



MASTER 2^{ème} ANNÉE
Santé publique Paris Sud-Saclay et Santé UPEC

Dominante

**SURVEILLANCE ÉPIDÉMIOLOGIQUE DES MALADIES HUMAINES ET
ANIMALES**

RAPPORT DE STAGE

Exposition géographique de la population équine française à la tique *Ixodes ricinus*

Présenté par

Antoine RIGAL

Réalisé sous la direction de : Maud MARSOT et Coralie LUPO

Organisme et pays : Anses de Maisons-Alfort

Période du stage : Du 8 janvier 2024 au 30 juin 2024

Date de soutenance : 24 juin 2024

Année universitaire 2023-2024

Remerciements

Je remercie dans un premier temps mes maîtres de stage, Maud MARSOT et Coralie LUPO pour leur accueil chaleureux, leur confiance et leur implication tout au long de ce projet. Leur soutien et leurs conseils ont été essentiels à la réussite de mon travail.

Je remercie également les six autres experts qui ont pris de leur temps pour répondre au questionnaire, Mme Isabelle LEBERT, Mme Christel MARCILLAUD-PITEL, Mme Marie DELERUE, Mme Sarah BONNET, Mme Séverine BORD et Mme Anne-Lise PEPIN. Un remerciement tout particulier à Mme Isabelle LEBERT pour ses conseils précieux concernant la vérification des variables de notre étude, ainsi que Mme Séverine BORD pour ses corrections apportées à notre questionnaire.

Enfin, je remercie toute l'équipe de l'unité d'épidémiologie EPIMIM de l'Anses de Maisons-Alfort pour m'avoir accueilli dans leurs locaux pendant toute la durée de mon stage et de tous les moments enrichissants partagés.

Résumé

Les tiques *Ixodes ricinus* représentent un enjeu majeur en matière de risque sanitaire en France. Les équidés sont sensibles à de nombreux agents pathogènes véhiculés par ces tiques comme *Borrelia burgdorferi s.l.*, responsable de la maladie de Lyme pouvant engendrer des symptômes sévères et des conséquences importantes dans les filières sportives. Dans ce contexte, l'objectif de cette étude était d'évaluer et de cartographier le risque d'exposition des équidés en France métropolitaine vis-à-vis de la tique *I. ricinus*.

Pour représenter le risque d'exposition, nous avons sélectionné d'après une revue bibliographique, quatre catégories de facteurs de risque associés aux tiques (météorologique, altitude, végétation et hôtes). Nous avons ensuite utilisé la méthode d'analyse multicritères associée à des systèmes d'information géographique (MCDA-SIG) pour assembler les variables associées à chaque catégorie de facteurs de risque avec la probabilité de présence d'équidés vis-à-vis de celles des tiques pour obtenir les cartes de risque d'exposition en France métropolitaine durant la période d'activité de la tique durant le printemps 2022 à l'échelle communale.

Les résultats obtenus montrent un risque d'exposition relativement faible sur l'ensemble du territoire français (avec un maximum de risque estimé à 5,4%), et une répartition hétérogène des valeurs de risque avec des zones avec un risque plus élevé au niveau du nord-ouest et du centre de la France. Il semble que la distribution spatiale du risque soit très similaire à celle de la répartition de la probabilité de présence des équidés et plus particulièrement à la répartition des effectifs des chevaux de selle. Une étape de la méthode MCDA-SIG que nous aurions pu réaliser était une analyse de sensibilité. Cette étape aurait pu permettre d'apprécier l'impact des effectifs d'équidés de selle sur les résultats. Une autre étape que nous aurions pu réaliser était la vérification des résultats à partir d'observations de terrain composées de mesures de charges en tiques prélevées sur des équidés.

