s]
	Random	1.3 m/s	[1 m/s ; 1.7 m/s]	3.2 m/s	[2.7 m/s ; 3.8 m/s]	5.7 m/s	[4.4 m/s ; 7.4 m/s]
visibility	Reporting	8.5 km	[5.9 km ; 9.8 km]	11.7 km	[10.7 km ; 12.6 km]	16.1 km	[16.1 km ; 16.1 km]
	Random	9 km	[7.3 km ; 9.9 km]	12.98 km	[12 km ; 13.9 km]	16.1 km	[16.1 km ; 16.1 km]
cloudcover	Reporting	22 %	[8.4 % ; 40.2 %]	59.4 %	[51.9 % ; 66.1 %]	85 %	[79 % ; 91.8 %]
	Random	17.5 %	[2.3 % ; 39 %]	64.3 %	[55.6 % ; 73.7 %]	95.7 %	[91 % ; 99 %]
windgust	Reporting	3.5 m/s	[2.7 m/s ; 4.4 m/s]	6.8 m/s	[5.8 m/s ; 7.9 m/s]	10.9 m/s	[8.8 m/s ; 13.7 m/s]
	Random	3.4 m/s	[2.4 m/s ; 4.7 m/s]	8.9 m/s	[7.5 m/s ; 10.4 m/s]	15.4 m/s	[12.8 m/s ; 18.4 m/s]
uvindex	Reporting	3.5	[2 ; 4]	5.6	[5.1 ; 6]	7.7	[7 ; 8]
	Random	0.8	[0 ; 1]	3.1	[2.5 ; 3.8]	6.2	[5 ; 7.4]

Table 4.4: En Île-de-France, selon le 1^{er} décile, la moyenne et le 9^{ème} décile: Paramètres météorologiques associés aux 1746 lieux et dates de signalements comparés à ceux des mêmes dates mais pour un semis de lieux aléatoires (juillet 2017 – Avril 2020, soit 966 jours).
Sources : données du programme CiTIQUE, données météo <https://darksky.net/>

Meteorological variable	Sample origin	1st decile	CI	Mean	CI	9th decile	CI
temperature	Reporting	11.4 °C	[8.3 °C ; 14 °C]	17.5 °C	[16.1 °C ; 18.7 °C]	22.7 °C	[21.2 °C ; 24.5 °C]
	Random	3.4 °C	[0.7 °C ; 5.9 °C]	11.6 °C	[9.8 °C ; 13.5 °C]	20.6 °C	[17.6 °C ; 23.4 °C]
temperaturehigh	Reporting	16.1 °C	[12.9 °C ; 19.3 °C]	23.3 °C	[21.7 °C ; 24.7 °C]	29.3 °C	[27.5 °C ; 31.8 °C]
	Random	6.9 °C	[4.2 °C ; 9.6 °C]	16.4 °C	[14.2 °C ; 18.6 °C]	27 °C	[23.5 °C ; 30.7 °C]
humidity	Reporting	57.6 %	[52.7 % ; 62 %]	70.6 %	[67.5 % ; 73.6 %]	83.5 %	[79.1 % ; 88.1 %]
	Random	57.3 %	[50.3 % ; 64 %]	74.8 %	[71 % ; 78.3 %]	90 %	[86 °C ; 94.1 °C]
dewpoint	Reporting	5.7 °C	[2.8 °C ; 8.3 °C]	11.3 °C	[10.1 °C ; 12.4 °C]	16 °C	[15 °C ; 17.2 °C]
	Random	-1.3 °C	[-4.5 °C ; 1.5 °C]	6.4 °C	[4.7 °C ; 8 °C]	14 °C	[11.7 °C ; 16 °C]
pressure	Reporting	1009.3 hPa	[1004.9 hPa ; 1013.2 hPa]	1016.6 hPa	[1014.5 hPa ; 1018.9 hPa]	1023.5 hPa	[1020.3 hPa ; 1027.2 hPa]
	Random	1006.6 hPa	[1000.6 hPa ; 1011.8 hPa]	1017.7 hPa	[1014.9 hPa ; 1020.2 hPa]	1027.9 hPa	[1023.5 hPa ; 1032.8 hPa]
windspeed	Reporting	1.4 m/s	[1.1 m/s ; 1.7 m/s]	2.5 m/s	[2.2 m/s ; 2.8 m/s]	3.8 m/s	[3.1 m/s ; 4.4 m/s]
	Random	1.3 m/s	[1 m/s ; 1.7 m/s]	3.2 m/s	[2.7 m/s ; 3.8 m/s]	5.8 m/s	[4.5 m/s ; 7.3 m/s]
visibility	Reporting	9.3 km	[8.4 km ; 9.8 km]	11.6 km	[10.8 km ; 12.5 km]	16.1 km	[16.1 km ; 16.1 km]
	Random	9 km	[7.3 km ; 9.9 km]	12.98 km	[12 km ; 13.9 km]	16.1 km	[16.1 km ; 16.1 km]
cloudcover	Reporting	18.7 %	[3 % ; 39.5 %]	59.4 %	[50.7 % ; 67.7 %]	89 %	[82 % ; 95.2 %]
	Random	17.3 %	[2.5 % ; 38.9 %]	64.1 %	[55.1 % ; 73.1 %]	95.8 %	[90.9 % ; 99 %]
windgust	Reporting	3.2 m/s	[2.4 m/s ; 4.3 m/s]	6.8 m/s	[5.6 m/s ; 8.1 m/s]	11.2 m/s	[8.4 m/s ; 14.4 m/s]
	Random	3.4 m/s	[2.4 m/s ; 4.7 m/s]	8.9 m/s	[7.3 m/s ; 10.4 m/s]	15.3 m/s	[12.9 m/s ; 18.4 m/s]
uvindex	Reporting	3.3	[1.5 ; 4]	5.5	[4.9 ; 6]	7.8	[7 ; 8]
	Random	0.8	[0 ; 1]	3.1	[2.5 ; 3.7]	6.2	[5 ; 8]

Table 4.5: En **Alsace-Lorraine**, selon le 1er décile, la moyenne et le 9ème décile: Paramètres météorologiques associés aux 2761 lieux et dates de signalements comparés à ceux des mêmes dates mais pour un semis de lieux aléatoires (juillet 2017 - Avril 2020, soit 966 jours).
Sources : données du programme CiTIQUE, données météo <https://darksky.net/>

Meteorological variable	Sample origin	1st decile	CI	Mean	CI	9th decile	CI
temperature	Reporting	10.6 °C	[7.6 °C ; 13.3 °C]	16.9 °C	[15.5 °C ; 18.2 °C]	22.6 °C	[20.8 °C ; 24.4 °C]
	Random	0.5 °C	[-3 °C ; 3.3 °C]	10 °C	[7.9 °C ; 12.2 °C]	20.5 °C	[16.9 °C ; 23.8 °C]
temperaturehigh	Reporting	15.7 °C	[12.1 °C ; 18.9 °C]	23 °C	[21.5 °C ; 24.5 °C]	29.7 °C	[27.5 °C ; 31.9 °C]
	Random	4 °C	[0.5 °C ; 7.2 °C]	15.2 °C	[12.7 °C ; 17.7 °C]	27.3 °C	[23.4 °C ; 30.8 °C]
humidity	Reporting	55.5 %	[49.8 % ; 60.8 %]	71.2 %	[67.7 % ; 74.6 %]	86.6 %	[81.1 % ; 93.1 %]
	Random	50.6 %	[43.9 % ; 56.8 %]	69.5 %	[65.2 % ; 73.8 %]	90.1 %	[82.1 °C ; 98.2 °C]
dewpoint	Reporting	4.6 °C	[1 °C ; 7.4 °C]	10.5 °C	[9.3 °C ; 11.8 °C]	15.4 °C	[14.3 °C ; 16.3 °C]
	Random	-5.5 °C	[-9.3 °C ; -2.4 °C]	3.5 °C	[1.4 °C ; 5.4 °C]	12.7 °C	[10 °C ; 15.1 °C]
pressure	Reporting	1010.9 hPa	[1006.7 hPa ; 1013.6 hPa]	1016.7 hPa	[1014.8 hPa ; 1018.4 hPa]	1022.7 hPa	[1019.7 hPa ; 1025.8 hPa]
	Random	1008.6 hPa	[1002.5 hPa ; 1013.2 hPa]	1018.1 hPa	[1015.8 hPa ; 1020.4 hPa]	1027.3 hPa	[1023.2 hPa ; 1031.7 hPa]
windspeed	Reporting	1.1 m/s	[1 m/s ; 1.3 m/s]	2.2 m/s	[1.9 m/s ; 2.5 m/s]	3.4 m/s	[2.8 m/s ; 4.2 m/s]
	Random	1 m/s	[0.9 m/s ; 1.2 m/s]	2.1 m/s	[1.8 m/s ; 2.4 m/s]	3.5 m/s	[2.7 m/s ; 4.5 m/s]
visibility	Reporting	9.6 km	[8.9 km ; 9.9 km]	11.9 km	[11 km ; 12.7 km]	16.1 km	[16.1 km ; 16.1 km]
	Random	8.4 km	[6.1 km ; 9.7 km]	12.21 km	[11.2 km ; 13.2 km]	16.1 km	[16.1 km ; 16.1 km]
cloudcover	Reporting	14.8 %	[3.2 % ; 27.6 %]	53.9 %	[45 % ; 62.5 %]	86.5 %	[78.8 % ; 93.6 %]
	Random	16.2 %	[3 % ; 32.6 %]	60.1 %	[51.2 % ; 68.8 %]	93.5 %	[86.6 % ; 98 %]
windgust	Reporting	2.5 m/s	[2 m/s ; 3.2 m/s]	5.3 m/s	[4.3 m/s ; 6.3 m/s]	9 m/s	[6.7 m/s ; 12.2 m/s]
	Random	2.4 m/s	[2 m/s ; 2.9 m/s]	5.9 m/s	[4.9 m/s ; 7.1 m/s]	11.1 m/s	[8.2 m/s ; 14.1 m/s]
uvindex	Reporting	2.8	[0 ; 4]	5.9	[5.2 ; 6.6]	8.7	[8 ; 9]
	Random	0.8	[0 ; 1]	3.4	[2.7 ; 4]	6.9	[5.2 ; 8.2]

