# La température quotidienne moyenne comme indicateur du risque acarologique ? Sciences participatives et bases de données météorologiques pour connaître et décrire la distribution spatiotemporelle des piqûres de tiques sur les humains en France métropolitaine entre 2017 et 2020.

### Average daily temperature as an indicator of acarological risk? Participatory sciences and meteorological databases to know and describe the spatiotemporal distribution of tick bites on humans in mainland France between 2017 and 2020.

# Résumé

Dans le cadre d’un programme de sciences participatives de l’INRAe, CiTIQUE, 22 000 cas géolocalisés de piqûres de tiques sur des humains ont été collectés entre juillet 2017 et avril 2020. Ces signalements de piqûres ont été croisés avec les conditions météorologiques (issues de Météo-France et Dark Sky) qui régnaient au lieu et à la date de chacune des piqûres signalées. Notre objectif était de retenir une ou des variables météorologiques susceptibles de fournir aux élus et responsables d’espace de nature des indicateurs objectifs de « porter à connaissance » à destination du public d’une période de risque acarologique.

La température quotidienne moyenne est le meilleur indicateur. Mesurée lors des signalements, elle est significativement plus élevée de presque 6°C que celle du jeu de données témoin (mesure sur des semis de points aléatoires distribués sur le territoire métropolitain). Celle des signalements est de 17.6 °C alors qu’elle n’est que de 11.7 °C pour les températures témoins moyennes. Pour les décideurs les plus averses au risque acarologique, le seuil d’alerte pourrait être déclenché dès le 2ème centile des signalements associé à des températures d’environ 8 °C, soit dès la fin février-début mars. Pour les décideurs acceptant une prise de risque acarologique plus importante, une valeur basée sur le 1er décile retiendrait un seuil d’entrée à 11.5 °C, soit mi-avril. La température du point de rosé pourrait également être un marqueur significatif du risque acarologique, mais elle est plus complexe et moins accessible. Les températures associées aux signalements permettent d’aller au-delà de la seule activité des tiques à la recherche d’un hôte. Elles intègrent l’enjeu humain lorsque celui-ci est présent et suffisamment « accessible » (tenue, comportement…) pour que l’interaction transforme l’aléa en risque.

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

# Abstract

As part of an INRAe participatory science program, CiTIQUE, 22,000 geolocated cases of tick bites on humans were collected between July 2017 and April 2020. These bite reports were cross-referenced with the weather conditions (from Météo-France and Dark Sky) prevailing at the location and date of each reported bite. Our aim was to select one or more meteorological variables likely to provide elected representatives and nature area managers with objective indicators of "notification" to the public of a period of acarological risk.

Average daily temperature is the best indicator. Measured during reports, it is significantly higher by almost 6°C than that of the control data set (measured on randomly selected points distributed throughout mainland France). The average temperature of the alerts is 17.6°C, compared with 11.7°C for the average control temperatures. For decision-makers most averse to mite risk, the alert threshold could be triggered at the 2nd percentile of reports, associated with temperatures of around 8°C, i.e. as early as late February/early March. For decision-makers willing to accept a higher acarological risk, a value based on the 1st decile would set the threshold at 11.5°C, i.e. mid-April. Dew point temperature could also be a significant marker of mite risk, but it is more complex and less accessible. Temperatures associated with reports allow us to go beyond the mere activity of ticks in search of a host. They integrate the human factor when it is present and sufficiently "accessible" (dress, behavior...) for the interaction to transform the hazard into a risk.

Key words: Data Analysis, Environment, Spatial Epidemiology, Data mining, Tick-borne disease, Climate conditions, Citizen Science.

# 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, et/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 des 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, 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 densité humaine et de l’attractivité 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).

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 conditions 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 écosystèmes fréquentés. De plus, dans le cas de la BL qui n’est pas une maladie à déclaration obligatoire en France, et malgré la présence de réseaux de médecins volontaires, comme ceux du réseau « Sentinelles »[[1]](#footnote-2), 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 « porter à connaissance », il est quasi impossible à l’heure actuelle d’analyser les déterminants paysagers et climatiques qui pourraient favoriser la prolifération des tiques et donc des piqûres, première étape vers une BL ou une autre maladie transmise par les tiques, si celles-ci sont infectées. Pour progresser dans la connaissance des espaces et des conditions de morsures, donc des contaminations potentielles, 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 Natuurkalender[[2]](#footnote-3) et Tekenradar[[3]](#footnote-4). 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 parcimonie 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 « porter à connaissance » à partir de signaux climatiques avant-coureurs concernant les espaces les plus favorables à l’interaction tiques-humains, ceux où se produisent les morsures. L’exposition aux tiques et à leurs morsures et les maladies qui en découlent sont le résultat d’une combinaison complexe de facteurs écologiques et comportementales humaines. En quelques années elles sont devenues un problème important en santé publique et 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 se combinent 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 CiTIQUE[[4]](#footnote-5), initié par l’INRAe (l'Institut national de recherche pour l’agriculture, l’alimentation et l’environnement), la DGS (direction générale de la santé) et l’Anses (Agence nationale de sécurité sanitaire de l’alimentation, de l’environnement et du travail), lancé le 17 juillet 2017[[5]](#footnote-6) 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 TIQUE[[6]](#footnote-7) ». 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. Cependant, quelques références commencent à être consultables dans la littérature scientifique (Bord et al., 2019). Une des toutes premières publications, concernant une application pour animaux de compagnie, essentiellement les chiens, a été proposée en 2018 aux Pays-Bas (Jongejan et al., 2019) à l’intention des vétérinaires.

Dans notre étude, 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, environ 1 400 tiques piqueuses furent analysées afin d’étudier la distribution géographique en France des agents pathogènes qu’elles contenaient[[7]](#footnote-8). Ce n’est pas cet aspect qui sera présenté ici, mais celui de la participation citoyenne aux signalements, et surtout de l’enrichissement de ces données par de la donnée météorologique. Le but étant d’améliorer la compréhension des conditions météorologiques avant et pendant les 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, 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 métropolitaine[[8]](#footnote-9). Si les conditions de températures, de précipitations, d’hygrométrie, etc. des signalements s’écartent significativement des conditions climatiques générales constatées sur l’ensemble du territoire au même moment à l’aide d’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 « porter 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, au travers de l’interaction tique-humain, en France métropolitaine, et de fournir un repère à base de paramètres météorologiques qui conditionnerait nos promenades dans les espaces de nature en vue des changement climatiques constatés ou annoncés.

# Méthodologie

Les données qui ont servi à cette étude sont issues d’actes volontaires de citoyens qui ont décidé de contribuer au programme de science participative CiTIQUE. 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. Nous ne sommes pas exactement sur les données protocolées des sciences expérimentales obtenues en laboratoire. La carte des signalements (cf. Carte 1) en est un bon exemple. Elle n’indique pas où se trouvent les concentrations, ou les absences de concentrations, de tiques à l’affût mais où se trouvaient des lieux d’interactions tiques-humains par des personnes informées et souhaitant signaler une piqûre. Ceci présentant, bien-sûr, un biais relatif par rapport aux signalements potentiels. Un grand nombre de signalements dans un secteur donné 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 écarts de population peut 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 appréhender. Conscients 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.

Carte 1 : Répartition des signalements de piqûres de tiques sur les humains (France, Janvier 2017 – Avril 2020, soit 1191 jours)

**carte\_1\_repartition\_signalements\_piqures\_tiques\_humains\_2017\_2020\_print\_fr.png**

Sources : données du programme CiTIQUE, fond OpenStreetMap project

## 2.1 Activité, biologie des tiques et information climatique dans la littérature

Les principaux déterminants climatiques associés à l’activité des tiques décrits 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 déterminants 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.

## 2.2. 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 VBORNET[[9]](#footnote-10) et de l’EFSA[[10]](#footnote-11) permet de considérer que peu de parties du territoire métropolitain français échappent à cette tique dure (Fontenille et al., 2013, p.3). Cette synthèse opérée par Fontenille 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 (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 dont il s’agit dans cet article. Composante élaborée par 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. Elles proviennent du distributeur et agrégateur de données climatiques historiques Darksky.net[[11]](#footnote-12) ainsi que de Météo-France, et non pas de capteurs disséminés à hauteur des tiques dans les sous-bois, les parcs ou les jardins. Elles viennent qualifier les données issues des signalements envoyés par les « collecteurs » et fournies par l’application « Signalement TIQUE[[12]](#footnote-13) », que ce soit via un smartphone ou un ordinateur, fixe ou portable (cf. infra).