Mots clés : Tiques, *Ixodes ricinus*, Équidés, France, Risque d'exposition, Analyse multi-critères

Table des matières

Liste des figures.....	3
Liste des tableaux.....	4
Liste des acronymes	5
Introduction.....	6
Première partie : Synthèse Bibliographique.....	7
1. Répartition et caractéristiques de la tique <i>Ixodes ricinus</i>	7
A. Répartition de la tique <i>I. ricinus</i> en Europe.....	7
B. Caractérisation de la tique <i>I. ricinus</i>	7
1. Déterminants associés à la présence et à l'activité de la tique <i>I. ricinus</i>	8
A. Facteurs de risque météorologiques.....	9
a. Température de l'air.....	9
b. Humidité relative de l'air.....	10
c. Altitude	10
d. Photopériode.....	11
B. Facteurs biotiques	11
a. Végétation	11
b. Densité d'animaux sauvages	12
2. Les équidés et les tiques en France.....	13
A. Caractérisation des populations équine en France	13
B. Exposition des chevaux aux tiques.....	14
3. Introduction à l'analyse MCDA.....	14
Deuxième partie : étude expérimentale	16
1. Contexte et problématique	16
2. Matériel et méthodes.....	17
A. Facteurs de risque : sources de données et variables créées	17
a. Variables météorologiques : température et humidité	17
b. Altitude	17
c. Végétation	18
d. Animaux hôtes.....	18
e. Equidés.....	22
B. Pondération des facteurs de risque	23
C. Formation de la carte de risque d'exposition	23
3. Résultats	24
A. Facteurs de risque	24

B.	Pondération des facteurs de risque	24
C.	Cartes de de présence et d'activité des tiques <i>I. ricinus</i> , de la présence d'équidés et de risque d'exposition des équidés vis-à-vis d' <i>I. ricinus</i>	27
4.	Discussion	32
A.	Résultats obtenus	32
B.	Choix des facteurs de risque et des seuils considérés	32
C.	Choix de la méthode.....	33
D.	Choix des sources de données	34
E.	Perspectives.....	34
	Conclusion	36
	Liste des références bibliographiques	37
	Annexes	43

Liste des figures

Figure 1: Cartographies de (a) présence et absence de la tique <i>I. ricinus</i> en Europe (ECDC, 2023) et (b) des habitats favorables à <i>I. ricinus</i> en France (Lebert et al, 2022).....	7
Figure 2 : Cycle de vie des tiques <i>I. ricinus</i> (Hofmeester, 2016).....	8
Figure 3 : Répartition des équidés en France par région (a) et par type de race (b) (Ifce-OESC 2016)	14
Figure 4 : Formation de la carte de risque à partir des différentes variables.....	16
Figure 5 : Cartes des variables normalisées associées à chaque catégorie de facteurs de risque liés à la présence et à l'activité des tiques <i>I. ricinus</i> pour les mois d'avril, mai et juin 2022	29
Figure 6 : Cartes de présence et d'activités des tiques <i>I. ricinus</i> (a), de probabilité de présence d'équidés vis-à-vis des tiques (b), ainsi que de risque d'exposition des équidés vis-à-vis des tiques <i>I. ricinus</i> (c) pour les mois d'Avril, Mai et Juin 2022	30

Liste des tableaux

Tableau 1 : Description des sources de données utilisées pour la construction des variables d'intérêt	20
Tableau 2 : Occupations de sols de la base de données CLC2018 pris en compte pour calculer les effectifs d'équidés par commune.....	22
Tableau 3 : Pondération des facteurs de risque liés à la présence et l'activité des tiques.....	26
Tableau 4 : Nombre d'experts ayant choisis les occupations de sol favorables à la présence d'équidés pour chaque groupe d'équidés sur les 6 experts interrogés.....	27

Liste des acronymes

AHP : Analyse hiérarchique des procédés

Anses : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

CLC2018 : Corine land cover 2018

DGAL : Direction générale de l'alimentation

ECDC : Centre européen de prévention et de contrôle des maladies

ICG : Indice de cohérence géographique

IFCE : Institut français du cheval et de l'équitation

IGN : Institut national de l'information géographique et forestière

INRAE : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement

MAUT : Théorie de l'utilité multi-attributs

MCDA-SIG : Méthode d'analyse décisionnelle multicritères à l'aide de systèmes d'informations géographiques