Table 4.6: En **Rhône-Alpes**, selon le 1er décile, la moyenne et le 9ème décile: Paramètres météorologiques associés aux 1607 lieux et dates de signalements comparés à ceux des mêmes dates mais pour un semis de lieux aléatoires (juillet 2017 - Avril 2020, soit 966 jours).
Sources : données du programme CiTIQUE, données météo <https://darksky.net/>

Meteorological variable	Sample origin	1st decile	CI	Mean	CI	9th decile	CI
temperature	Reporting	5.5 °C	[3.4 °C ; 7.2 °C]	10.5 °C	[9.4 °C ; 11.8 °C]	15.5 °C	[13.8 °C ; 17.4 °C]
	Random	1.8 °C	[-0.4 °C ; 3.8 °C]	7.7 °C	[6.3 °C ; 9 °C]	13.6 °C	[11.3 °C ; 16.2 °C]
temperaturehigh	Reporting	9.6 °C	[7.1 °C ; 11.8 °C]	15.3 °C	[13.9 °C ; 16.7 °C]	21.3 °C	[18.9 °C ; 23.9 °C]
	Random	5.1 °C	[2.7 °C ; 7.4 °C]	11.5 °C	[10 °C ; 13.1 °C]	18.5 °C	[15.6 °C ; 21.8 °C]
humidity	Reporting	59.3 %	[51 % ; 65.8 %]	74.9 %	[71.3 % ; 78.4 %]	88.1 %	[84.1 % ; 92.1 %]
	Random	62.6 %	[52.9 % ; 70.4 %]	78.6 %	[75.1 % ; 81.8 %]	91.7 %	[88 °C ; 95.1 °C]
dewpoint	Reporting	-0.6 °C	[-2.7 °C ; 1.8 °C]	5.3 °C	[4.1 °C ; 6.5 °C]	11 °C	[9.5 °C ; 12.8 °C]
	Random	-3.1 °C	[-6.1 °C ; -0.7 °C]	3.4 °C	[1.9 °C ; 4.9 °C]	9.6 °C	[7.6 °C ; 11.3 °C]
pressure	Reporting	1006.2 hPa	[998.2 hPa ; 1011.8 hPa]	1018.6 hPa	[1015.7 hPa ; 1021.4 hPa]	1029.1 hPa	[1026.2 hPa ; 1032 hPa]
	Random	1004.8 hPa	[998.3 hPa ; 1010.5 hPa]	1018.1 hPa	[1015.2 hPa ; 1021 hPa]	1030.4 hPa	[1026.5 hPa ; 1034.6 hPa]
windspeed	Reporting	1.2 m/s	[0.9 m/s ; 1.5 m/s]	3.1 m/s	[2.6 m/s ; 3.7 m/s]	5.7 m/s	[4.5 m/s ; 7.4 m/s]
	Random	1.3 m/s	[0.9 m/s ; 1.7 m/s]	3.5 m/s	[2.9 m/s ; 4.2 m/s]	6.4 m/s	[5.1 m/s ; 7.9 m/s]
visibility	Reporting	9.1 km	[7.6 km ; 10 km]	13.7 km	[12.8 km ; 14.6 km]	16.1 km	[16.1 km ; 16.1 km]
	Random	8.5 km	[6.4 km ; 9.8 km]	13.22 km	[12.2 km ; 14.2 km]	16.1 km	[16.1 km ; 16.1 km]
cloudcover	Reporting	9.1 %	[0.6 % ; 25.4 %]	58.2 %	[48.7 % ; 67.3 %]	95 %	[90 % ; 99 %]
	Random	22.6 %	[4.5 % ; 44.2 %]	67.9 %	[59.7 % ; 75.7 %]	97.1 %	[93 % ; 99.7 %]
windgust	Reporting	3.1 m/s	[2.3 m/s ; 4 m/s]	8.8 m/s	[7.4 m/s ; 10.3 m/s]	15.3 m/s	[12.6 m/s ; 18.1 m/s]
	Random	3.3 m/s	[2.4 m/s ; 4.8 m/s]	9.7 m/s	[8.2 m/s ; 11.4 m/s]	16.6 m/s	[14.1 m/s ; 19.3 m/s]
uvindex	Reporting	1	[0 ; 2]	2.6	[2.3 ; 3]	4.2	[4 ; 5]
	Random	0.9	[0 ; 1]	1.8	[1.5 ; 2.1]	3.3	[3 ; 4]

Table 4.7: **Caractéristiques hivernales** (octobre à mars), pour la France entière, selon le 1er décile, la moyenne et le 9ème décile des paramètres météorologiques associés aux 1095 lieux et dates de signalements comparés à ceux des mêmes dates mais pour un semis de lieux aléatoires (France, juillet 2017 – Avril 2020, soit 966 jours). Sources : données du programme CiTIQUE, données météo <https://darksky.net/>

5. Discussion:

La présentation des résultats au chapitre précédent montre qu'il y a plusieurs paramètres météorologiques pour lesquels la courbe des signalements est significativement différente de celle qui sert de témoin. Il y a donc une caractérisation météorologique des comportements qui diffère, au moins pour certains paramètres, d'une météorologie témoin caractérisant l'ensemble de la France au même moment. C'est cette caractérisation qui va être discutée maintenant tout en gardant à l'esprit les caractéristiques d'un signalement de piqûres par rapport à l'ensemble des piqûres de tiques, qui restent inconnues (cf. 2.Introduction :). Quels sont les paramètres météorologiques associés aux signalement qui sont significativement plus élevés (ou plus faibles) que ceux qui servent de témoins collectés sur l'ensemble du territoire ? De plus, ne serait-il pas alors possible d'utiliser cette collecte de signalements associée à des données météorologiques, issue d'une participation citoyenne, pour identifier un signal d'alerte exprimant l'entrée dans une saison de risques élevés de piqûres, ou sa sortie ? Serait-il possible d'utiliser, pour un ou plusieurs de ces paramètres, une fraction de courbe ou un des indicateurs (1^{er} décile, 1^{er} quartile, médiane, moyenne, 3^{ème} quartile ou 9^{ème} décile) comme seuil en deçà ou au-delà duquel la situation mérite un « porté à connaissance » du public par un système d'information par affichages, messages, tweets... ? Cette discussion en trois points porte sur l'analyser des 10 paramètres pour lesquels nous avons calculé et présenté les résultats au chapitre précédent.

5.1 Températures moyennes

Quelle est la particularité des températures (variable *temperature*, moyenne des températures sur 24h, de minuit à minuit) associées aux signalement par rapport aux températures témoins ? Comme tracés sur la figure n°4.6A, les signalements (Reporting) se produisent pour des températures nettement plus chaudes que pour les températures témoins (Random). Pour la température quotidienne moyenne, l'écart est de presque 6°C en faveur du signalement (cf. tab. n°4.2). La température moyenne des signalements est de 17.6 °C (intervalle de confiance, IC, à 95 % de [16.3 °C ; 18.9 °C]) alors qu'elle n'est que de 11.7 °C (IC à 95 % de [9.8 °C ; 13.4 °C]) pour les températures

témoins moyennes pour les mêmes périodes (cf. tab. n°4.2). Les citoyens signaleurs se rendent donc sur les lieux où les tiques sont à l'affût par des températures beaucoup plus élevées que les températures des lieux témoins répartis sur toute la métropole. Cela signifie également que pour qu'il y ait un risque acarologique, il ne faut pas seulement que les tiques soient actives et à la recherche d'un hôte, ce qui commence à des températures plus basses, mais que l'enjeu humain soit présent et suffisamment « accessible » (tenue, comportement...) pour que l'interaction transforme l'aléa en risque. D'où la recherche d'un seuil opérationnel de « porté à connaissance » des populations humaines.

Pour le premier décile, l'écart est encore plus significatif avec une différence de 8.2°C. La température moyenne au 1^{er} décile des signalements est de 11.5 °C (IC à 95 % de [8.7 °C ; 14 °C]) alors qu'elle n'est que de 3.3 °C (IC à 95 % de [0.9 °C ; 5.8 °C]) pour les températures témoins moyennes au 1^{er} décile pour les mêmes périodes (cf. tab. n°4.2). Du fait de l'amplitude et de l'asymétrie des données témoin (Random), il y a un rattrapage dans les hautes valeurs de températures de la courbe témoin sur la courbe des signalements. Les intervalles de confiance des températures moyennes du 9^{ème} décile, entre les témoins et les signalements, ne sont plus significativement différentes, elles se chevauchent (IC à 95 % de [21.3 °C ; 24.8 °C] pour les signalements et [17.8 °C ; 23.6 °C] pour les témoins). C'est donc le 1^{er} décile qui pourrait servir de seuil d'alerte. Lorsque l'on atteint 11.5 °C (IC à 95 % de [8.7 °C ; 14 °C]), 10 % des signalements de la période ont été enregistrés, soit environ 1 400 enregistrements de signalements.

Qu'en serait-il si l'on attendait le 1^{er} quartile comme seuil d'alerte ? Cela reviendrait à cumuler 3,3°C de plus, à 14.8°C (IC à 95 % de [12.8 °C ; 16.7 °C]), pour que 25 % des signalements soient cumulés sur la période ! N'oublions pas que les tiques sont considérées comme actives sur des températures beaucoup plus basses, à partir de 5°C pour Campbell (Campbell, 1948), comme cela a été indiqué au chapitre méthodologie.

Force est de constater que dans le cadre d'un « porté à connaissance » futur du public, en dehors des campagnes de signalements initiés par CiTIQUE, il n'existera peut-être plus cette information du 1^{er} décile des signalements. Si c'était le cas à l'avenir, en substitution, nous proposerions de remplacer ce 1^{er} décile des signalements (Reporting) par la température moyenne des données témoin (Random) France entière dont la valeur est très proche et très accessible. En effet, le 1^{er} décile des signalements, ici à 11.5°C pour les signalements France entière, correspond, à quelques décimales près, à la température moyenne des données témoin (Random) France entière 11.7°C (cf. tab. n°4.2), car la différence, Δ , n'est que de 0.2°C. Non seulement cette constatation se retrouve à l'échelle des régions étudiées pour les températures moyennes sur 24h : Île-de-France (1^{er} décile Reporting 12.2°C, Average Random 11.7°C, Δ =0.5°C, cf. tab. n°4.4) ; Alsace-Lorraine (1^{er} décile Reporting 11.4°C, Average Random 11.6°C, Δ =0.2°C, cf. tab. n°4.5) ; Rhône-Alpes (1^{er} décile Reporting 10.6°C, Average Random 10°C, Δ =0.6°C, cf. tab. n°4.6) mais également pour d'autres paramètres météorologiques que nous évoquerons ci-dessous. Donc, retenir le 1^{er} décile des températures moyennes pour les signalements, 11.5°C, ou par extensions, la température moyenne des données témoin (Random) France entière, 11.7°C, permettrait sans doute, dans les zones réputées infestées, de réduire les 90 % de signalements auquel il faut se préparer si l'on ne prend aucune mesure d'information ou d'alerte en direction des usagers avec des températures plus favorables aux loisirs et autres activités en extérieur.