Les données de signalements du lieu et date de piqûre 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 géoréférencée) ; le sexe du répondant et son âge ; le nombre de tiques collectées ; une estimation de la précision du lieu et de la date ; un descriptif du lieu (décrit en : forêt, jardin privé, parc urbain, prairie, zone agricole cultivée ou autre à préciser) ; l’activité qui était pratiquée par le signalant au moment du contact (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 CiTIQUE[[13]](#footnote-14).

## 2.3. Collecte des données climatiques historiques de Dark Sky et Météo-France

### 2.3.1. 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 période 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. Le tableau (cf. tab. n°1) présente le nombre de signalements bruts, prétraités et nettoyés, puis finaux et qualifiés prêts à l’analyse :

Tableau 1 : Nombre des tiques signalées et conservées en fonction de l’étape du traitement informatique

Source : données du programme CiTIQUE

Après avoir éliminé les localités hors France métropolitaine et uniformisé les dates au format « ISO 8601 »[[14]](#footnote-15), un relevé météorologique est associé à chaque date de signalements. La description des conditions météorologiques relevées le jour de la piqûre est faite par interrogation du silo de donnée climatique Dark Sky avec leur interface (API)[[15]](#footnote-16). Le déclarant ayant fourni uniquement la date de morsure, l’interrogation récupère une valeur journalière interpolée entre les stations météo les plus proches sur vingt-quatre heures[[16]](#footnote-17). 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 relative (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). La liste complète est disponible sur le site relatif à l’API[[17]](#footnote-18) de Dark Sky et de Météo-France. Deux documents récapitulatifs et explicatifs sont également disponibles sur le dépôt en ligne du projet[[18]](#footnote-19)[. 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 est utilisé ici pour calculer la température moyenne du jour du signalement.](#sdfootnote6sym)

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 Git[[19]](#footnote-20).

### 2.3.2. Comparaison des sources de données météorologiques

Pour comparer les conditions climatiques caractérisant les signalements de piqûres et les conditions contextuelles 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 tourna 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 nous avons testé la pertinence des données par rapport aux données de référence, à savoir, les 42 stations synoptiques (cf. Carte 2) en libre accès issues des 554 stations métropolitaines du réseau Radome[[20]](#footnote-21) de Météo-France.

Les deux jeux de données ont été uniformisés (Hilami et al., 2022) et limités aux dates de l’étude, soit 1 191 dates. 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 telles : 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, logiciel R, version 4.0.3]. Les résultats des tests sont regroupés dans le tableau 2 et présentées au chapitre des résultats.

Carte 2 : Répartition des 42 stations synoptiques de Météo-France et du maillage systématique pour extraire la donnée climatique de Dark Sky

**carte\_2\_repartition\_stations\_meteo\_print\_fr.png**

Sources : données Météo France et Dark Sky, fond OpenStreetMap project

Dans cette étude, la base météorologique Dark Sky est donc utilisée pour, d’une part, enrichir les signalements et, d’autre part, pour constituer un jeu de données témoin « France entière » permettant de tester si les conditions climatiques de signalements diffèrent significativement des conditions climatiques générales, encore qualifiées de « témoin ». L’objectif étant de vérifier si les signalements s’effectuent dans un contexte climatique spécifique ou identique aux conditions climatiques 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. Carte 2). À chacun des 700 points de la maille une extraction pour les 1 191 journées de la période d’étude a été réalisée, soit 833 700 échantillons. Ce deuxième jeu de données constitue l’échantillon climatique témoin auquel est comparé celui qualifiant les signalements (cf. chap. 3 Résultats).

## 2.4. Échantillonnage des signalements et des données météorologiques

Pour permettre les comparaisons entre la météo des signalements et celle des cas témoins, nous avons échantillonné les mêmes indicateurs (valeurs centrales ou fonctions de répartition d’une distribution) pour chaque variable. Ces indicateurs (centiles, déciles, quartiles, médiane, moyenne), par couple de variables (reporting vs random ou signalements vs témoins), ont été obtenus par simulations en échantillonnant avec remise selon la méthode de rééchantillonnage 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. Poinsot (Poinsot, 2005) qui décomposent la procédure.

À titre d’exemple pour la température quotidienne, cinquante températures associées à des dates de signalement sont échantillonnés avec la fonction « sample() » de R sur lesquelles sont calculés le 1er 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 1ers déciles. Sur ce millier de 1ers 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 1er 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 9ème décile, les quartiles, les centiles… 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[[21]](#footnote-22). Les résultats des 1er déciles moyens, des moyennes et des 9ème déciles moyens accompagnés de leur intervalle de confiance respectif sont regroupés dans le tableau n°3 des paramètres climatiques 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°3). Dans le tableau n°4, ce sont les résultats des 1ers quartiles moyens, des 2èmes quartiles (médianes) moyens et des 3èmes quartiles moyens accompagnés de leur intervalle de confiance respectif et dans le tableau n°5 et n°6, quelques-uns des centiles des deux paramètres les plus significatifs statistiquement.

La comparaison des paramètres de chaque couple, 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 (1er décile), ou aux 10 % des valeurs les plus élevées (9ème décile) de la variable, par exemple. Des figures reprenant ces paramètres sont également présentées pour visualiser l’écart ou l’absence d’écart entre les signalements et les témoins pour chaque variable. On peut non seulement visualiser le décalage entre la courbe des témoins et celles des signalements, mais également une asymétrie du décalage qui explique pourquoi l’écart au 1er décile, par exemple pour les températures, est significatif et ne l’est plus au 9ème décile (cf. fig. n°5A) qu’il est difficile de percevoir à la lecture d’un intervalle de confiance.

Nous devons toutefois, pour les résultats présentés maintenant, rappeler qu’ils sont les prémisses de séries plus longues (la collecte se poursuit via Signalement TIQUE) 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.

# Résultats

## 3.1 Signalements et bases de données météorologiques

### 3.1.1 Répartition des signalements sur la période d’étude

La première série de résultats présentée 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, peu après le début du 1er confinement.

Figure 1 : Répartition temporelle des signalements (France, Janvier 2017 – Avril 2020, soit 1191 jours)

**fig\_1\_repartition\_temporelle\_signalements\_print\_fr.png**

Sources : données du programme CiTIQUE

Le diagramme en barres reprenant l’ensemble des signalements sur les humains est présenté sur la figure 1. Il matérialise la répartition pluriannuelle des signalements de mi 2017 à début 2020. Les pics et les creux de signalements rappellent ceux de l’activité biologique des tiques (cf. fig. n°2). Il semble toutefois beaucoup plus abrupt et centré sur l’été que la seule activité des tiques présentée sur la figure 2. Cette question sera abordée au chapitre des discussions.

Figure 2 : Profil-type de l’activité d’I. ricinus sur une année.

**fig\_2\_Profil\_type\_activitee\_Ix\_ricinus\_un\_an.png**

Sources : Kurtenbach et al., 2006 (in Cat, 2017)

### 3.1.2 Météo-France vs Dark Sky

Cette deuxième série de résultats concernent les données météorologiques dans leur ensemble. En premier lieu, comme nous n’avions pas accès aux données issues des 554 stations du réseau Radome de Météo-France, nous avons sélectionné les variables Dark Sky qui ne différaient pas significativement de celles issues des 42 stations synoptiques de Météo-France. En second lieu, à partir des données Dark Sky issues de cette sélection, nous avons procédé à des comparaisons entre les données associées aux jeux témoins et celles associées aux signalements.

La significativité des différences entre les variables climatiques issues des données Météo-France et celles issues de Dark Sky a été testée à l’aide du test de Wilkinson sur des données appariées (logiciel R, version 4.0.3). L’absence de différences est démontrée pour la moitié des paramètres communs aux deux bases de données (cf. tab. n°2 et fig. n°3).

Tableau 2 : Test de Wilkinson sur des données appariées pour tester la significativité de l’écart entre 42 stations synoptiques Météo-France (MF) et leur équivalent Dark Sky (DS) sur les moyennes quotidiennes de 11 paramètres climatiques (France, Janvier 2017 – Avril 2020, soit 966 jours).

\*\* : différence significative

Sources : Météo France et Dark Sky, Wilcox.test dans le programme R version 4.0.3

Dans la mesure où les données Dark Sky sont une combinaison de plusieurs sources de données[[22]](#footnote-23) nous pensions observer un décalage important entre les deux jeux de paramètres. Seuls six d’entre eux diffèrent significativement (cf. tab. n°2). Il s’agit des : couverture nuageuse (Cloud Cover), intensité des précipitations (Precipitation intensity), température minimum sur 24 heures (Temperature low), température maximum sur 24 heures (Temperature high), visibilité (Visibility) et rafales de vents (Wind Gust). Ces six paramètres ne seront pas conservés dans la suite des analyses et discussions.