MNHN : Muséum national d'histoire naturelle

OESC : Observatoire économique et social du cheval

OFB : Office français de la biodiversité

ONC : Origine non constatée

ONF : Office national des forêts

RC : Ratio de cohérence

RESPE : Réseau d'épidémiologie-surveillance en pathologie équine

SIGAL : Système d'information du ministère de l'agriculture

SIM : Safran-Isba-Modcou

SIRE : Système d'informations relatifs aux équidés

UICN : Union International pour la Conservation de la Nature

Introduction

Selon l'Organisation Mondiale de la Santé, les maladies vectorielles constituent un enjeu majeur actuel, représentant plus de 17% des maladies infectieuses dans le monde. En Europe, les tiques sont les vecteurs d'agents pathogènes les plus importants en lien avec leur densité élevée et leur répartition étendue sur tout le territoire (Perez *et al.*, 2023). L'impact sanitaire des maladies associées, aussi bien dans le domaine de la santé publique que celui de la santé animale constitue un défi crucial actuel (Boulanger *et al.*, 2019). En effet, la plupart des mammifères vertébrés peuvent s'infecter par des agents pathogènes transmis par les tiques les plus abondantes en Europe. Chez les équidés, les maladies vectorielles les plus prévalentes sont la maladie de Lyme, la méningo-encéphalite à tiques (toutes deux transmises par *Ixodes ricinus*), et les piroplasmoses (transmises par *Dermacentor reticulatus* et *Rhipicephalus sanguineus*). Nous nous focaliserons dans la suite de ce travail sur *I. ricinus*, la tique la plus abondante en France (Boulanger *et al.*, 2019). La maladie de Lyme est la maladie dont l'agent pathogène, *Borrelia burgdorferi s.l.*, est l'agent transmis par les tiques le plus prévalent en France chez les principaux hôtes mammifères sauvages tels que les rongeurs, les cervidés... (Wolcott *et al.*, 2021). Cette maladie est une zoonose. Bien que très peu de symptômes spécifiques aient été mis en évidence chez les équidés, certaines manifestations cliniques ont été décrites : des formes oculaires avec de la cécité, des formes nerveuses accompagnées d'abattement, raideur et inconfort, et enfin des formes cutanées avec des membres gonflés ou des papules (Divers *et al.*, 2018). Cette maladie peut entraîner des baisses de performances chez les chevaux de sport (Swinebroad, 2018). Ainsi, les équidés sont des espèces à risque vis-à-vis de l'infection par des maladies vectorielles par les tiques, et donc aussi vis-à-vis de l'infestation par les tiques, notamment *I. ricinus*. Dans le cadre de cette étude, l'objectif est de déterminer l'exposition de la population équine française vis-à-vis du risque d'infestation par *I. ricinus*. Ceci correspond à une première étape avant l'évaluation du risque d'exposition des chevaux aux maladies associées. Pour atteindre cet objectif, une carte de France des zones favorables à la présence et l'activité de la tique *I. ricinus* a été réalisée en utilisant la méthode d'analyse décisionnelle multicritères (MCDA). Cette méthode permet de combiner plusieurs déterminants liés à l'habitat, aux conditions climatiques et à la présence d'hôtes vertébrés. Ensuite, la carte obtenue a été croisée avec une carte de présence des équidés en France pour aboutir à une carte d'exposition des équidés aux tiques par *I. ricinus* en France.

Première partie : Synthèse Bibliographique

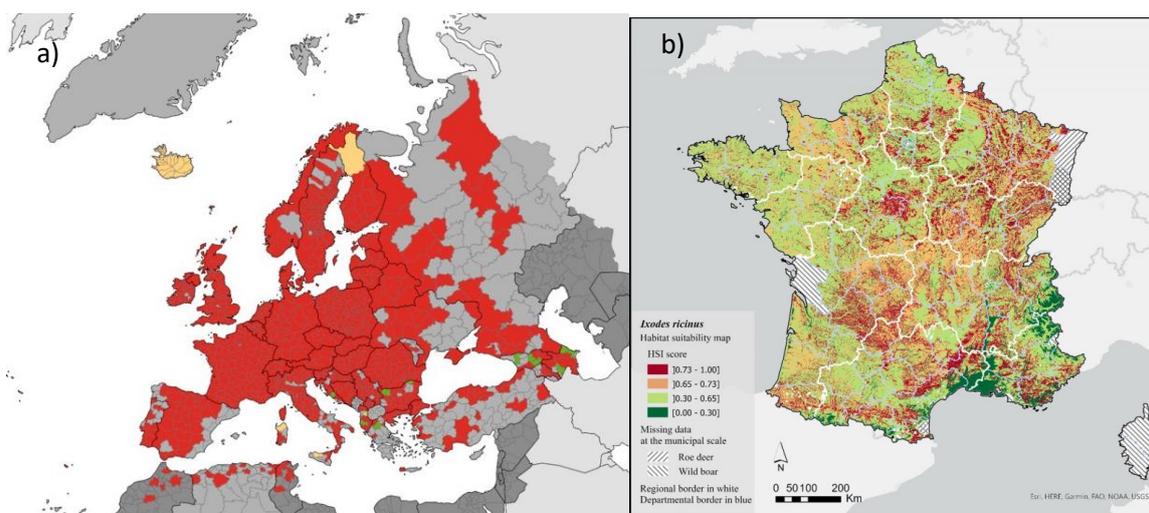
1. Répartition et caractéristiques de la tique *Ixodes ricinus*