Quelle analyse peut-on faire de cette différence temporelle entre les températures de signalements et les températures témoins ? La figure n°4.5A nous renseigne sur le décalage entre ces deux informations qui dessinent, en points bleus, les températures associées aux signalements - la courbe en noir correspond à leur lissage par régression multiple, comme expliqué au chapitre résultats. La ligne brisée en vert représente les températures témoins et la courbe rouge est leur lissage aux mêmes dates. À des fins d'illustration, pour compléter graphiquement les trois premières années, nous avons utilisé des données du printemps 2017 alors que le programme n'était pas officiellement démarré en plus de celles utilisées pour les tests, la base contenant suffisamment de données. Pour rappel, la date officielle de début du programme CiTIQUE est le 15 juillet 2017.

Étudiées avec une vision pluriannuelle, les courbes de températures présentent de fortes similitudes sur les trois premières années et si décrochage il y a, il ne se produit qu'à la période hivernale, lorsque la courbe des cas témoins, en rouge, plonge nettement sous celle des signalements, en particulier pendant l'hiver 2018. C'est aussi le moment où les signalements collectés sont les moins

denses. Nous avons donc testé la période hivernale, au sens large, qui va d'octobre à mars inclus, soit six mois pour savoir si ce décrochage était significatif et porteur d'information.

La température moyenne « hivernale » des signalements est de 10.5 °C (intervalle de confiance, IC, à 95 % de [9.4 °C ; 11.8 °C]) alors qu'elle n'est que de 7.7 °C (IC à 95 % de [6.3 °C ; 9 °C]) pour les températures témoins moyennes pour les mêmes périodes (cf. tab. n°4.7). Il n'en va pas de même des déciles, qui, quels que soient les indicateurs, voient les intervalles de confiance se chevaucher plus ou moins nettement. Ceci est probablement dû à la faiblesse des effectifs de signalements dans la période hivernale pour un écart qui n'est que de quelques unités. On retrouvera toutes ces indicateurs regroupés dans le tableau n°4.7.

Donc pour compléter ce qui a été précédemment écrit sur l'analyse des profils météorologiques (cf. fig. n°4.6) des températures de signalements sur plus de trois ans, la température moyenne hivernale des signalements, élément marquant des différences interannuelles (cf. Figure n°4.5), est significativement différente de celle des cas témoins. Les citoyens signaleurs en période « hivernale » se rendent, comme nous en faisons l'hypothèse, sur les lieux où les tiques sont à l'affût par des températures en moyenne plus élevées que les températures des cas témoins hivernaux répartis sur toute la métropole. Bien que cette valeur moyenne hivernale des signalements converge vers le seuil critique proposé précédemment (11.5 °C, cf. supra), pour faire du « porté à connaissance » des promeneurs et autres usagers des espaces verts, nous ne cherchons pas à les comparer. Un des objectifs de la détermination d'un seuil d'alerte indiquant la reprise de l'activité acarologique, après une éventuelle pause hivernale, est de fournir un indicateur robuste et facile de manipulation. Une température unique signalant que l'on entre dans une période d'activité des tiques basée sur la température moyenne, dont on a vu qu'elle était très proche de celle du 1^{er} décile des signalements, toutes dates confondues, remplit cette condition. Nous n'irons pas au-delà dans la complexité !

5.2 Températures diurnes maximales

Que nous apporte, dès lors, une analyse des températures diurnes maximales (temperaturehigh, TH, température la plus élevée en degrés Celsius durant le jour⁴⁰) par rapport aux températures moyennes calculée dans le paragraphe précédent ? Sans doute une vision plus proche de la réalité du comportement humain s'exposant à l'aléa tiques, la très grande majorité des signalements ayant eu lieu le jour d'après l'exploitation des motifs de visites contenus dans les enregistrements. Quels sont alors les enseignements tirés de l'étude des TH associées aux signalements par rapport aux TH témoins ? Comme tracés sur la Fig. 4.6 C, les signalements (Reporting) se produisent pour des TH nettement plus chaudes que pour les TH témoins (Random). Pour la TH quotidienne moyenne, l'écart est de 6.7°C en faveur du signalement (cf. tab. n°4.2). La TH moyenne des signalements est de 23.1 °C (intervalle de confiance, IC, à 95 % de [21.6 °C ; 24.7 °C]) alors qu'elle n'est que de 16.4 °C (IC à 95 % de [14.2 °C ; 18.7 °C]) pour les TH témoins moyennes pour les mêmes périodes (cf. tab. n°4.2). Comme cela avait été constaté avec les températures sur 24h, les citoyens signaleurs se rendent donc sur les lieux où les tiques sont à l'affût par des TH beaucoup plus élevées que les TH des lieux témoins répartis sur toute la métropole.

Que nous apporte l'analyse du premier décile des TH par rapport à celui des températures calculées sur 24h ? L'écart est encore plus significatif avec une différence de 9.5°C. La TH moyenne au 1^{er} décile des signalements est de 19.9 °C (IC à 95 % de [17.6 °C ; 21.8 °C]) alors qu'elle n'est que de 10.4 °C (IC à 95 % de [8 °C ; 13 °C]) pour les TH témoins moyennes au 1^{er} décile pour les mêmes périodes (cf. tab. n°4.2). Si ces paramètres sont, comme nous le conseillons, utilisés comme signal d'alerte pour les autorités locales pour déclencher des campagnes d'informations auprès du public, il n'y en a pas une plus pertinente que l'autre. Leur intérêt est fonction des données météorologiques consultées par les édiles. Pour un bulletin avec les données diurnes, les TH seront privilégiées, sinon ce seront les températures moyenne quotidiennes qui serviront d'alerte !

Nous avons testé l'hypothèse qu'un gradient longitudinal des températures moyennes et des TH moyennes se manifesterait d'ouest en est. Il n'en est rien à l'échelle de l'Île-de-France et de l'Alsace-Lorraine, par exemple. En prenant comme référence le 1^{er} décile de ces deux paramètres pour ces deux ensembles régionaux, il n'existe pas de différences significatives. La température moyenne au 1^{er} décile des signalements en Île-de-France est de 12.2 °C (IC à 95 % de [9.7 °C ; 15.1 °C]) alors qu'elle n'est que de 11.4 °C (IC à 95 % de [8.3 °C ; 14 °C]) pour l'Alsace-Lorraine. Les IC se chevauchent

⁴⁰ <https://darksky.net/dev/docs> (d.c 15/04/2020)

nettement. De même, la TH moyenne au 1^{er} décile des signalements en Île-de-France est de 16.6 °C (IC à 95 % de [14.1 °C ; 19.8 °C]) alors qu'elle est de 16.1 °C (IC à 95 % de [12.9 °C ; 19.3 °C]) pour les TH témoins moyennes d'Alsace-Lorraine (cf. tab. n°4.4 et 4.5). Le même test a été effectué avec une autre région plus au sud pour tester si un gradient latitudinal se montrait discriminant. Il fallait choisir une région avec un nombre élevé de signalements. C'est la région Rhône-Alpes (cf. Fig. n°4.2), sans les départements auvergnats – en raison d'un nombre de signalements plus faible sur la période étudiée (en dehors de la région clermontoise, cf. fig. n°4.2) – qui a été retenue. Avec une température moyenne au 1^{er} décile des signalements en Rhône-Alpes de 10.6 °C (IC à 95 % de [7.6 °C ; 13.3 °C], cf. tab. n°4.6), les IC se chevauchent nettement avec ceux d'Île-de-France et d'Alsace-Lorraine cités précédemment. De même, la TH moyenne au 1^{er} décile des signalements en Rhône-Alpes est de 15.7 °C (IC à 95 % de [12.1 °C ; 18.9 °C], cf. tab. n°4.6). Le léger retrait des valeurs de déciles pour la région Rhône-Alpes s'explique par des altitudes plus élevées que dans les autres régions, aussi bien pour les signalements que pour les valeurs témoins. Leur impact n'est toutefois pas suffisant pour rendre significatifs les écarts d'indicateurs entre régions. C'est encore plus net avec la moyenne ou le 9^{ème} décile des températures ou des TH qui confirment un chevauchement encore plus marqué en latitude et en longitude dans les hautes valeurs. Donc, retenir comme seuil d'alerte la température du premier décile des signalements devrait être suffisant pour déclencher le « porter à connaissance » et tenter de freiner les contacts tiques-humains. Comme pour les températures moyennes sur 24h, il est possible de substituer à la TH du 1^{er} décile des signalements (Reporting) celle de la température moyenne des données témoin (Random) France entière dont la valeur est très proche et très accessible. En effet, le 1^{er} décile des signalements, ici à 16.2°C pour les signalements France entière, correspond, à quelques décimales près, à la TH moyenne des données témoin (Random) France entière 16.4°C (cf. tab. n°4.2), car la différence, Δ , n'est que de 0.2°C. Ceci est également valable dans les 3 régions étudiées : Île-de-France (1^{er} décile Reporting 16.6°C, Average Random 16.4°C, $\Delta=0.2^\circ\text{C}$, cf. tab. n°4.4) ; Alsace-Lorraine (1^{er} décile Reporting 16.1°C, Average Random 16.4°C, $\Delta=0.3^\circ\text{C}$, cf. tab. n°4.5) ; Rhône-Alpes (1^{er} décile Reporting 15.7°C, Average Random 15.2°C, $\Delta=0.5^\circ\text{C}$, cf. tab. n°4.6).

Quelle analyse peut-on faire de cette différence temporelle entre les TH de signalements et les TH témoins ? Nous pouvons constater sur la figure n°4.5 **B** les mêmes similitudes sur les trois premières années que sur la figure n°4.5 **A**, relative au température moyenne. Le décrochage ne se produit qu'à la période hivernale, lorsque la courbe des cas témoins, en rouge, plonge nettement sous celle des signalements. Nous avons donc, là encore, testé la période hivernale, au sens large, qui va d'octobre à mars inclus, soit six mois pour savoir si ce décrochage était significatif et porteur d'information.