En revanche, pour les cinq autres paramètres : le point de rosé (Dew Point), le 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 Wilkinson est trop élevée pour que l’on puisse conclure à une différence significative entre les jeux de données Météo-France et Dark Sky. Ils sont donc conservés pour évaluer leur pertinence dans le cadre du « porter à connaissance » pour sensibiliser ou prévenir d’un risque acarologique.

Figure 3 : Profils comparés de 11 paramètres climatiques pour 42 stations synoptiques de Météo-France et leur équivalent Dark Sky (France, Janvier 2017 – Avril 2020, soit 1191 jours).

**fig\_3\_profils\_compares\_11\_param\_clim\_42\_stations\_synoptiques\_Meteo-France\_vs\_dsk\_print\_fr.png**

Sources : données climatiques Météo-France et Dark Sky.

Légende : **courbe bleue** - semis régulier Dark Sky ; **diagramme en barres vert** - stations synoptiques Météo France.

La lecture des graphiques présentés sur la figure 3 « donne à voir » le résultat des tests. Il y a une bonne superposition de la courbe bleue (données Dark Sky) sur le diagramme en barres vert (Météo-France) pour les graphes :3A (temperature) ; 3D (humidity) ; 3E (dewpoint) ; 3F (pressure) et 3G (windspeed). Variables pour lesquelles les tests de Wilkinson n’indiquent pas de différences significatives entre les données Dark Sky et Météo-France (cf. tab. n°2). La superposition est moins bonne, avec un léger ou fort décalage de la courbe bleue par rapport au diagramme en barres vert pour les autres variables : 3B (temperaturelow) ; 3C (temperaturehigh) ; 3H (visibility) ; 3I (cloudcover) ; 3J (windgust) ; et 3K (precipintensity). Variables pour lesquelles les tests de Wilkinson indiquent des différences significatives entre les données Dark Sky et Météo-France (cf. tab. n°2).

## 3.2 Caractérisation climatique des signalements

Les données Dark Sky sur la figure 4 ont servi à représenter les profils météorologiques au moment des signalements de piqûres. Profils que nous avons comparés avec ceux des jeux-témoins collectés sur l’échantillon représentatif de l’ensemble du territoire. Nous avons représenté, en fonction des dates des signalements, les différents paramètres - des températures aux vitesses du vent – sous la forme d’un semis de points bleus (lissé en noir) pour les signalements et la courbe verte (lissée en rouge) pour les valeurs témoins (cf. fig. n°4). Chaque semi a été lissé avec la fonction « geom\_smooth()[[23]](#footnote-24) » de ggplot[[24]](#footnote-25) du logiciel R (version 4.0.3), pour obtenir les courbes d’interpolation présentées sur les Figures 4 A à E.

Figure 4 : 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)

**fig\_4\_profils\_temporels\_variables\_meteo\_associes\_aux\_lieux\_dates\_signalements\_compares\_aux\_semis\_reguliers\_print\_fr.png**

Sources : données du programme CiTIQUE, données Dark Sky

C’est cette interpolation qui permet de repérer le décalage entre les paramètres météorologiques des signalements (courbes noires) et ceux des données témoins (courbe rouges) pour chaque variable. C’est l’amplitude du signal entre l’été et l’hiver combinée au découplage des deux courbes pour la température (fig. 4A) et le point de rosé (fig. 4C) qui facilite le repérage des variables susceptibles d’être les indicateurs recherchés dans le cadre du « porter à connaissance » pour sensibiliser ou prévenir d’un risque acarologique. Cette approche visuelle qui permet d’identifier les paramètres répondant à notre objectif et de rejeter ceux qui, de par le manque d’amplitude ou de découplage entre les courbes (cf. fig. 4B, 4E, 4F) ne peuvent être retenus, va être complétée par des tests statistiques et détaillée ci-après.

Une autre approche visuelle, de sélection de variables pertinentes pour notre « porter à connaissance », est proposée avec la figure 5. Là encore, les graphiques présentés ont servi à visualiser les décalages entre les données météorologiques associées aux jeux témoins, diagramme en barres vert, et celles associées aux signalements, courbe bleue.

Figure 5 : Profils météorologiques associés aux 14 657 lieux et dates de signalements comparés à ceux des mêmes dates mais pour un semis régulier de lieux (France, Janvier 2017 – 5 Avril 2020, soit 1191 jours).

**fig\_5\_profils\_meteorologiques\_associes\_aux\_lieux\_dates\_signalements\_compares\_aux\_semis\_regulier\_des\_lieux\_print\_fr.png**

Sources : données du programme CiTIQUE, données Dark Sky

Légende : **courbe bleue** - semis régulier (random) Dark Sky ; **histogramme vert** – météo associée aux signalements (reporting).

Contrairement à la figure 4, où la saisonnalité des décalages est perceptible - le temps est en abscisse, et l’unité en ordonnée - sur la figure 5, où l’unité de la variable est en abscisse et la fréquence en ordonnée, cette saisonnalité disparaît au profit d’une information sur le décalage vers les plus ou en moins fortes valeurs des signalements par rapport au jeu témoin ! Pour les températures (cf. fig. n°5A), les signalements (diagramme en barres vert) sont décalés vers les fortes valeurs par rapport au jeu témoin (courbe bleue). De même pour le point de rosé (cf. fig. n°5C). Signifiant que les participants signalent à des températures plus élevées que le jeux témoin. En revanche pour l’humidité (cf. fig. n°5B), la pression (cf. fig. n°5D) et la vitesse du vent (cf. fig. n°5E), le décalage est faible ou inexistant. Éventuellement, les participants signalent pour des valeurs plus faibles que le jeux témoin. Cette impression visuelle est-elle corroborée par les résultats des tests statistiques ?

### 3.2.1 Températures moyennes

Tableau 3 : Valeur des 1er décile, moyenne et 9ème décile des paramètres climatiques associés aux 14 657 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 Dark Sky

Tableau 4 : Valeur des 1er quartile, 2ème quartile (médiane) et 3ème quartile des paramètres climatiques associés aux 14 657 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 Dark Sky

Tableau 5 : Valeurs des centiles 1, 2 et 3 pour les températures moyennes associées aux 14 657 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 Dark Sky

Tableau 6 : Valeurs des centiles 4, 5 et 6 pour les points de rosé associés aux 14 657 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 Dark Sky

Quelle est la particularité des températures (variable « temperature », moyenne des températures sur 24h, de minuit à minuit) associées aux signalements par rapport aux températures témoins ? Comme tracés sur la figure n°5 (cf. fig. n° 5A), les signalements (Reporting) se produisent pour des températures nettement plus chaudes que pour les températures témoins (Random). Pour la moyenne des températures quotidiennes moyennes, l’écart est de presque 6°C en faveur du signalement (Mean, cf. tab. n°3). La moyenne des températures moyennes 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 la moyenne des températures témoins moyennes pour les mêmes périodes.

Avec un écart à peine supérieur, 6.7 °C en faveur du signalement (median, cf. tab. n°4), la médiane des températures moyennes des signalements est de 18 °C (intervalle de confiance, IC, à 95 % de [16.5 °C ; 19.5 °C]) alors qu’elle n’est que de 11.3 °C (IC à 95 % de [8.9 °C ; 14.1 °C]) pour la médiane des températures témoins moyennes pour les mêmes périodes. Moyenne et médiane sont pratiquement superposées.

Pour le premier décile, l’écart est encore plus significatif avec une différence de 8.2°C. La température moyenne au 1er 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 1er décile pour les mêmes périodes (cf. tab. n°3). 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 (cf. fig. 5A). Les intervalles de confiance des températures moyennes du 9ème décile, entre les témoins et les signalements, ne sont plus significativement différents, ils 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). De toutes façons, si c’était un décile qui devait être utilisé pour faire le « porter à connaissance » vers le public, ce serait le premier, celui qui voit les 10 premiers p.100 de signalements liés à la remontée des températures, signe de la reprise des interactions entre tiques et humains.

La fonction de répartition en centiles permet d’affiner le seuil limite entre températures de signalements significativement différentes ou non d’un tirage aléatoire. La température moyenne au 1er centile des signalements est de 6.6 °C (IC à 95 % de [1.72 °C ; 10.5 °C]) alors qu’elle n’est que de -1.7 °C (IC à 95 % de [-7.0 °C ; 2.5 °C]) pour les températures témoins moyennes au 1er centile pour les mêmes périodes (cf. tab. n°5). Bien que cette différence soit de 8.3 °C., les intervalles de confiance qui encadrent ces températures moyennes du 1er centile, entre les témoins et les signalements, se chevauchent. Elles ne sont pas significativement différentes pour le 1er centile.