A. Répartition de la tique *I. ricinus* en Europe

La tique *I. ricinus* est répartie de façon homogène sur le territoire européen comme le montre la carte de répartition de la tique *I. ricinus* créée par le Centre européen de prévention et de contrôle des maladies (ECDC) (Figure 1 (a)).

Concernant la France, une carte d'estimation de la densité de tiques a été réalisée par Lebert *et al.* (2022, Figure 1 (b)) en se basant sur les conditions les plus propices à leur survie. Ainsi, *I. ricinus* est présente sur tout le territoire. Cependant on observe certaines zones très favorables (en rouge) aux tiques, dans les anciennes régions de Champagne, du Limousin ainsi qu'au sud, et des zones moins favorables (en vert foncé) au bord de la Méditerranée et en altitude dans les Alpes.

Figure 1: Cartographies de (a) présence et absence de la tique *I. ricinus* en Europe (ECDC, 2023) et (b) des habitats favorables à *I. ricinus* en France (Lebert *et al.*, 2022)

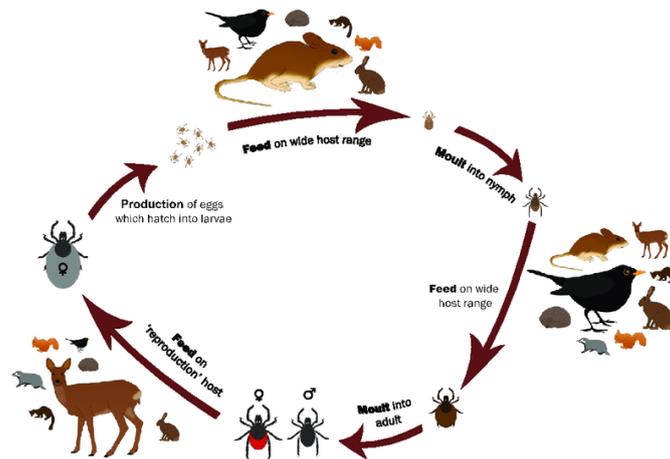


B. Caractérisation de la tique *I. ricinus*

La tique *I. ricinus* est un ectoparasite hématophage. Elle alterne les phases de repas sanguins dit de « gorgement » où la tique se nourrit sur un hôte vertébré, d'une durée de quelques jours avec des phases « libres » au sol ou des phases à l'affût sur la végétation en attente d'un hôte. La tique *I. ricinus* a trois stades de développement (Figure 2) : larve, nymphe et adulte qui se terminent après chaque gorgement et mue dans la stase suivante (Boulangier *et al.*, 2019). Les tiques se nourrissent sur des hôtes vertébrés comme des animaux sauvages (mammifères, oiseaux, lézards...), ou des animaux domestiques (chevaux, chiens, ruminants...). Cependant, chaque stase peut se nourrir sur des hôtes préférentiels en fonction de la disponibilité des hôtes et de la hauteur à laquelle la tique chasse à l'affût. Les larves vont plutôt se nourrir sur des hôtes de petite taille (rongeurs, lézards, oiseaux...) en étant ubiquiste, donc avec peu de sélectivité au niveau de l'espèce, tandis que les adultes vont être

plus sélectifs et se nourrissent sur des animaux de grande taille (en majorité les cervidés, les ruminants...). Les nymphes se nourrissent sur des espèces de différentes tailles avec une préférence pour les oiseaux (Medlock *et al.*, 2013). Il est toutefois possible de trouver des adultes sur des animaux de petite taille et des larves sur des animaux de grande taille mais cela reste plus rare. Du fait de la grande diversité d'hôtes sur lesquels *I. ricinus* se nourrit, elle est qualifiée d'espèce tétrope.