La TH moyenne « hivernale » des signalements est de 15.3 °C (intervalle de confiance, IC, à 95 % de [13.9 °C ; 16.7 °C]) alors qu'elle n'est que de 11.5 °C (IC à 95 % de [10 °C ; 13.1 °C]) pour les TH témoins moyennes pour les mêmes périodes (cf. tab. n°4.7). Là encore, les déciles voient les intervalles de confiance se chevaucher plus ou moins nettement. Ceci est probablement dû à la faiblesse des effectifs de signalements dans la période hivernale pour un écart qui n'est que de quelques unités. On retrouvera toutes ces indicateurs regroupés dans le tableau n°4.7.

Donc pour compléter ce qui a été précédemment écrit sur l'analyse des profils météorologiques (cf. fig. n°4.6**C**) des TH de signalements sur plus de trois ans, la TH moyenne hivernale des signalements, élément marquant des différences interannuelles (cf. fig. n°4.5**B**), est significativement différente de celle des cas témoins. Les citoyens signaleurs en période « hivernale » se rendent, comme nous en faisons, là encore, l'hypothèse, sur les lieux où les tiques sont à l'affût par des TH en moyenne plus élevées que les TH des cas témoins hivernaux répartis sur toute la métropole. Bien que cette valeur moyenne hivernale des signalements (15.3°C) converge vers le seuil critique proposé précédemment (16.4 °C, cf. supra), pour faire du « porté à connaissance » des promeneurs et autres usagers des espaces verts, nous ne cherchons pas non plus à les comparer. Ce sera à l'élus ou au gestionnaire d'espace vert d'utiliser l'indicateur de température le plus pratique pour lui et de lui appliquer le seuil susmentionné comme déclencheur de seuil d'alerte d'activité acarologique.

5.3 Taux d'humidité

Qu'en est-il du taux d'humidité, l'autre indicateur généralement associé aux températures dans les études écologiques sur le comportement des tiques ? La particularité des taux d'humidité (variable *humidity*, moyenne des taux d'humidité sur 24h, de minuit à minuit), associés aux signalements par rapport aux taux d'humidité témoins, est d'avoir une plage de chevauchement inversée par rapport

aux températures, mais de ne pas être significativement différentes. Comme tracés sur la figure n°4.6D, les signalements (Reporting) se produisent pour des taux d'humidité légèrement plus faibles que pour les taux d'humidité témoins (Random). Cependant, pour le taux d'humidité quotidien moyen, l'écart n'est que de 3.1 % en faveur des taux d'humidité témoins (cf. tab. n°4.2). Le taux d'humidité moyen des témoins est de 74.7 % (intervalle de confiance, IC, à 95 % de [71.2 % ; 78.3 %]) alors qu'il n'est que de 71.6 % (IC à 95 % de [68.5 % ; 74.3 %]) pour le taux d'humidité moyen des signalements pour les mêmes périodes (cf. tab. n°4.2). De prime abord, on pourrait faire l'hypothèse que les citoyens signaleurs préfèrent se rendre dans les lieux de nature, là où les tiques sont à l'affût, dans des conditions d'humidité faible, mais comme cette différence - lieux de signalements vs lieux témoins - n'est pas statistiquement significative sur la période étudiée, nous devons rejeter cette hypothèse. Elle n'est pas confirmée ou reste à démontrer. Elle est même contredite localement, à l'échelle des régions (cf. tab. n°4.4, n°4.5, n°4.6). Cependant, bien que nous ne puissions pas retenir cette variable, car non significative au regard des données en notre possession, celle-ci semble corroborer *in situ*, par la valeur moyenne des taux d'humidité associés aux signalements (environ 72 %), les valeurs lues dans la littérature [environ 80% en milieu naturel (Gray, 1998 ; Boyard et al., 2008)].

Enfin, pouvons-nous mettre en évidence une différence temporelle entre les taux d'humidité des signalements et les taux d'humidité témoins ? Comme nous pouvons le constater sur la figure n°4.5 D, ce sont les différences intra-annuelles qui semblent les plus nettes. Il existe des décrochages à la période hivernale, lorsque la courbe des cas témoins, en rouge, dépasse nettement celle des signalements. Nous avons donc, là encore, testé la période hivernale, au sens large, qui va d'octobre à mars inclus, soit six mois pour savoir si ce décrochage était significatif et porteur d'information.

Le taux d'humidité moyen « hivernal » des signalements est de 74.9 % (intervalle de confiance, IC, à 95 % de [71.3 % ; 78.4 %]) alors qu'il est de 78.6 % (IC à 95 % de [75.1 % ; 81.8 %]) pour le taux d'humidité moyen témoin pour les mêmes périodes (cf. tab. n°4.7). Le chevauchement est probablement dû à la faiblesse des effectifs de signalements dans la période hivernale pour un écart qui n'est que de quelques unités. On retrouvera toutes ces indicateurs regroupés dans le tableau n°4.7. Donc l'hypothèse de signalements par temps plus sec en hivers et un peu plus humide en été n'est pas démontrée sur trois ans de données. Il faudra attendre des séries plus longues pour refaire un contrôle.

5.4 Point de rosé

Combinant la température et l'humidité relative, la température du point de rosé (DP, variable *dewpoint*, température auquel l'air doit être refroidi pour saturer⁴¹) est un indicateur peu présent dans la littérature scientifique sur les tiques, peut-être parce qu'il est un indicateur dérivé ? La forme de la distribution des signalements en lien avec la DP (cf. Fig. n°4.6E) n'est pas sans rappeler celle des températures vues précédemment (cf. Fig. n°4.6A et 4.6B).

Pour la DP, l'écart est de 5°C en faveur du signalement (cf. tab. n°4.2). La DP moyenne des signalements est de 11.5 °C (intervalle de confiance, IC, à 95 % de [10.3 °C ; 12.7 °C]) alors qu'elle n'est que de 6.5 °C (IC à 95 % de [4.7 °C ; 8.1 °C]) pour la DP témoin pour les mêmes périodes (cf. tab. n°4.2). Les citoyens signaleurs se rendent donc sur les lieux où les tiques sont à l'affût par des DP beaucoup plus élevées que les DP des lieux témoins répartis sur toute la métropole. Comme pour les températures, pour le premier décile, l'écart est encore plus significatif entre les DP des signalements et celles des lieux témoins. Avec une différence de 7.3°C., la DP moyenne au 1^{er} décile des signalements est de 6 °C (IC à 95 % de [3.3 °C ; 8.6 °C]) alors qu'elle n'est que de -1.3 °C (IC à 95 % de [-4.6 °C ; 1.7 °C]) pour les DP témoins moyennes au 1^{er} décile pour les mêmes périodes (cf. tab. n°4.2). Du fait de l'amplitude et de l'asymétrie des données témoins (Random), il y a un rattrapage dans les hautes valeurs des DP de la courbe témoin sur la courbe des signalements.

Qu'en est-il de l'hypothèse d'un gradient longitudinal ou latitudinal des DP ? Nous avons d'abord testé le gradient longitudinal des DP moyennes d'ouest en est. Il n'est pas significatif à l'échelle des régions Île-de-France et Alsace-Lorraine. En prenant comme référence le 1^{er} décile de ces deux paramètres pour ces deux ensembles régionaux, il n'existe pas de différences significatives. La DP moyenne au 1^{er} décile des signalements en Île-de-France est de 6.7 °C (IC à 95 % de [3.9 °C ; 9 °C]) alors qu'elle n'est que de 5.7 °C (IC à 95 % de [2.8 °C ; 8.3 °C]) pour l'Alsace-Lorraine. Les IC se chevauchent nettement. Le même test a été effectué avec la région Rhône-Alpes (cf. Fig. n°4.2). Avec une DP

⁴¹ <https://www.britannica.com/science/dew-point-temperature>

moyenne au 1^{er} décile des signalements en Rhône-Alpes de 4.6 °C (IC à 95 % de [1 °C ; 7.4 °C], cf. tab. n°4.6), les IC se chevauchent nettement avec ceux d'Île-de-France et d'Alsace-Lorraine cités précédemment. Le léger retrait des valeurs de déciles pour la région Rhône-Alpes s'explique également par des altitudes plus élevées que dans les autres régions, aussi bien pour les signalements que pour les valeurs témoins. Leur impact n'est toutefois pas suffisant pour rendre significatifs les écarts d'indicateurs entre régions. C'est encore plus net avec la moyenne ou le 9^{ème} décile des DP qui confirment un chevauchement encore plus marqué en latitude et en longitude dans les hautes valeurs.

Donc, retenir comme seuil d'alerte la température du DP du premier décile des signalements devrait être suffisant pour déclencher le « porter à connaissance » et tenter de freiner les contacts tiques-humains. Comme pour les autres températures, vues ci-dessus, il est possible de substituer à la DP du 1^{er} décile des signalements (Reporting) la DP moyenne des données témoin (Random) France entière dont la valeur est très proche. En effet, le 1^{er} décile des signalements, ici à 6°C pour les signalements France entière, correspond, à quelques décimales près, à la **DP** moyenne des données témoin (Random) France entière 6.5°C (cf. tab. n°4.2), car la différence, Δ , n'est que de 0.5°C. Ceci est également valable dans les 3 régions étudiées, avec une légère dérive plus marquée N-S qu'E-W toutefois : Île-de-France (1^{er} décile Reporting 6.7°C, Average Random 6.5°C, $\Delta=0.2^\circ\text{C}$, cf. tab. n°4.4) ; Alsace-Lorraine (1^{er} décile Reporting 5.7°C, Average Random 6.4°C, $\Delta=0.7^\circ\text{C}$, cf. tab. n°4.5) ; Rhône-Alpes (1^{er} décile Reporting 4.6°C, Average Random 3.5°C, $\Delta=1.1^\circ\text{C}$, cf. tab. n°4.6).

Enfin, pouvons-nous mettre en évidence une différence temporelle entre la température du DP des signalements et la température du DP témoin ? Comme nous pouvons le constater sur la figure n°4.5E, à part en 2018, il n'existe pas de décrochages entre la courbe des cas témoins, en rouge, et celle des signalements, en bleu. Comme indiqué par les indicateurs regroupés dans le tableau n°4.7, il n'y a pas d'écart significatif pour la période hivernale.