En revanche, pour le 2ème centile, l’écart est significatif. Avec une différence de 8.1 °C, la température moyenne au 2ème centile des signalements est de 7.7 °C (IC à 95 % de [3.9 °C ; 11.3 °C]) alors qu’elle n’est que de -0.4 °C (IC à 95 % de [-4.8 °C ; 3.4 °C]) pour les températures témoins moyennes au 2ème centile pour les mêmes périodes (cf. tab. n°5). Nous constatons que, cette fois-ci, les intervalles de confiance des températures moyennes du 2ème centile, entre les témoins et les signalements, sont significativement différents, ils ne se chevauchent plus.

### 3.2.2 Taux d’humidité

Comme vu sur le graphe de la figure 5 (cf. fig. n° 5B), les signalements (Reporting) se produisent pour des taux d’humidité à peine légèrement plus faibles que pour les taux d’humidité témoins (Random). Le taux d’humidité quotidien moyen présente un écart de 3.1 % en faveur des taux d’humidité témoins (Mean, cf. tab. n°3). 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°3). L’écart n’est pas significatif, les intervalles de confiance se chevauchent. Au vu des données dont nous disposions, le taux d’humidité n’est donc pas un bon indicateur de « porter à connaissance » du risque acarologique.

### 3.2.3 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 saturer[[25]](#footnote-26)) montre un écart de 5°C en faveur du signalement (Mean, cf. tab. n°3). 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°3). 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 (cf. fig. n° 5C). 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 1er 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 1er décile pour les mêmes périodes (cf. tab. n°3). Comme pour les températures, 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.

Là aussi, la fonction de répartition en centiles permet d’affiner le seuil limite entre températures de points de rosé de signalements significativement différentes ou non d’un tirage aléatoire. Contrairement aux températures moyennes, il faut atteindre le 5ème centile pour avoir un écart significatif (cf. tab. n°6). La température de points de rosé moyenne au 5ème centile des signalements est de 4.1 °C (IC à 95 % de [0 °C ; 7.2 °C]) alors qu’elle n’est que de -3.6 °C (IC à 95 % de [-7.6 °C ; -0.3 °C]) pour les températures de points de rosé témoins moyennes pour les mêmes périodes (cf. tab. n°6). Les intervalles de confiance des températures de points de rosé moyennes du 5ème centile, entre les témoins et les signalements, sont significativement différents, ils ne se chevauchent plus.

### 3.2.4 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 5 (cf. fig. n° 5D), 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°3). Au vu des données dont nous disposions, la pression atmosphérique n’est donc pas un bon indicateur de porter à connaissance du risque acarologique.

### 3.2.5 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/s[[26]](#footnote-27)), associé aux signalements ne diffère pas significativement de la vitesse du vent des témoins. Comme tracés sur la figure n°5 (cf. fig. n° 5E), 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°3). Au vu des données dont nous disposions, la vitesse du vent n’est donc pas un bon indicateur de porter à connaissance du risque acarologique.

# Discussion

## 4.0 Répartition des signalements sur la période d’étude

La variabilité interannuelle de l’activité et l’abondance des tiques sont bien documentées à des échelles fines de collecte et sur des durées longues (Paul et al., 2016). Si les conditions climatiques, 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). Le climat 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. Cependant, la répartition interannuelle des signalements étudiée de mi 2017 à début 2020, présentée sur la figure 1, en plus de ce qui vient d’être décrit, matérialise l’interaction avec les humains. Le moment où l’aléa tique a rencontré l’enjeu humain pour le transformer en risque acarologique. Nous savons que cette connaissance de l’interaction est partielle car elle repose sur la connaissance du programme de sciences citoyennes CiTIQUE, ainsi que la volonté d’y participer[[27]](#footnote-28). Ceci explique que les figures 1 et 2, bien que de formes très proches, ne puissent pas être parfaitement identiques.

De tous ces paramètres (biologiques, abiotiques, humain), le climat est un des plus faciles à appréhender sur de larges territoires grâce aux bases de données. Parmi les cinq paramètres dont nous avons présentés les résultats, quels sont ceux qui seront les plus efficaces dans le cadre de notre objectif de « porter à connaissance » ?

## 4.1 Températures moyennes

Comme vu à la section 3.1 pour les résultats des températures moyennes des signalements, les citoyens signaleurs se rendent donc sur les lieux où les tiques sont à l’affut par des températures majoritairement plus élevées que les températures des lieux témoins métropolitains. Cela signifie que, pour qu’il y ait un aléa acarologique, il faut que les tiques soient actives et à la recherche d’un hôte, ce qui commence à des températures plus basses, mais aussi que l’enjeu humain soit présent et suffisamment « accessible » (tenue, comportement…) pour que l’interaction transforme l’aléa en risque.

En quoi le premier décile serait-il plus pertinent que la moyenne, la médiane, le premier quartile, voire le deuxième centile comme valeur seuil pour effectuer le « porter à connaissance » ? Cette dernière proposition recoupe les valeurs de températures quotidiennes moyennes évoquées à la section 2.1 pour initier une activité notable des tiques Ixodes ricinus (entre 5 et 7 °C, Campbell, 1948, Hauser et al., 2018). Il aurait une certaine légitimité pour ouvrir la « saison acarologique » !

Le choix d’un seuil d’alerte relève de l’acceptation d’une prise de risque. Soit on met un seuil très bas car on a une « aversion au risque » (risk aversion), soit on accepte une prise de risque plus importante (risk taking), pour garder une certaine exceptionnalité au « porter à connaissance » et on met le seuil plus haut. Ces approches sont particulièrement développées dans les disciplines qui pratiquent l’Aide à la décision, comme la psychologie (de Juan-Rippol et al., 2021), mais aussi la géographie avec l’analyse multicritère implémentées dans les systèmes d’information géographique (SIG) depuis plus d’un quart de siècle, comme dans les SIG raster (Eastman et al., 1995).

Dans un cas d’aversion au risque, le 2ème centile sera retenu pour faire la mise en garde du public par un « porter à connaissance » la plus précoce possible. Le seuil de 2 p.100 des signalements correspond environ à une température quotidienne moyenne de 8 °C (7.7 °C, cf. tab. n°5) et est survenu approximativement en 9ème semaine d’année civile, soit fin février-début mars, en se basant sur les quatre années d’études regroupées pour n’en faire qu’une et conserver ainsi une population de plus de 14 000 signalements. La sortie du « porter à connaissance » n’a pas été testée, mais si on se base sur un 98ème centile, le seuil serait franchi en 44ème semaine, soit fin octobre – début novembre.

Dans le cas d’une prise de risque qui se veut moins alarmiste pour espérer accroître l’efficacité du « porter à connaissance », en n’étant pas tout le temps en période de vigilance, le 1er décile pourrait être retenu. Le seuil de 10 p.100 des signalements correspond environ à une température quotidienne moyenne de 11.5 °C (cf. tab. n°3) et est survenu approximativement en 15ème semaine d’année civile, soit mi-avril, en se basant toujours sur les quatre années d’études regroupées. La sortie n’a pas non plus été testée, mais si on se base sur le 9ème décile, le seuil serait franchi en 39ème semaine, soit fin septembre. Cela paraît tôt, mais pour ces quatre années (rappel : juillet 2017 – mars 2020), il ne « manquait » plus que 10 p.100 des signalements de piqûres, mais 3 mois pour atteindre la fin de l’année. Les citoyens signaleurs sortant peut-être moins après les vacances d’été ?

Dans ce cas d’une aversion marquée au risque acarologique (seuil des centiles), il y aurait donc environ 15 semaines, soit 3 mois et demi, hors période de vigilance. Dans le cas d’une prise de risque plus souple (seuil des déciles), il y aurait donc environ 18 semaines, soit un peu plus de 4 mois, hors période de vigilance qui correspondent, pour la France du Nord, à la période où il est exceptionnel que les promeneurs s’exposent - se découvrent - lors de leurs sorties en raison des conditions météorologiques les moins favorables dans l’année. Il serait sans doute pertinent de prolonger cette étude par une approche régionale qui permettrait de comparer les contextes océanique, continental, méridional, etc. Enfin, dans un contexte de réchauffement climatique, les trois – quatre mois hors période de vigilance décrit sur la base des données 2017-2020 se verraient dans une proportion à déterminer sur des séries plus longues que celles en notre possession.

## 4.2 Point de rosé

Qu’apporte le point de rosé par rapport à la seule température quotidienne moyenne ? Comme vu dans la section des résultats, le taux d’humidité des signalements n’est pas significativement différent de celui du semi témoin. Le taux d’humidité a, de ce fait, été rejeté des résultats significatifs. Analyser l’apport du point de rosé est donc une possibilité de réintégrer l’humidité dans un indicateur significatif. Pour autant, est-il pertinent dans le cadre d’un « porter à connaissance » ? Apporte-t-il un « plus » par rapport à la température quotidienne moyenne pour alerter du risque acarologique ?