Figure 2 : Cycle de vie des tiques *I. ricinus* (Hofmeester, 2016)



La longévité des différentes stases est parfois de plus d'un an chez les tiques dures. Ainsi, pour *I. ricinus*, une tique triphasique, le cycle peut durer jusqu'à six ans (Agoulon *et al.*, 2017). Après les trois stases de développement, la femelle adulte va effectuer l'oviposition, c'est-à-dire la ponte des œufs (souvent plusieurs centaines) après un accouplement avec une tique mâle adulte.

Il existe une saisonnalité de la densité de tiques à l'affût sur la végétation. En effet, un premier pic d'activité des tiques au printemps est présent en Europe pour toutes les stases (Gray, 1991 ; Kahl et Gray, 2023) avec un deuxième pic en automne de plus faible intensité que le premier, qui est une particularité d'*I. ricinus* par rapport à certaines autres espèces d'*Ixodidae* (Gray *et al.*, 2016) et qui va surtout concerner la stase des nymphes (Bregnard *et al.*, 2021). Cependant, comme la saisonnalité dépend de la photopériode et de la température, les mois des pics peuvent dépendre de la région et du climat correspondant (Perez *et al.*, 2023).

En raison de l'importance des enjeux sanitaires que représentent les principaux agents pathogènes transmis par la tique *I. ricinus*, il est intéressant de connaître les facteurs augmentant la densité de tiques à l'affût et l'exposition des équidés au risque d'infestation par les tiques *I. ricinus* afin de proposer des pistes pour diminuer le risque d'exposition des équidés aux agents pathogènes précédemment cités.

2. Déterminants associés à la présence et à l'activité de la tique *I. ricinus*

Les différents facteurs de risque ont été déterminés à partir d'une revue de la littérature centrée sur l'Europe, avec ponctuellement des revues d'autres localisations pour illustrer certains éléments. Ces facteurs sont répartis en deux catégories, selon qu'ils soient abiotiques ou biotiques. Pour chaque facteur, on précisera s'il influence la survie des tiques ou leur activité de quête d'hôtes.

A. Facteurs de risque météorologiques

a. Température de l'air

La température de l'air influe sur la survie et l'activité d'*I. ricinus*. En effet les tiques sont constamment en contact avec l'air, surtout lorsqu'elles sont à l'affût et une température optimale est nécessaire pour leur développement et l'activité de chasse à l'affût. Les températures favorables à l'activité d'*I. ricinus* sont comprises entre 5°C et 30°C, avec un optimum compris entre 10°C et 26°C (Beugnet *et al.*, 2009 ; Cat *et al.*, 2017 ; Gethmann *et al.*, 2020 ; Nolzen *et al.*, 2022). Leur survie est optimale à des températures similaires même si les tiques peuvent survivre quelques jours à des températures négatives ou au-dessus de l'intervalle de températures favorables. (Vollack *et al.*, 2017 ; van Oort *et al.*, 2020, p.).

La température de l'air minimale à laquelle les tiques sont actives est aux alentours de 5-7°C ; en dessous, les tiques se cachent dans les litières disponibles (Beugnet *et al.*, 2009 ; Greenfield, 2011 ; Kamran *et al.*, 2021). Une activité des tiques peut toutefois survenir ponctuellement à des températures négatives près des lieux de couchage d'animaux sauvages, car la température corporelle des vertébrés homéothermes peut les stimuler pour rechercher un hôte (Kjellander P *et al.*, 2023). La diapause est un phénomène métabolique qui permet à *I. ricinus* de survivre quelques jours à quelques mois à des températures hivernales pouvant aller jusqu'à -18.9°C (Alfredsson *et al.*, 2017 ; Nolzen *et al.*, 2022). Ce phénomène est contrôlé par la température et la photopériode et peut survenir à toutes les stases. Il induit un ralentissement de l'activité des tiques en jouant sur deux composantes. La première est comportementale avec un arrêt de la recherche d'hôte par les tiques. La seconde composante est liée au développement de la tique et/ou des œufs avec un arrêt de ce dernier. Le rôle et les mécanismes de cette diapause restent mal connus, mais elle permettrait de limiter la mortalité des tiques en évitant la recherche d'un hôte dans un milieu et une période défavorable (Gray J., 1998 ; Gray *et al.*, 2016). La présence de neige pendant moins de 125 jours consécutifs permet à la tique de survivre plus longtemps à des températures négatives (Jaenson Tg et Lindgren E, 2011 ; Jaenson *et al.*, 2012) en servant d'isolant thermique (Vollack *et al.*, 2017). Au-delà de 175 jours consécutifs de neige, aucune tique ne survit à cause de l'absence d'hôtes et de végétation favorables à l'activité des tiques dans les zones enneigées (Alfredsson *et al.*, 2017).