5.5 Pression atmosphérique

Comme pour le taux d'humidité, la pression atmosphérique (variable *pressure*, moyenne des pressions atmosphériques ramenées au niveau moyen des mers sur 24h, de minuit à minuit), associée aux signalements ne diffère pas significativement de la pression atmosphérique des témoins. Comme tracés sur la figure n°7.5, les signalements (Reporting) se produisent pour des pressions quasi identiques aux pressions des témoins (Random). La pression quotidienne moyenne des témoins est de 1017.6 hPa (intervalle de confiance, IC, à 95 % de [1014.9 hPa ; 1020.2 hPa]) alors qu'elle n'est que de 1017.1 hPa (IC à 95 % de [1015.2 hPa ; 1019.2 hPa]) pour la pression quotidienne moyenne des signalements, pour les mêmes périodes (cf. tab. n°4.2). En l'état actuelle des recherches, les signalements ne font pas remonter des différences de pressions significativement différentes de celles qui sont constatées sur le semi systématique France entière. La pression atmosphérique n'est donc pas un indicateur qui ressort de cette étude comme étant un signal d'alerte efficace pour un objectif de « porté à connaissance » du public.

Enfin, pouvons-nous mettre en évidence une différence temporelle entre la pression atmosphérique des signalements et la pression atmosphérique des cas témoins ? Comme nous pouvons le constater sur la figure n°4.5F, il n'existe pas de décrochages entre la courbe des cas témoins, en rouge, et celle des signalements, en bleu. Comme indiqué par les indicateurs regroupés dans le tableau n°4.7, il n'y a pas d'écart significatif pour la période hivernale.

5.6 Vitesse du vent

Comme pour le taux d'humidité et la pression atmosphérique, la vitesse du vent (variable *windSpeed*, moyenne des vitesses du vent sur 24h, de minuit à minuit en m/s⁴²), associé aux signalements ne diffère pas significativement de la vitesse du vent des témoins. Comme tracés sur la figure n°4.6G, les signalements (Reporting) se produisent pour des vitesses de vent quasi identiques aux vitesses de vent pour les témoins (Random). La vitesse quotidienne moyenne du vent pour les sites témoins est de 3.2 m/s (intervalle de confiance, IC, à 95 % de [2.7 m/s ; 3.8 m/s]) alors qu'elle n'est que de 2.7 m/s (IC à 95 % de [2.4 m/s ; 3.1 m/s]) pour la vitesse quotidienne moyenne des signalements, pour les mêmes périodes (cf. tab. n°4.2). En l'état actuelle des recherches, les données de signalements ne font pas remonter des différences de vitesses anémométriques significativement différentes de celles qui sont constatées sur les témoins France entière. L'hypothèse que les signaleurs s'exposeraient aux piqures

⁴² <https://darksy.net/dev/docs> (d.c 15/04/2020)

de tiques par des vitesses de vent faibles n'est pas validée à l'échelle nationale. Seule la région Alsace-Lorraine laisse entrevoir et uniquement pour son 9^{ème} décile, celui des vitesses de vents les plus élevées, une différence significative entre les vitesses associées au signalement vs les vitesses associées aux témoins, la vitesse quotidienne moyenne du vent pour les sites témoins de la région Alsace-Lorraine est de 5.8 m/s (intervalle de confiance, IC, à 95 % de [4.5 m/s ; 7.3 m/s]) alors qu'elle n'est plus que de 3.8 m/s (IC à 95 % de [3.1 m/s ; 4.4 m/s]) pour la vitesse quotidienne moyenne des signalements, pour les mêmes périodes (cf. tab. n°4.5). Les deux autres régions étudiées ne voient pas d'écart significatif entre les vitesses anémométriques associées aux signalements et celles associées aux témoins. Nous pouvons momentanément en conclure, avec le jeu de données en notre possession, que cet indicateur ne constitue pas un signal d'alerte efficace selon notre objectif de « porté à connaissance » d'un risque acarologique en direction du public. Hubálek et ses collègues n'avaient pas pu établir de corrélation entre l'activité des tiques et la vitesse du vent (*Hubálek et al., 2004*). Nous ne pouvons pas, non plus, établir que certaines vitesses de vent sont plus favorables que d'autres aux signalements.

Enfin, pouvons-nous mettre en évidence une différence temporelle entre la vitesse du vent des signalements et la vitesse du vent des cas témoins ? Comme nous pouvons le constater sur la figure n°4.5G, il existe des décrochages, plutôt hivernaux, entre la courbe des cas témoins, en rouge, et celle des signalements, en bleu. Mais là encore, comme indiqué par les indicateurs regroupés dans le tableau n°4.7, il n'y a pas d'écart significatif pour la période hivernale.

5.7 Visibilité

La visibilité (variable *visibility*) a-t-elle un effet sur les signalements ? Signale-t-on plus des piqûres de tiques par temps clair ? La figure n°4.6 nous avait déjà informé d'une forte différence entre les modes de collecte entre Daksky et Météo-France, nous faisant renoncer à la comparabilité des deux approches. La figure n°4.5 nous révèle un biais dans la collecte à cette échelle plus fine que celle utilisée pour la figure n°4.6. On y voit en effet que le système de déclarations de visibilité favorise un premier seuil autour de 10 km, vers lequel converge les déclarations, puis, ce pic est suivi par un effondrement des déclarations qui lui-même est suivi d'une reprise avec un maximum vers 17 km. Ce comportement étrange nous incite à renoncer à cette variable probablement biaisée par son mode de collecte.

L'hypothèse de signalements plus importants lorsque le ciel est dégagé n'est pas validée. En effet, si les promeneurs ont sans doute tendance à sortir quand le couvert nuageux est faible, il n'en va probablement pas de même des tiques qui vont éviter une exposition longue au plein soleil. Car même si la durée d'exposition a vu son influence démontrée (*Kiewra et al., 2014*), la hausse des températures qui en résulte devient sans doute rapidement un facteur limitant. La variable caractérisant le couvert nuageux (variable *cloudcover*, couvert nuageux estimé, en pourcentages entre 0 et 100) nous révèle que la majorité des signalements se produit lorsque le ciel est partiellement voilé et non lorsqu'il est dégagé (cf. fig. n°4.6H). En effet, la moyenne des signalements se produit pour un couvert de 59.8 % (IC à 95 % de [51.2 % ; 68.2 %]). Pour autant, ce taux de couvert ne diffère pas significativement de celui du jeu témoin (cf. tab. n°4.2) qui présente une moyenne de 64.2 % (IC à 95 % de [55.1 % ; 73.2 %]). De ce fait et en fonction des données de signalement collectées, le taux de couverture nuageuse ne peut pas servir de signal d'alerte pour informer le public d'un risque acarologique particulier.

Enfin, pouvons-nous mettre en évidence une différence temporelle entre la couverture nuageuse des signalements et la couverture nuageuse des cas témoins ? Comme nous pouvons le constater sur la figure n°4.5H, il existe des décrochages, plutôt hivernaux mais absolument pas réguliers et cycliques comme pour les températures par exemple, entre la courbe des cas témoins, en rouge, et celle des signalements, en bleu. Mais là encore, comme indiqué par les indicateurs regroupés dans le tableau n°4.7, il n'y a pas d'écart significatif pour la période hivernale. Nous n'avons pas jugé utile de ne tester que 2019, en l'absence d'une profondeur temporelle plus importante.

5.8 Vitesse des rafales de vent

Plus que la vitesse du vent moyen sur 24 h traitée plus haut, nous avons fait l'hypothèse que les rafales de vent pouvaient avoir un impact important sur les signalements comme : réduire le nombre de sorties ou la capacité des tiques à s'emparer d'un hôte. Nous avons pour cela à notre disposition la variable rafale de vent (WG, variable *windGust*, vitesse de la rafale de vent en m/s. La durée de la

rafales étant enregistrée dans un autre champ, *windGustTime*, non utilisée ici⁴³). Comme on peut le voir sur la figure n°4.6J, si la forme générale est moins ramassée que celle de la vitesse moyenne (cf. Fig. n°4.6G), c'est surtout la forme de la courbe témoin (Random) qui diffère. Cependant, si les valeurs sont globalement plus élevées que pour celles du vent moyen, la WG sur les sites témoins est de 8.9 m/s (intervalle de confiance, IC, à 95 % de [7.4 m/s ; 10.4 m/s]) alors qu'elle n'est que de 7 m/s (IC à 95 % de [5.8 m/s ; 8.3 m/s]) pour la variable vitesse quotidienne moyenne du vent caractérisant les signalements, pour les mêmes périodes (cf. tab. n°4.2), la différence n'est pas significative et l'hypothèse que les signalements se produisent avec des rafales de vent moins fortes que pour les témoins est invalidée. Il n'y a pas de contre-exemple régional, parmi les régions étudiées, qui viendrait valider l'hypothèse de l'impact des rafales sur les signalements. Il n'y a pas non plus de différences latitudinales ou longitudinales significatives.

Enfin, pouvons-nous mettre en évidence une différence temporelle entre la vitesse des rafales de vent des signalements et la vitesse des rafales de vent des cas témoins ? Comme nous pouvons le constater sur la figure n°4.5K, il n'existe pas de réels décrochages entre la courbe des cas témoins, en rouge, et celle des signalements, en bleu. Comme indiqué par les indicateurs regroupés dans le tableau n°4.7, il n'y a pas d'écart significatif pour la période hivernale.