La température du point de rosé (DP, variable « dewpoint », température auquel l’air doit être refroidi pour saturer[[28]](#footnote-29)), combinant la température et l’humidité relative, 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°5E) n’est pas sans rappeler celle des températures vues précédemment (cf. fig. n°5A et 5B).

Sur le même principe que celui décrit pour les températures quotidiennes moyennes à la section 4.1, dans un cas d’aversion au risque, il faut, cette fois-ci, utiliser le 5ème centile pour avoir un indicateur significatif et faire la mise en garde du public, par un « porter à connaissance », la plus précoce possible. Le seuil de 5 p.100 des signalements correspond environ à une température du point de rosé moyenne de 4 °C (4.1 °C, cf. tab. n°6) et est survenu approximativement en 12ème semaine d’année civile, soit mi-fin mars, en se basant sur les quatre années d’études regroupées pour n’en faire qu’une et conserver ainsi une population de plus de 14 000 signalements. La sortie du « porter à connaissance » n’a pas, non plus, été testée, mais si on se base sur un 95ème centile, le seuil serait franchi en 42ème semaine, soit mi-octobre.

Dans le cas d’une prise de risque qui se veut moins alarmiste et qui retiendrait le premier et le dernier décile, les périodes d’entrée et de sortie de « porter à connaissance » du risque acarologique seraient les mêmes que pour les températures quotidiennes moyennes. Pour rappel, entrée en 15ème semaine d’année civile, soit mi-avril, sortie en 39ème semaine, soit fin septembre.

À l’heure du choix, entre ces deux derniers indicateurs, la température apparaît comme le plus efficace. C’est un indicateur plus connu et donc plus compréhensible par un large public que le point de rosé. Ce n’est pas un indicateur dérivé. Enfin, d’un point de vue accessibilité, tous les sites météo donne la température qu’il va faire, ce n’est pas le cas du point de rosé.

# Conclusion

Il ressort de l’analyse des résultats discutée précédemment que seules deux variables météorologiques sont associées dans cette étude au risque acarologique : risque analysé au travers des signalements de piqûres dans le cadre d’une approche par les sciences participatives pendant quatre années successives. Ces variables sont significativement différentes d’un jeu de données témoin auquel elles sont confrontées. Il s’agit de la température moyenne quotidienne et du point de rosé, qui intègre une information sur l’humidité, sachant que celle-ci n’est pas significative prise isolément. Nous devons toutefois garder à l’esprit que les résultats obtenus devront être consolidés dans les années à venir en continuant d’accumuler 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 « porter à connaissance » du risque de piqûres, donc d’un potentiel risque de transmission de maladies à tiques (non étudiée 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, deux attitudes sont possibles, l’une d’aversion au risque l’autre avec une acceptation de prise de risques plus importante.

Pour l’aversion au risque la plus marquée, nous retiendrons le 2ème centile comme seuil d’alerte le plus précoce, dès que le seuil de 2 p.100 de signalements est franchi. Ce seuil de 2 p.100 correspond environ à une température quotidienne moyenne de 8 °C (7.7 °C, cf. tab. n°5) qui survient approximativement en 9ème semaine d’année civile, soit fin février-début mars. On pourra clore la saison acarologique symétriquement sur le 98ème centile, approximativement en 44ème semaine, soit fin octobre – début novembre. Dans ce cas d’aversion marquée, il y aurait donc environ 15 semaines, soit 3 mois et demi, hors période de vigilance.

Pour une aversion au risque moins marquée, on retiendra le 1er décile. Le seuil de 10 p.100 des signalements correspond environ à une température quotidienne moyenne de 11.5 °C (cf. tab. n°3) qui survient approximativement en 15ème semaine d’année civile, soit mi-avril, en se basant toujours sur les quatre années d’études regroupées. Pour la sortie de la période de vigilance, si on se base sur le 9ème décile, le seuil serait franchi en 39ème semaine, soit fin septembre. Dans ce cas d’aversion moins marquée, il y aurait donc environ 28 semaines, soit un peu plus de 6 mois, hors période de vigilance.

Une deuxième variable est utilisable dans le cadre d’un « porter à connaissance » d’entrée dans la saison de risque acarologique potentiel, c’est la température du point de rosée. Cependant, celle-ci s’avère moins compréhensible par un large public et moins facile à collecter que la température moyenne quotidienne par ceux qui auraient à déclencher le « porter à connaissance ». Nous lui préférons donc la température quotidienne moyenne.

Nous avons testé des indicateurs synthétiques pour permettre aux élus et responsables d'espaces de nature, de déclencher des porter à connaissance lorsqu’il y a un risque acarologique en cours ou à venir. Toutefois, il est possible, au vu de ces analyses croisées de signalements de piqûres de tiques et de variables météorologiques, de faire passer un message simplifié d'avertissement. Car même si le dépouillement de séries plus longues faisait émerger de nouvelles variables significatives pour comprendre les signalements, il y a de bonne chance que celles qui caractérisent les "belles journées" (comme les températures élevées et une "belle" lumière) restent des marqueurs de la rencontre entre des tiques en quête d'un repas sanguin et des peaux humaines peu protégées !

# Bibliographie

Aceves‐Bueno, Eréndira, Adeyemi S. Adeleye, Marina Feraud, Yuxiong Huang, Mengya Tao, Yi Yang, et Sarah E. Anderson. « The Accuracy of Citizen Science Data: A Quantitative Review ». The Bulletin of the Ecological Society of America 98, no 4 (2017): 278‑90. <https://doi.org/10.1002/bes2.1336>.

Aeschlimann, André. « Ixodes ricinus, Linné, 1758 (Ixodoidea ; Ixodidae): Essai préliminaire de synthèse sur la biologie de cette espèce en Suisse », 25 février 2021. <https://core.ac.uk/reader/20650510>.

Aho, Alfred V. « CHAPTER 5 - Algorithms for Finding Patterns in Strings ». In Algorithms and Complexity, édité par JAN Van leeuwen, 255‑300. Handbook of Theoretical Computer Science. Amsterdam: Elsevier, 1990. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-88071-0.50010-2>.

Balázs, Bálint, Peter Mooney, Eva Nováková, Lucy Bastin, et Jamal Jokar Arsanjani. « Data Quality in Citizen Science ». In The Science of Citizen Science, édité par Katrin Vohland, Anne Land-Zandstra, Luigi Ceccaroni, Rob Lemmens, Josep Perelló, Marisa Ponti, Roeland Samson, et Katherin Wagenknecht, 139‑57. Cham: Springer International Publishing, 2021. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-58278-4_8>.

Bonney, Rick, Caren B. Cooper, Janis Dickinson, Steve Kelling, Tina Phillips, Kenneth V. Rosenberg, et Jennifer Shirk. « Citizen Science: A Developing Tool for Expanding Science Knowledge and Scientific Literacy ». BioScience 59, no 11 (1 décembre 2009): 977‑84. <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.11.9>.

Bord, S., P. Druilhet, P. Gasqui, D. Abrial, et G. Vourc’h. « 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 (24 février 2014): 72‑79. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.12.004>.

Bord, Sandrine, Lebert I., F. René-Martellet M., et Dernat S., Johany F., Bimonte S., Chalvet-Monfray K., Poux V., Cosson JF, Smoreda Z., Vourc’h G. « 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. » Présenté à REID-IMMUNINV-2019, Université de Montpellier, 20 mai 2019. <https://reid-immuninv-2019.edu.umontpellier.fr/files/2019/05/Programme_REID_entier-1.pdf>.

Bord, Séverine, et Albert Agoulon. « Annexe 1 : Méthodes d’échantillonnage des tiques et fiabilité ». In Tiques et maladies à tiques : Biologie, écologie évolutive, épidémiologie, édité par Nathalie Boulanger et Karen D. McCoy, 279‑86. Didactiques. Marseille: IRD Éditions, 2017. <http://books.openedition.org/irdeditions/9062>.

Burtis, James C., Patrick Sullivan, Taal Levi, Kelly Oggenfuss, Timothy J. Fahey, et Richard S. Ostfeld. « The impact of temperature and precipitation on blacklegged tick activity and Lyme disease incidence in endemic and emerging regions ». Parasites & Vectors 9 (25 novembre 2016). <https://doi.org/10.1186/s13071-016-1894-6>.

Carpenter, James, et John Bithell. « Bootstrap confidence intervals: when, which, what? A practical guide for medical statisticians ». Statistics in Medicine 19 (15 mai 2000): 1141‑64. <https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0258(20000515)19:9<1141::AID-SIM479>3.0.CO;2-F>.