La température de l'air maximale d'activité d'*I. ricinus* est souvent considérée à 30°C avec une activité presque nulle au-delà (Macleod, 1935 ; Beugnet *et al.*, 2009 ; Gethmann *et al.*, 2020). Une activité à des températures vers 35°C est parfois observée (Estrada-Peña *et al.*, 2012 ; Gray *et al.*, 2016 ; Nolzen *et al.*, 2022). La température de l'air maximale de survie des tiques se situe dans la même limite que celle de l'activité. Au-delà de ces températures, la quête d'hôtes cesse et le climat est trop sec pour assurer le bon développement des tiques et par conséquent, leur taux de survie diminue (Brown *et al.*, 2014 ; Gray *et al.*, 2016).

A cause du réchauffement climatique, les températures augmentent et il a été montré qu'une hausse des températures moyennes annuelles peut amener à une hausse de la densité d'*I. ricinus* ainsi qu'à une modification des populations de tiques, qui peuplent des milieux auparavant trop froids pour leur survie (Materna *et al.*, 2008 ; Gray *et al.*, 2009 ; Jaenson *et al.*, 2012 ; Uusitalo *et al.*, 2022). Le réchauffement climatique peut aussi influencer les saisonnalités du cycle des tiques en modifiant à long terme la période du pic d'activités des tiques, la décalant vers des mois antérieurs (Gray *et al.*, 2009 ; Greenfield, 2011 ; Nolzen *et al.*, 2022).

b. Humidité relative de l'air

La tique *I. ricinus* a besoin d'humidité pour survivre et pour chasser à l'affût. En effet lorsqu'elle est à l'affût, l'air a un pouvoir asséchant, ce qui va donc la pousser à se diriger ponctuellement vers le sol pour se réhydrater. La survie des tiques est maximale entre 80% et 100% d'humidité relative, avec une corrélation positive entre le nombre de tiques et le pourcentage d'humidité (Sormunen *et al.*, 2016). En deçà de 80% d'humidité relative, le taux de survie est fortement impacté (Macleod, 1935 ; Gray J., 1998, p. 1 ; Medlock *et al.*, 2013 ; Vollack *et al.*, 2017 ; Perez *et al.*, 2023). Concernant l'activité, elle est majoritaire entre 70% et 100% d'humidité relative (Beugnet *et al.*, 2009). Lorsque l'humidité est supérieure à 81%, la tique peut se réhydrater pendant qu'elle chasse grâce à la vapeur d'eau, ce qui lui permet de descendre moins fréquemment au sol et de rester à l'affût en quête d'hôtes (Lees, 1946 ; Kahl et Knülle, 1988 ; Perret *et al.*, 2003). La réabsorption d'eau atteint un optimum à partir de 92%. Les valeurs minimales d'humidité relative pour la survie et l'activité des tiques se situent à 35% et 45%, respectivement (Gethmann *et al.*, 2020 ; Nolzen *et al.*, 2022). Il n'y a pas de valeur maximale à partir de laquelle le taux de survie ou d'activité diminue, on peut donc estimer leur limite d'humidité relative maximale ainsi que leur optimum pour la survie et l'activité de 100%.