5.9 Intensité du rayonnement ultraviolet

L'hypothèse de signalements plus importants lorsque l'intensité du rayonnement ultraviolet est élevée est une piste de réflexion plus intéressante que celle du couvert nuageux. Nous constatons sur la figure n°4.6L qu'il y a un décalage important entre la distribution des indices UV pour les signalements et pour les sites témoins, ces derniers retournant des valeurs nettement plus faibles. La variable caractérisant l'indice UV (variable *uvindex*⁴⁴, intensité du rayonnement ultraviolet maximale sur 24h) nous révèle que la majorité des signalements se produit lorsque l'indice UV est moyennement à assez élevé alors que, dans le même temps, pour les cas-témoins la valeur est plus faible. En effet, la moyenne des signalements se produit pour un indice UV de 5.5 (IC à 95 % de [4.8 ; 6.1]) alors que celui du jeu témoin (cf. tab. n°4.2) présente une moyenne de 3.1 (IC à 95 % de [2.5 ; 3.8]). Cette différence est à la limite de la significativité pour le 1^{er} décile. En effet, l'indice UV moyen au 1^{er} décile des signalements est de 2.9 (IC à 95 % de [1 ; 4]) alors qu'elle n'est que de 0.8 (IC à 95 % de [0 ; 1]) pour les indices UV témoins moyens au 1^{er} décile pour les mêmes périodes (cf. tab. n°4.2). Du fait de l'amplitude et de l'asymétrie des données témoin (Random), il y a un petit rattrapage dans les hautes valeurs de l'indice UV de la courbe témoin sur la courbe des signalements. Les intervalles de confiance des indices UV moyens du 9^{ème} décile, entre les témoins et les signalements, ne sont plus significativement différents, ils se chevauchent (IC à 95 % de [7 ; 9] pour les signalements et [5 ; 8] pour les témoins).

Il est possible de retrouver ici, sur les indicateurs les plus centraux, moyenne, médiane mais aussi 1^{er} et 3^{ème} quartile, des indices UV pour lesquels la différence entre signalements et données témoins est la plus significative, à l'exception du 3^{ème} quartile qui est à la limite de la significativité pour un IC à 95 %. La médiane des signalements se produit pour un indice UV de 5.6 (IC à 95 % de [5 ; 6]) alors que celui du jeu témoin (cf. tab. n°4.3) présente une médiane de 2.8 (IC à 95 % de [2 ; 4]). Le 1^{er} quartile des signalements se produit pour un indice UV de 4.3 (IC à 95 % de [4 ; 5]) alors que celui du jeu témoin (cf. tab. n°4.3) présente un 1^{er} quartile de 1.2 (IC à 95 % de [1 ; 2]), le 3^{ème} quartile des signalements se produit pour un indice UV de 6.9 (IC à 95 % de [6 ; 8]) alors que celui du jeu témoin (cf. tab. n°4.3) présente un 3^{ème} quartile de 4.6 (IC à 95 % de [4 ; 6]), à la limite de la significativité du fait de l'étalement de la distribution sur les valeurs élevées.

Qu'en est-il des différences longitudinales et latitudinales ? À un niveau plus fin, régionale donc, les 1^{ers} déciles des signalements sont significativement différents de ceux des jeux témoins. En Île-de-France, l'indice UV du 1^{er} décile des signalements est de 3.5 (IC à 95 % de [2 ; 4], tab. n°4.4), alors qu'il est de 0.8 (IC à 95 % de [0 ; 1], tab. n°4.4), pour celui du jeu témoin. En Alsace-Lorraine, l'indice UV du 1^{er} décile des signalements est de 3.3 (IC à 95 % de [1.5 ; 4], tab. n°4.5), alors qu'il est de 0.8 (IC à 95 % de [0 ; 1], tab. n°4.5), pour celui du jeu témoin. Enfin, en Rhône-Alpes, l'indice UV du 1^{er} décile des signalements est de 2.8 (IC à 95 % de [0 ; 4], tab. n°4.6), alors qu'il est de 0.8 (IC à 95 % de [0 ; 1], tab. n°4.6), pour celui du jeu témoin. Si, en dehors de Rhône-Alpes, il y a bien une différence entre les indices UV associés aux signalements et ceux associés au jeu témoin, en raison du

⁴³ <https://darksy.net/dev/docs> (d.c 15/04/2020)

⁴⁴ <https://darksy.net/dev/docs> (d.c 15/04/2020)

recouvrement du 1^{er} décile des indices UV associés aux signalements. Il n'y a donc pas, là non plus, d'effet longitudinal ou latitudinal démontré sur cette variable indice UV.

Pour utiliser cette variable comme signal d'alerte, en l'état actuel des connaissances, le 1^{er} décile calculé sur les signalements n'est pas suffisamment différent de celui calculé sur les témoins pour être significatif, à un niveau national. En revanche, le 1^{er} quartile possède cette qualité. Bien sûr, il ne permet de « déclencher » le porter à connaissance que lorsque l'on atteint 25% des signalements. Il est alors possible de retenir un indice UV de 4.3 (IC à 95 % de [4 ; 5], cf. tab. n°4.3).

Il est possible de s'étonner de la différence de significativité entre signalements par couvert nuageux et par indice UV. Cette différence peut s'expliquer par une saisonnalité des signalements plus importante à « la belle saison » qui correspond, en France, pays d'Europe médiane de l'hémisphère nord, à la période du solstice d'été. C'est à ce moment-là de l'année que l'indice UV est le plus élevé quelles que soient les conditions météo et donc le couvert nuageux. Si les promeneurs ont, sans doute, tendance à sortir quand le couvert nuageux est faible, il n'en va probablement pas de même des tiques qui vont éviter une exposition longue au plein soleil, même si la durée d'exposition a vu son influence démontrée (*Kiewra et al., 2014*), car la hausse des températures qui en résulte devient sans doute rapidement un facteur limitant au fil de la journée. On constate d'ailleurs (cf. Fig. n°4.6I) que le nombre de signalements a tendance à croître par fort couvert nuageux, bien que la significativité n'ait pas pu être démontrée sur notre jeu de données.

Enfin, là encore, nous avons cherché à établir s'il y avait une différence temporelle significative entre les indices UV de signalements et les indices UV des cas témoins ? Nous pouvons constater sur la figure n°4.6L des similitudes par rapport à la figure n°4.6A relative aux températures moyennes. Une représentation cyclique des indices UV en fonction de la saison, faible en hiver et fort en été, existe mais il n'y a pas de réels décrochages saisonniers. La courbe des cas témoins, en rouge, est légèrement sous celle des signalements, en bleu. Nous avons donc, là encore, testé la période hivernale, au sens large, qui va d'octobre à mars inclus, soit six mois pour savoir si ce décrochage était significatif et porteur d'information.

Les indices UV moyens « hivernaux » des signalements sont de 2.6 (intervalle de confiance, IC, à 95 % de [2.3 ; 3]) alors qu'ils ne sont que de 1.8 (IC à 95 % de [1.8 ; 2.1]) pour les indices UV moyens « hivernaux » des cas témoins pour les mêmes périodes (cf. tab. n°4.7). Là encore, les déciles voient les intervalles de confiance se chevaucher plus ou moins nettement. Ceci est probablement dû à la faiblesse des effectifs de signalements dans la période hivernale pour un écart qui n'est que de quelques unités. On retrouvera toutes ces indicateurs regroupés dans le tableau n°4.7. En l'absence de réel décrochage des courbes hivernales nous avons testé les données estivales, au sens large, qui vont d'avril à septembre inclus, soit six mois, pour savoir si ce décrochage était significatif et porteur d'information. Les indices UV moyens « estivaux » des signalements sont de 5.7 (intervalle de confiance, IC, à 95 % de [5.1 ; 6.3]) alors qu'ils ne sont que de 4.9 (IC à 95 % de [4.3 ; 5.5]) pour les indices UV moyens « estivaux » des cas témoins pour les mêmes périodes. Donc, pour l'été, la différence n'est pas significative car il y a un chevauchement entre les intervalles de confiances associés aux signalements et ceux associés aux cas témoins pour la période estivale.

Donc, il existe une différence sur la période qui va du 15 juillet 2017 au 4 avril 2020, car la moyenne des signalements se produit pour un indice UV de 5.5 (IC à 95 % de [4.8 ; 6.1]) alors que celle du jeu témoin (cf. tab. n°4.2) est en moyenne de 3.1 (IC à 95 % de [2.5 ; 3.8]). Celle-ci est également significative sur la période hivernale, mais les jeux de données sont encore un peu restreints pour utiliser les 1^{ers} déciles comme valeur de seuil d'alerte.

6. Conclusion:

Il ressort de l'analyse des résultats discutée précédemment que quatre variables météorologiques caractérisent dans cette étude le risque acarologique. Risque analysé au travers des signalements de piqûres dans le cadre d'une approche par les sciences participatives pendant trois années successives. Ces variables sont significativement différentes d'un jeu de données témoin auquel elles sont confrontées. Il s'agit de la température moyenne sur 24h, de la température la plus élevée sur 24h, du point de rosé, qui intègre une information sur l'humidité, sachant que celle-ci n'est pas significative prise isolément, et dans une moindre mesure l'indice UV. Nous devons toutefois garder à l'esprit que

les résultats obtenus devront être consolidés dans les années à venir en accumulant les données de signalements et la météorologie qui leur est associée pour confirmer leur robustesse.

Ces variables peuvent être utilisées comme signal d'alerte caractérisant la reprise de l'activité acarologique au sortir de la mauvaise saison. Cette activité, en présence d'un enjeu humain, doit se traduire pour les gestionnaires et les autorités publiques par un porté à connaissance du risque de piqûres, donc de transmission de maladies à tiques (non étudiée ici). Ce risque a été matérialisé par les données de signalements traités ici

Parmi ces variables, la moyenne des températures sur 24h fournit, au travers des signalements issus de l'application « Signalement TIQUE », l'indicateur le plus intuitivement utilisable. La température quotidienne moyenne associée aux signalements est de 17.6 °C (intervalle de confiance, IC, à 95 % de [16.3 °C ; 18.9 °C]) alors que celle du jeu témoin est en moyenne de 11.7 °C (IC à 95 % de [9.8 °C ; 13.4 °C]). Cela signifie que pour qu'il y ait un risque acarologique, il ne faut pas seulement que les tiques soient actives et à la recherche d'un hôte, ce qui commence à des températures plus basses, mais que l'enjeu humain soit présent et suffisamment « accessible » (tenue, comportement...) pour que l'interaction transforme l'aléa en risque. Pour utiliser cette variable comme seuil d'alerte, on retiendra le 1^{er} décile des 14 657 températures étudiées, à savoir une température quotidienne moyenne de 11.5 °C (IC à 95 % de [8.7 °C ; 14 °C]) qui indique que 10% des participants ont déjà été piqués. De ce fait, retenir cette valeur de température moyenne comme signal d'alerte c'est mettre sur ses gardes la très grande majorité des promeneurs et utilisateurs de jardins ou de forêts que le risque acarologique est rentré dans sa phase active.