Cat, Julie. « 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, 2017. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01708980>.

Cohn, Jeffrey P. « Citizen Science: Can Volunteers Do Real Research? » BioScience 58, no 3 (1 mars 2008): 192‑97. <https://doi.org/10.1641/B580303>.

Cohnstaedt, Lee W., Kateryn Rochon, Adrian J. Duehl, John F. Anderson, Roberto Barrera, Nan-Yao Su, Alec C. Gerry, et al. « Arthropod Surveillance Programs: Basic Components, Strategies, and Analysis ». Annals of the Entomological Society of America 105, no 2 (mars 2012): 135‑49. <https://doi.org/10.1603/AN11127>.

Cosson, Jean-Francois. « Écologie de la maladie de Lyme ». Revue Forestière Française, no 2-3‑4 (2018): 185‑203. <https://doi.org/10.4267/2042/69996>.

Daniel, Milan, Marek Malý, Vlasta Danielová, Bohumír Kříž, et Patricia Nuttall. « Abiotic predictors and annual seasonal dynamics of Ixodes ricinus, the major disease vector of Central Europe ». Parasites & Vectors 8 (18 septembre 2015). <https://doi.org/10.1186/s13071-015-1092-y>.

Daniel, Milan, Kamil Zitek, Vlasta Danielová, Bohumír Kríz, Jaroslav Valter, et Ivan Kott. « Risk Assessment and Prediction of Ixodes Ricinus Tick Questing Activity and Human Tick-Borne Encephalitis Infection in Space and Time in the Czech Republic ». International Journal of Medical Microbiology: IJMM 296 Suppl 40 (mai 2006): 41‑47. <https://doi.org/10.1016/j.ijmm.2006.02.008>.

Dickinson, Janis L., Jennifer Shirk, David Bonter, Rick Bonney, Rhiannon L. Crain, Jason Martin, Tina Phillips, et Karen Purcell. « The Current State of Citizen Science as a Tool for Ecological Research and Public Engagement ». Frontiers in Ecology and the Environment 10, no 6 (2012): 291‑97. <https://doi.org/10.1890/110236>.

Eastman, J.R., Jin, W., Kyem, P., Toledano, J., 1995. Raster Procedures for Multi-Criteria/Multi-Objective Decisions. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 61, 539–547.

Efron, Bradley. « Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife ». The Annals of Statistics 7, no 1, (1979): 1‑26. <http://www.jstor.org/stable/2958830>.

Fontenille Didier, Jourdain Frédéric, Léger Elsa, et Perrin Yvon. « 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 », 2013. <https://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/2013_distribution_ixodes_ricinus.pdf>.

Freifeld, Clark C., Rumi Chunara, Sumiko R. Mekaru, Emily H. Chan, Taha Kass-Hout, Anahi Ayala Iacucci, et John S. Brownstein. « Participatory Epidemiology: Use of Mobile Phones for Community-Based Health Reporting ». PLOS Medicine 7, no 12 (7 décembre 2010): e1000376. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000376>.

Garcia-Marti, Irene, Raul Zurita-Milla, Margriet G. Harms, et Arno Swart. « Using Volunteered Observations to Map Human Exposure to Ticks ». Scientific Reports 8, no 1 (décembre 2018): 15435. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33900-2>.

Gilot, B., M. Bonnefille, B. Degeilh, J.-C. Beaucournu, J. Pichot, et C. Guiguen. « La colonisation des massifs forestiers par Ixodes ricinus (linné, 1758) en France : utilisation du chevreuil, Capreolus capreolus (l. 1758) comme marqueur biologique ». Parasite 1, no 1 (1 mars 1994): 81‑86. <https://doi.org/10.1051/parasite/1994011081>.

Gilot, B., et C. Perez-Eid. « Bio-écologie des tiques induisant les pathologies les plus importantes en France ». 7e Colloque sur le Contrôle Epidémiologique des Maladies Infectieuses. Institut Pasteur de Paris - 29 mai 1998 28, no 4, Supplement 1 (1 mai 1998): 325‑34. <https://doi.org/10.1016/S0399-077X(98)70217-3>.

Gilot, Bruno. « 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, 1985.

Gray, Jeremy S., Olaf Kahl, Robert S. Lane, Michael L. Levin, et Jean I. Tsao. « Diapause in ticks of the medically important Ixodes ricinus species complex ». Ticks and tick-borne diseases 7, no 5 (juillet 2016): 992‑1003. <https://doi.org/10.1016/j.ttbdis.2016.05.006>.

Grech-Angelini, Sébastien, Frédéric Stachurski, Renaud Lancelot, Jerome Boissier, J-F Allienne, Sylvain Marco, Oscar Maestrini, et Gerrit Uilenberg. « Ticks (Acari: Ixodidae) infesting cattle and some other domestic and wild hosts on the French Mediterranean island of Corsica ». Parasites & Vectors 9 (15 novembre 2016): 582. <https://doi.org/10.1186/s13071-016-1876-8>.

Haddad, Hedi, Bernard Moulin, Franck Manirakiza, Christelle Méha, Vincent Godard, et Samuel Mermet. « Web Mapping and Behavior Pattern Extraction Tools to Assess Lyme Disease Risk for Humans in Peri-Urban Forests ». In Analyzing and Modeling Spatial and Temporal Dynamics of Infectious Diseases, 371‑402. John Wiley & Sons, Ltd, 2015. <https://doi.org/10.1002/9781118630013.ch18>.

Hartemink, Nienke, Arnold van Vliet, Hein Sprong, Frans Jacobs, Irene Garcia-Martí, Raul Zurita-Milla, et Willem Takken. « Temporal-Spatial Variation in Questing Tick Activity in the Netherlands: The Effect of Climatic and Habitat Factors ». Vector-Borne and Zoonotic Diseases 19, no 7 (27 février 2019): 494‑505. <https://doi.org/10.1089/vbz.2018.2369>.

Hauser, Gaël, Olivier Rais, Francisca Morán Cadenas, Yves Gonseth, Mahmoud Bouzelboudjen, et Lise Gern. « Influence of climatic factors on Ixodes ricinus nymph abundance and phenology over a long-term monthly observation in Switzerland (2000–2014) ». Parasites & Vectors 11, no 1 (8 mai 2018): 289. <https://doi.org/10.1186/s13071-018-2876-7>.

Herrmann, Coralie, et Lise Gern. « Survival of Ixodes Ricinus (Acari: Ixodidae) Nymphs under Cold Conditions Is Negatively Influenced by Frequent Temperature Variations ». Ticks and Tick-Borne Diseases 4, no 5 (septembre 2013): 445‑51. <https://doi.org/10.1016/j.ttbdis.2013.05.002>.

Hilami Kh.; Godard, V.; Noûs C. . - 2022 - Existe-t-il des conditions climatiques 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 sur les humains en France métropolitaine entre 2017 et 2020. 11-2022. [⟨hal-03864745⟩](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03864745)

Hubálek, Zdenek, Jirí Halouzka, et Zina Juricová. « Host-seeking activity of ixodid ticks in relation to weather variables ». Journal of vector ecology: journal of the Society for Vector Ecology 28 (1 janvier 2004): 159‑65.

Jongejan, Frans, Suzanne de Jong, Timo Voskuilen, Louise van den Heuvel, Rick Bouman, Henk Heesen, Carlijn Ijzermans, et Laura Berger. « “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, no 1 (26 mars 2019): 116. <https://doi.org/10.1186/s13071-019-3373-3>.

de-Juan-Ripoll, C., Chicchi Giglioli, I.A., Llanes-Jurado, J., Marín-Morales, J., Alcañiz, M., 2021. Why Do We Take Risks? Perception of the Situation and Risk Proneness Predict Domain-Specific Risk Taking. Frontiers in Psychology Vol.12. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2021.562381>

Kahl, O. « Water management of the non-parasitic phases of Ixodes ricinus in the course of its postembryonic development. » Modern acarology. 1991.

Kiewra, Dorota, Maciej Kryza, et Mariusz Szymanowski. « Influence of Selected Meteorological Variables on the Questing Activity of Ixodes Ricinus Ticks in Lower Silesia, SW Poland ». Journal of Vector Ecology 39, no 1 (2014): 138‑45. <https://doi.org/10.1111/j.1948-7134.2014.12080.x>.

Kilpatrick, A. Marm, Andrew D. M. Dobson, Taal Levi, Daniel J. Salkeld, Andrea Swei, Howard S. Ginsberg, Anne Kjemtrup, et al. « 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, no 1722 (5 juin 2017): 20160117. <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0117>.