La sécheresse peut limiter le développement des tiques. Cela a été suspecté chez *I. ricinus* (Schütte *et al.*, 2024) et observé chez *I. scapularis*, une tique des Etats-Unis avec une biologie similaire à *I. ricinus*. Une diminution de la densité de larves a été montrée un an après la sécheresse (Jones et Kitron, 2000 ; Brown *et al.*, 2014). Ces sécheresses peuvent conduire à des migrations des tiques dans les régions plus humides (Trape *et al.*, 1996). La sécheresse expliquerait que les zones côtières, notamment aux abords de l'Atlantique, soient des paysages avec une faible densité de tique à cause des vents importants qui assèchent le territoire ; on retrouve une densité plus importante dans les baies à l'abri du vent (Degeilh *et al.*, 1994).

Les précipitations des pluies ont un rôle dans le maintien de la survie et de l'activité des tiques en leur fournissant un sol humide leur permettant de se réhydrater (Cat *et al.*, 2017). En effet, on observe une probabilité de présence de tiques qui augmente de 20% lorsque la somme de précipitations pendant la période d'activité passent de 240 à 360 mm (Uusitalo *et al.*, 2022).

c. Altitude

En France, en lien avec la variété des climats (océanique, semi-continentale, montagnarde...), on observe une distribution verticale étendue des tiques *I. ricinus*, allant de 0 à 2000 m d'altitude (Medlock *et al.*, 2013 ; Perez *et al.*, 2023). L'altitude minimale de présence de tiques dépend surtout des paramètres de température et d'humidité. En effet, on trouve des tiques à 0 m d'altitude sur la côte Atlantique dans les baies à l'abri du vent (Degeilh *et al.*, 1994). Toutefois, aux abords de la côte méditerranéenne où le climat est plus chaud et sec, l'altitude minimale de présence d'*I. ricinus* est de 450 m d'altitude (Perez *et al.*, 2023). L'altitude maximale de présence de tiques est aussi conditionnée par la température. Comme *I. ricinus* est sensible au froid et au gel, elle n'est pas présente à des altitudes élevées où la température est en-dessous des températures minimales d'activité et de survie (5°C) (Medlock *et al.*, 2013).

Dans les pays à climat tempéré, l'altitude optimale pour l'activité des tiques est aux alentours de 1000 m (Materna *et al.*, 2005 ; Medlock *et al.*, 2013 ; Lebert *et al.*, 2022). En Europe, la distribution verticale de la présence d'*I. ricinus* dans les différents pays est corrélée aux températures moyennes annuelles du pays (Medlock *et al.*, 2013). Dans les pays à climat froid, comme en Scandinavie, on ne trouvera pas de tique au-delà de 500-1000 m, avec par exemple une limite de 583 m en Norvège (Jore *et al.*, 2011). Au contraire, dans les pays chauds, il existe une limite d'altitude minimale de survie des tiques avec par exemple 600 m d'altitude en Grèce (Medlock *et al.*, 2013). Dans les pays à climat tempéré, la limite maximale se situe entre 1000 m et 2000 m d'altitude, avec une limite de 1550 m en République

Tchèque par exemple (Materna *et al.*, 2008). Depuis plusieurs dizaines d'années un déplacement des tiques vers des altitudes plus élevées est observé en Europe, comme en République Tchèque (Materna *et al.*, 2005, 2008) ou en Suède (Jaenson *et al.*, 2012), notamment en lien avec le changement climatique (Semenza et Suk, 2018).

d. Photopériode

La photopériode est un facteur important pour la survie et l'activité d'*I. ricinus*. Elle intervient dans le contrôle de la diapause. Durant l'hiver, la réduction de la durée des jours induit un ralentissement du métabolisme, tandis qu'un allongement progressif de l'ensoleillement au printemps atténue la diapause, stimulant ainsi le métabolisme des tiques (Belozarov *et al.*, 2002).

Il a été aussi montré que l'obscurité en fin de journée enclenche l'arrêt de la quête d'hôtes et induit le mouvement des tiques vers des endroits plus propices en attendant le lever du soleil (Perret *et al.*, 2003), ce qui induit une baisse d'activité pendant les saisons à jours courts.

B. Facteurs biotiques

a. Végétation

Les tiques du genre *Ixodes* chassent à l'affût sur la végétation pour réaliser leur repas sanguin sur un hôte. Les tiques adultes se trouvent majoritairement sur la végétation en hauteur (50-100 cm) tandis que les stades immatures se trouvent plus proches du sol (Dantas-Torres et Otranto, 2013). Cependant, cette répartition peut être modifiée pour toutes les stades selon les saisons d'activité des tiques par une migration plus en hauteur sur la végétation lors des périodes d'activité, et vers les sols en hiver (Dantas-Torres et Otranto, 2013).