En second lieu, la température maximale est également un bon indicateur du réel démarrage de la saison acarologique. Cette variable est logiquement plus proche du comportement du citoyen signaleur qui a probablement très majoritairement collecté sa ou ses tiques de jour, donc aux heures les moins froides. La température maximale moyenne associée aux signalements est de 23.1 °C (IC à 95 % de [21.6 °C ; 24.7 °C]) alors que celle du jeu témoin est en moyenne de 16.4 °C (IC à 95 % de [14.2 °C ; 18.7 °C]). En retenant le 1^{er} décile des 14 657 températures maximales associées aux signalements, soit 19.9 °C (IC à 95 % de [17.6 °C ; 21.8 °C]), on a, là encore, 90% des signalements qui étaient à venir dans la base de données. Nous n'avons pas pour le moment, en l'absence de concertations avec les élus ou les décideurs, défini quel était l'indicateur le plus parlant pour informer la population.

La troisième variable est encore une température. Celle-ci est particulière dans la mesure où elle intègre une part d'humidité dans son calcul, c'est la température du point de rosée. La température moyenne quotidienne du point de rosé associé aux signalements est de 11.5 °C (IC à 95 % de [10.3 °C ; 12.7 °C]) alors que celle du jeu témoin est en moyenne de 6.5 °C (IC à 95 % de [4.7 °C ; 8.1 °C]). Pour utiliser cette variable comme seuil d'alerte, on retiendra le 1^{er} décile des 14 657 températures quotidienne du point de rosé, à savoir une température moyenne quotidienne du point de rosé calculé sur les signalements de 6 °C (IC à 95 % de [3.3 °C ; 8.6 °C]). Moins intuitive que les deux premières variables, elle peut toutefois également être utilisée comme valeur seuil pour alerter de conditions acarologiques qui interagissent avec les humains. Avec une température de point de rosé à 6°C, 10% des humains participants à ce programme de sciences citoyennes avaient déjà signalé une piqûre.

Enfin, l'indice UV est la dernière variable du jeu de données qui soit un marqueur significatif du risque acarologique. L'indice UV moyen associé aux signalements est de 5.5 (IC à 95 % de [4.8 ; 6.1]) alors que celui du jeu témoin est en moyenne de 3.1 (IC à 95 % de [2.5 ; 3.8]). Pour utiliser cette variable comme signal d'alerte de l'activité acarologique, contrairement aux variables précédentes, il n'est pas possible d'utiliser le 1^{er} décile, celui-ci est à peine significatif. Le premier indicateur exploitable est le 1^{er} quartile. L'indice UV 1^{er} quartile est de 4.3 (IC à 95 % de [4 ; 5]) alors que celui du jeu témoin est de 1.2 (IC à 95 % de [1 ; 2]). Évidemment, il est moins efficace comme seuil d'alerte, car il laisse passer 25% des signalements avant de déclencher le porté à connaissance !

Aucun gradient latitudinal ou longitudinal n'a été testé significatif sur ces variables à l'échelle de la France métropolitaine, ceci entre les régions concentrant le plus de signalement, à savoir, l'Île-de-France, l'Alsace-Lorraine et Rhône-Alpes. Ces valeurs météorologiques n'ont pas encore été testées dans la profondeur temporelle. Elles ont été calculées pour la date du signalement et ne sont pas lissées sur la semaine écoulée ou les 15 jours qui précèdent le signalement. Cela fera l'objet d'une analyse à venir.

7. Bibliographie:

- [1]
Aceves-Bueno E, Adeleye A S, Feraud M, Huang Y, Tao M, Yang Y and Anderson S E 2017 The Accuracy of Citizen Science Data: A Quantitative Review *The Bulletin of the Ecological Society of America* **98** 278-90
- [2]
Aeschlimann A 2021 *Ixodes ricinus*, Linné, 1758 (Ixodoidea ; Ixodidae): Essai préliminaire de synthèse sur la biologie de cette espèce en Suisse
- [3]
Aho A V 1990 CHAPTER 5 - Algorithms for Finding Patterns in Strings *Algorithms and Complexity Handbook of Theoretical Computer Science* ed J Van leeuwen (Amsterdam: Elsevier) pp 255-300
- [4]
Balázs B, Mooney P, Nováková E, Bastin L and Jokar Arsanjani J 2021 Data Quality in Citizen Science *The Science of Citizen Science* ed K Vohland, A Land-Zandstra, L Ceccaroni, R Lemmens, J Perelló, M Ponti, R Samson and K Wagenknecht (Cham: Springer International Publishing) pp 139-57
- [5]
Bonney R, Cooper C B, Dickinson J, Kelling S, Phillips T, Rosenberg K V and Shirk J 2009 Citizen Science: A Developing Tool for Expanding Science Knowledge and Scientific Literacy *BioScience* **59** 977-84
- [6]
Bord S, Druilhet P, Gasqui P, Abrial D and Vourc'h G 2014 Bayesian estimation of abundance based on removal sampling under weak assumption of closed population with catchability depending on environmental conditions. Application to tick abundance *Ecological Modelling* **274** 72-9
- [7]
Bord S, Lebert I., René-Martellet M. F, and Dernas S., Johany F., Bimonte S., Chalvet-Monfray K., Poux V., Cosson JF, Smoreda Z., Vourc'h G. 2019 Intérêt des données de téléphonie mobile et des sciences participatives pour l'estimation et la compréhension du risque de transmission de maladies liées à l'environnement : Application aux maladies transmises par les tiques.
- [8]
Bord S and Agoulon A 2017 Annexe 1 : Méthodes d'échantillonnage des tiques et fiabilité *Tiques et maladies à tiques: Biologie, écologie évolutive, épidémiologie* Didactiques ed N Boulanger and K D McCoy (Marseille: IRD Éditions) pp 279-86
- [9]
Burtis J C, Sullivan P, Levi T, Oggenfuss K, Fahey T J and Ostfeld R S 2016 The impact of temperature and precipitation on blacklegged tick activity and Lyme disease incidence in endemic and emerging regions *Parasit Vectors* **9**
- [10]
Carpenter J and Bithell J 2000 Bootstrap confidence intervals: when, which, what? A practical guide for medical statisticians *Statistics in Medicine* **19** 1141-64
- [11]
Cat J 2017 *Intégrer les effets de la météorologie dans la modélisation de l'activité et de la survie des populations de tiques Ixodes ricinus dans le contexte du changement climatique* phdthesis (Université Clermont Auvergne)
- [12]
Cohn J P 2008 Citizen Science: Can Volunteers Do Real Research? *BioScience* **58** 192-7
- [13]
Cohnstaedt L W, Rochon K, Duehl A J, Anderson J F, Barrera R, Su N-Y, Gerry A C, Obenauer P J, Campbell J F, Lysyk T J and Allan S A 2012 Arthropod Surveillance Programs: Basic Components, Strategies, and Analysis *Ann Entomol Soc Am* **105** 135-49
- [14]
Cosson J-F 2018 Écologie de la maladie de Lyme *Revue Forestière Française* 185-203

- [15]
Daniel M, Malý M, Danielová V, Kříž B and Nuttall P 2015 Abiotic predictors and annual seasonal dynamics of *Ixodes ricinus*, the major disease vector of Central Europe *Parasit Vectors* **8**
- [16]
Daniel M, Zitek K, Danielová V, Kríz B, Valter J and Kott I 2006 Risk assessment and prediction of *Ixodes ricinus* tick questing activity and human tick-borne encephalitis infection in space and time in the Czech Republic *Int J Med Microbiol* **296 Suppl 40** 41–7
- [17]
Dickinson J L, Shirk J, Bonter D, Bonney R, Crain R L, Martin J, Phillips T and Purcell K 2012 The current state of citizen science as a tool for ecological research and public engagement *Frontiers in Ecology and the Environment* **10** 291–7
- [18]
Efron B 1979 Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife *The Annals of Statistics* **7** 1–26
- [19]
Fontenille Didier, Jourdain Frédéric, Léger Elsa, and Perrin Yvon 2013 Note relative à la distribution d'*Ixodes ricinus* en France ainsi qu'aux principaux facteurs susceptibles d'impacter la distribution et l'abondance de l'espèce en France métropolitaine
- [20]
Freifeld C C, Chunara R, Mekaru S R, Chan E H, Kass-Hout T, Iacucci A A and Brownstein J S 2010 Participatory Epidemiology: Use of Mobile Phones for Community-Based Health Reporting *PLOS Medicine* **7** e1000376
- [21]
Garcia-Martí I, Zurita-Milla R, Harms M G and Swart A 2018 Using volunteered observations to map human exposure to ticks *Sci Rep* **8** 15435
- [22]
Gilot B, Bonnefille M, Degeilh B, Beaucournu J-C, Pichot J and Guiguen C 1994 La colonisation des massifs forestiers par *Ixodes ricinus* (linné, 1758) en France: utilisation du chevreuil, *Capreolus capreolus* (l. 1758) comme marqueur biologique *Parasite* **1** 81–6
- [23]
Gilot B and Perez-Eid C 1998 Bio-écologie des tiques induisant les pathologies les plus importantes en France *Médecine et Maladies Infectieuses* **28** 325–34
- [24]
Gilot, Bruno 1985 *Bases biologiques, écologiques et cartographiques pour l'étude des maladies transmises par les tiques (Ixodidae et Argasidae) dans les Alpes françaises et leur avant-pays*. Thèse d'Etat (Université de Grenoble)
- [25]
Gray J S, Kahl O, Lane R S, Levin M L and Tsao J I 2016 Diapause in ticks of the medically important *Ixodes ricinus* species complex *Ticks Tick Borne Dis* **7** 992–1003
- [26]
Grech-Angelini S, Stachurski F, Lancelot R, Boissier J, Allienne J-F, Marco S, Maestrini O and Uilenberg G 2016 Ticks (Acari: Ixodidae) infesting cattle and some other domestic and wild hosts on the French Mediterranean island of Corsica *Parasites & Vectors* **9** 582
- [27]
Haddad H, Moulin B, Manirakiza F, Méha C, Godard V and Mermet S 2015 Web Mapping and Behavior Pattern Extraction Tools to Assess Lyme Disease Risk for Humans in Peri-Urban Forests *Analyzing and Modeling Spatial and Temporal Dynamics of Infectious Diseases* (John Wiley & Sons, Ltd) pp 371–402
- [28]
Hartemink N, van Vliet A, Sprong H, Jacobs F, Garcia-Martí I, Zurita-Milla R and Takken W 2019 Temporal-Spatial Variation in Questing Tick Activity in the Netherlands: The Effect of Climatic and Habitat Factors *Vector-Borne and Zoonotic Diseases* **19** 494–505
- [29]
Hauser G, Rais O, Morán Cadenas F, Gonseth Y, Bouzelboudjen M and 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