Krawczyk, Alexandra, Gla van Duijvendijk, A. Swart, D. Heylen, RI Jaarsma, FHH Jacobs, M. Fonville, H. Sprong, et W. Takken. « Effect of Rodent Density on Tick and Tick-Borne Pathogen Populations: Consequences for Infectious Disease Risk. » Parasites & Vectors 13, no 1 (20 janvier 2020): 34‑34. <https://doi.org/10.1186/s13071-020-3902-0>.

Kriz, Bohumir, Milan Daniel, Cestmir Benes, et Marek Maly. « The Role of Game (Wild Boar and Roe Deer) in the Spread of Tick-Borne Encephalitis in the Czech Republic ». Vector Borne and Zoonotic Diseases (Larchmont, N.Y.) 14, no 11 (novembre 2014): 801‑7. <https://doi.org/10.1089/vbz.2013.1569>.

Kurtenbach, Klaus, Klára Hanincová, Jean I. Tsao, Gabriele Margos, Durland Fish, et Nicholas H. Ogden. « Fundamental Processes in the Evolutionary Ecology of Lyme Borreliosis ». Nature Reviews. Microbiology 4, no 9 (septembre 2006): 660‑69. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1475>.

Laaksonen, Maija, Eeva Sajanti, Jani J. Sormunen, Ritva Penttinen, Jari Hänninen, Kai Ruohomäki, Ilari Sääksjärvi, et al. « Crowdsourcing-Based Nationwide Tick Collection Reveals the Distribution of Ixodes Ricinus and I. Persulcatus and Associated Pathogens in Finland ». Emerging Microbes & Infections 6, no 5 (10 mai 2017): e31. <https://doi.org/10.1038/emi.2017.17>.

Lees, A. D., et A. Milne. « The Seasonal and Diurnal Activities of Individual Sheep Ticks (Ixodes Ricinus L.) ». Parasitology 41, no 3‑4 (décembre 1951): 189‑208. <https://doi.org/10.1017/S0031182000084031>.

Léger, Elsa, Gwenaël Vourc’h, Laurence Vial, Christine Chevillon, et Karen D. McCoy. « Changing Distributions of Ticks: Causes and Consequences ». Experimental and Applied Acarology 59, no 1‑2 (février 2013): 219‑44. <https://doi.org/10.1007/s10493-012-9615-0>.

Lejal, Emilie, Maud Marsot, Karine Chalvet-Monfray, Jean-François Cosson, Sara Moutailler, Muriel Vayssier-Taussat, et Thomas Pollet. « A three-years assessment of Ixodes ricinus-borne pathogens in a French peri-urban forest ». Parasites & Vectors 12, no 1 (21 novembre 2019): 551. <https://doi.org/10.1186/s13071-019-3799-7>.

L’Hostis, Monique. « Babesia divergens en France : épidémiologie descriptive et analytique ». http://www.theses.fr. Thesis, Montpellier 1, 1994. <http://www.theses.fr/1994MON13515>.

Lohr, B., I. Müller, M. Mai, D. E. Norris, O. Schöffski, et K. -P. Hunfeld. « 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, no 1 (1 février 2015): 56‑62. <https://doi.org/10.1016/j.ttbdis.2014.09.004>.

Macleod, J. « The Bionomics of Ixodes Ricinus L., The “Sheep Tick” of Scotland ». Parasitology 24, no 3 (octobre 1932): 382‑400. <https://doi.org/10.1017/S0031182000020795>.

Marsot, Maud, Thierry Hoch, Grégoire Perez, Elsa Léger, Hélène Verheyden, Céline Richomme, et Gwenaël Vourc’h. « 8. Modification et modélisation du risque de maladies transmises par les tiques ». In Tiques et maladies à tiques : Biologie, écologie évolutive, épidémiologie, édité par Nathalie Boulanger et Karen D. McCoy, 239‑58. Didactiques. Marseille: IRD Éditions, 2017. <http://books.openedition.org/irdeditions/9056>.

Medlock, Jolyon M., Kayleigh M. Hansford, Antra Bormane, Marketa Derdakova, Agustín Estrada-Peña, Jean-Claude George, Irina Golovljova, et al. « Driving Forces for Changes in Geographical Distribution of Ixodes Ricinus Ticks in Europe ». Parasites & Vectors 6 (2 janvier 2013): 1. <https://doi.org/10.1186/1756-3305-6-1>.

Mulder, Sara, Arnold J.H. van Vliet, Wichertje A. Bron, Fedor Gassner, et Willem Takken. « High Risk of Tick Bites in Dutch Gardens ». Vector-Borne and Zoonotic Diseases 13, no 12 (9 octobre 2013): 865‑71. <https://doi.org/10.1089/vbz.2012.1194>.

Ogden, N. H., L. R. Lindsay, G. Beauchamp, D. Charron, A. Maarouf, C. J. O’Callaghan, D. Waltner-Toews, et I. K. Barker. « Investigation of Relationships between Temperature and Developmental Rates of Tick Ixodes Scapularis (Acari: Ixodidae) in the Laboratory and Field ». Journal of Medical Entomology 41, no 4 (juillet 2004): 622‑33. <https://doi.org/10.1603/0022-2585-41.4.622>.

Ostfeld, Richard S., et Jesse L. Brunner. « Climate change and Ixodes tick-borne diseases of humans ». Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences 370, no 1665 (5 avril 2015). <https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0051>.

Paul, Richard E. L., Martine Cote, Evelyne Le Naour, et Sarah I. Bonnet. « Environmental Factors Influencing Tick Densities over Seven Years in a French Suburban Forest ». Parasites & Vectors 9, no 1 (décembre 2016): 309. <https://doi.org/10.1186/s13071-016-1591-5>.

Pérez-Eid, C. Les tiques: identification, biologie, importance médicale et vétérinaire. Collection Monographies de microbiologie. Lavoisier, 2007. <https://books.google.fr/books?id=Z7BmPQAACAAJ>.

Perret, J. L., E. Guigoz, O. Rais, et L. Gern. « Influence of Saturation Deficit and Temperature on Ixodes Ricinus Tick Questing Activity in a Lyme Borreliosis-Endemic Area (Switzerland) ». Parasitology Research 86, no 7 (juillet 2000): 554‑57. <https://doi.org/10.1007/s004360000209>.

Poinsot, Denis. « R pour les statophobes », 2005, 36. [https://perso.univ-rennes1.fr/denis.poinsot/Statistiques\_%20pour\_statophobes/R%20pour%20les%20statophobes.pdf](https://perso.univ-rennes1.fr/denis.poinsot/Statistiques_ pour_statophobes/R pour les statophobes.pdf).

Ranard, Benjamin L., Yoonhee P. Ha, Zachary F. Meisel, David A. Asch, Shawndra S. Hill, Lance B. Becker, Anne K. Seymour, et Raina M. Merchant. « Crowdsourcing--Harnessing the Masses to Advance Health and Medicine, a Systematic Review ». Journal of General Internal Medicine 29, no 1 (janvier 2014): 187‑203. <https://doi.org/10.1007/s11606-013-2536-8>.

Ratnieks, Francis L. W., Felix Schrell, Rebecca C. Sheppard, Emmeline Brown, Oliver E. Bristow, et Mihail Garbuzov. « 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, no 10 (2016): 1226‑35. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12581>.

Rizzoli, Annapaola, Cornelia Silaghi, Anna Obiegala, Ivo Rudolf, Zdeněk Hubálek, Gábor Földvári, Olivier Plantard, et al. « Ixodes Ricinus and Its Transmitted Pathogens in Urban and Peri-Urban Areas in Europe: New Hazards and Relevance for Public Health ». Frontiers in Public Health 2 (2014). <https://doi.org/10.3389/fpubh.2014.00251>.

Salomon, Jérôme, et Muriel Vayssier-Taussat. « Plan Maladie de Lyme : Les Tiques s’en Réjouissent ». The Conversation, 2 octobre 2016. <http://theconversation.com/plan-maladie-de-lyme-les-tiques-sen-rejouissent-66351>.

Silvertown, Jonathan. « A New Dawn for Citizen Science ». Trends in Ecology & Evolution 24, no 9 (1 septembre 2009): 467‑71. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.03.017>.

Steere, A. C., S. E. Malawista, J. A. Hardin, S. Ruddy, W. Askenase, et W. A. Andiman. « Erythema Chronicum Migrans and Lyme Arthritis. The Enlarging Clinical Spectrum ». Annals of Internal Medicine 86, no 6 (juin 1977): 685‑98. <https://doi.org/10.7326/0003-4819-86-6-685>.