- [30] Herrmann C and Gern L 2013 Survival of *Ixodes ricinus* (Acari: Ixodidae) nymphs under cold conditions is negatively influenced by frequent temperature variations *Ticks Tick Borne Dis* **4** 445–51
- [31] Hubálek Z, Halouzka J and Juricová Z 2004 Host-seeking activity of ixodid ticks in relation to weather variables *Journal of vector ecology : journal of the Society for Vector Ecology* **28** 159–65
- [32] Jongejan F, de Jong S, Voskuilen T, van den Heuvel L, Bouman R, Heesen H, Ijzermans C and Berger L 2019 “Tekenscanner”: a novel smartphone application for companion animal owners and veterinarians to engage in tick and tick-borne pathogen surveillance in the Netherlands *Parasites & Vectors* **12** 116
- [33] Kahl O 1991 Water management of the non-parasitic phases of *Ixodes ricinus* in the course of its postembryonic development. *Modern acarology* 371–4
- [34] Kiewra D, Kryza M and Szymanowski M 2014 Influence of selected meteorological variables on the questing activity of *Ixodes ricinus* ticks in Lower Silesia, SW Poland *Journal of Vector Ecology* **39** 138–45
- [35] Kilpatrick A M, Dobson A D M, Levi T, Salkeld D J, Swei A, Ginsberg H S, Kjemtrup A, Padgett K A, Jensen P M, Fish D, Ogden N H and Diuk-Wasser M A 2017 Lyme disease ecology in a changing world: consensus, uncertainty and critical gaps for improving control *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **372** 20160117
- [36] Krawczyk A, van Duijvendijk G, Swart A, Heylen D, Jaarsma R, Jacobs F, Fonville M, Sprong H and Takken W 2020 Effect of rodent density on tick and tick-borne pathogen populations: consequences for infectious disease risk. *Parasit Vectors* **13** 34–34
- [37] Kriz B, Daniel M, Benes C and Maly M 2014 The role of game (wild boar and roe deer) in the spread of tick-borne encephalitis in the Czech Republic *Vector Borne Zoonotic Dis.* **14** 801–7
- [38] Kurtenbach K, Hanincová K, Tsao J I, Margos G, Fish D and Ogden N H 2006 Fundamental processes in the evolutionary ecology of Lyme borreliosis *Nat. Rev. Microbiol.* **4** 660–9
- [39] L’Hostis M 1994 *Babesia divergens* en France : épidémiologie descriptive et analytique thesis (Montpellier 1)
- [40] Laaksonen M, Sajanti E, Sormunen J J, Penttinen R, Hänninen J, Ruohomäki K, Sääksjärvi I, Vesterinen E J, Vuorinen I, Hytönen J and Klemola T 2017 Crowdsourcing-based nationwide tick collection reveals the distribution of *Ixodes ricinus* and *I. persulcatus* and associated pathogens in Finland *Emerg Microbes Infect* **6** e31
- [41] Lees A D and Milne A 1951 The seasonal and diurnal activities of individual sheep ticks (*Ixodes ricinus* L.) *Parasitology* **41** 189–208
- [42] Léger E, Vourc’h G, Vial L, Chevillon C and McCoy K D 2013 Changing distributions of ticks: causes and consequences *Exp Appl Acarol* **59** 219–44
- [43] Lejal E, Marsot M, Chalvet-Monfray K, Cosson J-F, Moutailler S, Vayssier-Taussat M and Pollet T 2019 A three-years assessment of *Ixodes ricinus*-borne pathogens in a French peri-urban forest *Parasites & Vectors* **12** 551
- [44] Lohr B, Müller I, Mai M, Norris D E, Schöffski O and Hunfeld K-P 2015 Epidemiology and cost of hospital care for Lyme borreliosis in Germany: Lessons from a health care utilization database analysis *Ticks and Tick-borne Diseases* **6** 56–62

- [45]
Macleod J 1932 The Bionomics of *Ixodes ricinus* L., The “Sheep Tick” of Scotland *Parasitology* **24** 382–400
- [46]
Marsot M, Hoch T, Perez G, Léger E, Verheyden H, Richomme C and Vourc’h G 2017 8. Modification et modélisation du risque de maladies transmises par les tiques *Tiques et maladies à tiques: Biologie, écologie évolutive, épidémiologie* Didactiques ed N Boulanger and K D McCoy (Marseille: IRD Éditions) pp 239–58
- [47]
Medlock J M, Hansford K M, Bormane A, Derdakova M, Estrada-Peña A, George J-C, Golovljova I, Jaenson T G T, 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, Hendrickx G, Zeller H and Van Bortel W 2013 Driving forces for changes in geographical distribution of *Ixodes ricinus* ticks in Europe *Parasit Vectors* **6** 1
- [48]
Mulder S, van Vliet A J H, Bron W A, Gassner F and Takken W 2013 High Risk of Tick Bites in Dutch Gardens *Vector-Borne and Zoonotic Diseases* **13** 865–71
- [49]
Ogden N H, Lindsay L R, Beauchamp G, Charron D, Maarouf A, O’Callaghan C J, Waltner-Toews D and Barker I K 2004 Investigation of relationships between temperature and developmental rates of tick *Ixodes scapularis* (Acari: Ixodidae) in the laboratory and field *J Med Entomol* **41** 622–33
- [50]
Ostfeld R S and Brunner J L 2015 Climate change and *Ixodes* tick-borne diseases of humans *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* **370**
- [51]
Paul R E L, Cote M, Le Naour E and Bonnet S I 2016 Environmental factors influencing tick densities over seven years in a French suburban forest *Parasites Vectors* **9** 309
- [52]
Pérez-Eid C 2007 *Les tiques: identification, biologie, importance médicale et vétérinaire* (Lavoisier)
- [53]
Perret J L, Guigoz E, Rais O and Gern L 2000 Influence of saturation deficit and temperature on *Ixodes ricinus* tick questing activity in a Lyme borreliosis-endemic area (Switzerland) *Parasitol Res* **86** 554–7
- [54]
Poinot D 2005 R pour les statophobes 36
- [55]
Ranard B L, Ha Y P, Meisel Z F, Asch D A, Hill S S, Becker L B, Seymour A K and Merchant R M 2014 Crowdsourcing--harnessing the masses to advance health and medicine, a systematic review *J Gen Intern Med* **29** 187–203
- [56]
Ratnieks F L W, Schrell F, Sheppard R C, Brown E, Bristow O E and Garbuzov M 2016 Data reliability in citizen science: learning curve and the effects of training method, volunteer background and experience on identification accuracy of insects visiting ivy flowers *Methods in Ecology and Evolution* **7** 1226–35
- [57]
Rizzoli A, Silaghi C, Obiegala A, Rudolf I, Hubálek Z, Földvári G, Plantard O, Vayssier-Taussat M, Bonnet S, Špitalská E and Kazimírová M 2014 *Ixodes ricinus* and Its Transmitted Pathogens in Urban and Peri-Urban Areas in Europe: New Hazards and Relevance for Public Health *Front. Public Health* **2**
- [58]
Salomon J and Vayssier-Taussat M 2016 Plan maladie de Lyme: les tiques s’en réjouissent *The Conversation*
- [59]
Silvertown J 2009 A new dawn for citizen science *Trends in Ecology & Evolution* **24** 467–71
- [60]

- Steere A C, Malawista S E, Hardin J A, Ruddy S, Askenase W and Andiman W A 1977 Erythema chronicum migrans and Lyme arthritis. The enlarging clinical spectrum *Ann. Intern. Med.* **86** 685–98 [61]
- Steere A C, Strle F, Wormser G P, Hu L T, Branda J A, Hovius J W R, Li X and Mead P S 2016 Lyme borreliosis *Nat Rev Dis Primers* **2** 1–19 [62]
- Stone B L, Tourand Y and Brissette C A 2017 Brave New Worlds: The Expanding Universe of Lyme Disease *Vector-Borne and Zoonotic Diseases* **17** 619–29 [63]
- van den Wijngaard C C, Hofhuis A, Wong A, Harms M G, de Wit G A, Lugnér A K, Suijkerbuijk A W M, Mangen M-J J and van Pelt W 2017 The cost of Lyme borreliosis *Eur J Public Health* **27** 538–47 [64]
- Vayssier-Taussat M, Cosson J F, Degeilh B, Eloit M, Fontanet A, Moutailler S, Raoult D, Sellal E, Ungeheuer M-N and Zylbermann P 2015 How a multidisciplinary ‘One Health’ approach can combat the tick-borne pathogen threat in Europe *Future Microbiology* **10** 809–18 [65]
- Vayssier-Taussat M, Kazimirova M, Hubalek Z, Hornok S, Farkas R, Cosson J-F, Bonnet S, Vourch G, Gasqui P, Mihalca A D, Plantard O, Silaghi C, Cutler S and Rizzoli A 2015 Emerging horizons for tick-borne pathogens: from the ‘one pathogen-one disease’ vision to the pathobiome paradigm *Future Microbiology* **10** 2033–43 [66]
- Wang Wei J, Lee B P Y-H and Bing Wen L 2016 Citizen Science and the Urban Ecology of Birds and Butterflies — A Systematic Review ed S Goffredo *PLoS ONE* **11** e0156425 [67]
- Ward S E and Brown R D 2004 A framework for incorporating the prevention of Lyme disease transmission into the landscape planning and design process *Landscape and Urban Planning* **66** 91–106 [68]
- Zeman P, Benes C and Markvart K 2015 Increasing Residential Proximity of Lyme Borreliosis Cases to High-Risk Habitats: A Retrospective Study in Central Bohemia, the Czech Republic, 1987–2010 *EcoHealth* **12** 519–22

8. Remerciements

Les auteurs remercient la Maison des Sciences de l’Homme Paris-Nord (MSHPN) pour son soutien financier et logistique.

9. Conflits d’intérêt

Les auteurs déclarent qu'ils n'ont aucun conflit d'intérêt d'ordre financier concurrent, aucun intérêt concurrent lié à ce travail et aucun conflit d'intérêt connu associé à cette publication.

The authors declare that they have no competing financial interests, no competing interests related to this work and no known conflicts of interest associated with this publication.