Steere, Allen C., Franc Strle, Gary P. Wormser, Linden T. Hu, John A. Branda, Joppe W. R. Hovius, Xin Li, et Paul S. Mead. « Lyme Borreliosis ». Nature Reviews Disease Primers 2, no 1 (15 décembre 2016): 1‑19. <https://doi.org/10.1038/nrdp.2016.90>.

Stone, Brandee L., Yvonne Tourand, et Catherine A. Brissette. « Brave New Worlds: The Expanding Universe of Lyme Disease ». Vector-Borne and Zoonotic Diseases 17, no 9 (20 juillet 2017): 619‑29. <https://doi.org/10.1089/vbz.2017.2127>.

Vayssier-Taussat, Muriel, Jean François Cosson, Brigitte Degeilh, Marc Eloit, Arnaud Fontanet, Sara Moutailler, Didier Raoult, Eric Sellal, Marie-Noelle Ungeheuer, et Patrick Zylbermann. « How a multidisciplinary ‘One Health’ approach can combat the tick-borne pathogen threat in Europe ». Future Microbiology 10, no 5 (1 mai 2015): 809‑18. <https://doi.org/10.2217/fmb.15.15>.

Vayssier-Taussat, Muriel, Maria Kazimirova, Zdenek Hubalek, Sándor Hornok, Robert Farkas, Jean-François Cosson, Sarah Bonnet, et al. « Emerging horizons for tick-borne pathogens: from the ‘one pathogen–one disease’ vision to the pathobiome paradigm ». Future Microbiology 10, no 12 (19 novembre 2015): 2033‑43. <https://doi.org/10.2217/fmb.15.114>.

Wang Wei, James, Benjamin P. Y-H. Lee, et Low Bing Wen. « Citizen Science and the Urban Ecology of Birds and Butterflies — A Systematic Review ». Édité par Stefano Goffredo. PLOS ONE 11, no 6 (10 juin 2016): e0156425. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156425>.

Ward, Sarah E., et Robert D. Brown. « A Framework for Incorporating the Prevention of Lyme Disease Transmission into the Landscape Planning and Design Process ». Landscape and Urban Planning 66, no 2 (janvier 2004): 91‑106. <https://doi.org/10.1016/S0169-2046(03)00097-5>.

Wijngaard, Cees C. van den, Agnetha Hofhuis, Albert Wong, Margriet G. Harms, G. Ardine de Wit, Anna K. Lugnér, Anita W. M. Suijkerbuijk, Marie-Josée J. Mangen, et Wilfrid van Pelt. « The Cost of Lyme Borreliosis ». European Journal of Public Health 27, no 3 (1 juin 2017): 538‑47. <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckw269>.

Zeman, Petr, Cestmir Benes, et Karel Markvart. « Increasing Residential Proximity of Lyme Borreliosis Cases to High-Risk Habitats: A Retrospective Study in Central Bohemia, the Czech Republic, 1987–2010 ». EcoHealth 12, no 3 (1 septembre 2015): 519‑22. <https://doi.org/10.1007/s10393-015-1016-5>.

# Remerciements

Les premiers mots de remerciements qui viennent aux auteurs vont à Jean-François Cosson, alors à l’UMR BIPAR de l’INRAe, qui devait cosigner cet article mais ne verra pas l’aboutissement de ce travail. C’est son ouverture d’esprit qui a permis notre accueil au sein du projet CiTIQUE il y a cinq ans. Sans lui et ses encouragements, cette recherche n’aurait probablement pas été possible. Les auteurs remercient également Julien Marchand, alors au CPIE54, pour avoir assuré la continuité de l’accès aux données de signalements, après le décès de Jean-François Cosson. Enfin, les auteurs remercient : la Maison des Sciences de l‘Homme Paris-Nord (MSHPN) pour son soutien financier et sa logistique (AAP 2020, 19 2 F 1) pour l’aboutissement de cet article, Florian Raymond (Department of Geography, Université Paris 8, UMR LADYSS CNRS) pour sa relecture et tous les contributeurs qui, par leurs nombreux signalements, ont permis cette analyse.

# 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.

# Données & scripts d'analyse

Le jeu de données collectées par CiTIQUE est déposé sous ce DOI: <https://doi.org/10.57745/NALLBB>

Les signalements enrichis des données climatiques, ainsi que les programmes ayant servi aux calculs présentés sont sur ce dispositif de versionnement en ligne (Git): <https://github.com/spicysardine/pycitique>

Afin de reproduire les figures et les calculs, il suffit d’exécuter sous un environnement R le script :

R/citik\_humains/smartick\_hum\_meteo\_analyse\_statisitique.R

Un environnement R de version 3.6.3 ou ultérieur est fortement recommandé.

Vu le volume conséquent des données, une base de type SQLite sera automatiquement téléchargée par le programme et déposée dans le répertoire du Git cloné sur la machine locale.

# Pré-Publication

Une pré-publication a été déposée sur HAL à l’adresse suivante : https://hal.science/hal-03864745

1. https://websenti.u707.jussieu.fr/sentiweb/?page=carte (dernière consultation 16/01/2023) [↑](#footnote-ref-2)
2. http://www.natuurkalender.nl (dernière consultation 16/01/2023) [↑](#footnote-ref-3)
3. https://www.tekenradar.nl/ (dernière consultation 16/01/2023) [↑](#footnote-ref-4)
4. https://www.citique.fr/ (dernière consultation 16/01/2023) [↑](#footnote-ref-5)
5. https://www.inrae.fr/actualites/signalement-tique-nouvelle-version-lapplication-signaler-piqures-tiques (dernière consultation 16/01/2023) [↑](#footnote-ref-6)
6. https://www.citique.fr/signalement-tique/ (dernière consultation 16/01/2023) [↑](#footnote-ref-7)
7. https://www.citique.fr/actualites-2/ (dernière consultation 16/01/2023) [↑](#footnote-ref-8)
8. https://www.arb-idf.fr/article/rencontres-naturalistes-2018/ (dernière consultation 16/01/2023) [↑](#footnote-ref-9)
9. http://www.vbornet.eu/ (dernière consultation 16/01/2023) [↑](#footnote-ref-10)
10. https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2903/j.efsa.2010.1723 (dernière consultation 16/01/2023) [↑](#footnote-ref-11)
11. la plate-forme acquise par Apple inc. en Mars 2020 maintient une API fonctionnelle jusqu’à fin novembre 2022 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/ (dernière consultation 16/01/2023) [↑](#footnote-ref-12)
12. https://www.citique.fr/signalement-tique/ (dernière consultation 16/01/2023) [↑](#footnote-ref-13)
13. https://www.citique.fr/telechargements/download-info/formulaire-papier-signaler-une-et-envoyer-une-piqure-de-tique/ (dernière consultation 16/01/2023) [↑](#footnote-ref-14)
14. https://www.iso.org/fr/iso-8601-date-and-time-format.html (dernière consultation 16/01/2023) [↑](#footnote-ref-15)
15. Application Programming Interface (Interface de programmation d'applications) [↑](#footnote-ref-16)
16. https://darksky.net/dev/docs#time-machine-request (dernière consultation 16/01/2023) [↑](#footnote-ref-17)
17. https://darksky.net/dev/login?next=/docs (dernière consultation 16/01/2023) [↑](#footnote-ref-18)
18. https://github.com/spicysardine/pycitique/tree/master/PDF/documentation (dernière consultation 16/01/2023) [↑](#footnote-ref-19)
19. https://github.com/spicysardine/pycitique (dernière consultation 16/01/2023) [↑](#footnote-ref-20)
20. https://donneespubliques.meteofrance.fr/?fond=produit&id\_produit=93&id\_rubrique=32 (dernière consultation 16/01/2023) [↑](#footnote-ref-21)
21. https://github.com/spicysardine/pycitique (dernière consultation 17/01/2023) [↑](#footnote-ref-22)
22. https://darksky.net/attribution (dernière consultation 17/01/2023) [↑](#footnote-ref-23)
23. https://ggplot2.tidyverse.org/reference/geom\_smooth.html (dernière consultation 17/01/2023) [↑](#footnote-ref-24)
24. https://ggplot2.tidyverse.org/index.html (dernière consultation 17/01/2023) [↑](#footnote-ref-25)
25. https://www.britannica.com/science/dew-point-temperature (dernière consultation 17/01/2023) [↑](#footnote-ref-26)
26. https://darksky.net/dev/login?next=/docs (dernière consultation 17/01/2023) [↑](#footnote-ref-27)
27. https://www.citique.fr/distribution\_signalements\_2019/ (dernière consultation 16/01/2023) [↑](#footnote-ref-28)
28. https://www.britannica.com/science/dew-point-temperature (dernière consultation 17/01/2023) [↑](#footnote-ref-29)