I. ricinus est présente sur tout sol comportant de la végétation, que ce soit dans des espaces naturels ou dans les zones plus urbaines ou aménagées comme les parcs en ville (Janzen *et al.*, 2023). Cependant, il y a une plus grande densité de tiques en forêt ou dans les zones avec au moins une parcelle d'arbres (Boyard *et al.*, 2007 ; Dobson *et al.*, 2011 ; Gethmann *et al.*, 2020). En effet, les forêts, représentent un milieu favorable aux tiques avec des températures et des humidités relatives optimales, et leur permettent une meilleure survie en période hivernale (en lien avec la litière du sol). De plus, les forêts d'arbres feuillus fournissent une litière de feuilles importante, qui permet aux tiques d'avoir un milieu isolant des conditions extérieures en maintenant une température et une humidité favorable à leur survie. Il a été montré chez *I. scapularis* que ces litières ont un rôle isolant associé à une augmentation de la densité de tiques (Linske *et al.*, 2019 ; Jordan et Schulze, 2020).

Le type de végétation est important pour la présence et l'activité d'*I. ricinus*. Les arbres fruitiers et les plantes broutées préférentiellement par les vertébrés attirent les hôtes favorables à *I. ricinus* et permettent de nourrir les tiques, ce qui induit une activité des tiques améliorée et une plus grande densité de tiques observée à l'emplacement de ces types de végétation (Boyard *et al.*, 2007). La hauteur d'herbe, la présence de fougères, ou de zones arbustives ont un impact positif sur la présence et l'activité des tiques, puisque ces végétaux permettent aux tiques de s'accrocher à leurs hôtes préférentiels (Dobson *et al.*, 2011). Les forêts mixtes et feuillues sont plus favorables à la présence des tiques que les forêts de conifères (Janzen *et al.*, 2023). Par exemple, la densité de nymphes est supérieure dans les forêts de chênes par rapport à celle observée dans les forêts de pins grâce à la présence d'une litière de feuilles dans les forêts de feuillus qui protège les tiques des conditions météorologiques extérieures (Ruyts *et al.*, 2018).

b. Densité d'animaux sauvages

I. ricinus se nourrit sur un grand nombre d'espèces d'hôtes vertébrés, qu'ils soient domestiques ou sauvages. Cependant, l'importance de ces hôtes dans la dynamique de populations de tiques varie en fonction des espèces.

Les cervidés jouent un rôle prédominant dans le nourrissage des tiques *I. ricinus*, notamment pour les stases adultes. Les principales espèces de cervidés ayant un rôle dans le maintien des populations de tiques en France sont : le chevreuil (*Capreolus capreolus*), le cerf élaphe (*Cervus elaphus*) et le daim (*Dama dama*) (Randolph, 2001 ; Takumi *et al.*, 2021). La prévalence des cervidés infestés de tiques dépend de la saison : pour les chevreuils, elle peut atteindre 100% au printemps, et diminue jusqu'à 57% en automne (Vázquez *et al.*, 2011). Les cervidés peuvent avoir une charge en tiques, c'est-à-dire un nombre moyen de tiques trouvées par animal allant de 26,7 (Król *et al.*, 2020) à 64,5 (Kiffner *et al.*, 2010) avec plus de 80% de tiques adultes (Vázquez *et al.*, 2011 ; Hofmeester *et al.*, 2016). Le nombre de tiques présentes sur l'animal dépend de son âge et de sa masse corporelle. En général, plus un animal est vieux et possède un poids corporel élevé, plus il est susceptible d'avoir un nombre de tiques important (Chemini *et al.*, 1997 ; Vor *et al.*, 2010 ; Hofmeester *et al.*, 2016 ; Myrsterud *et al.*, 2021).

Les rongeurs sont souvent cités comme les hôtes les plus importants dans le maintien des populations d'*I. ricinus*, notamment pour les stases larves (Gray J., 1998 ; Perez *et al.*, 2023). Les principaux hôtes rongeurs des tiques en France sont : le mulot sylvestre (*Apodemus sylvaticus*), le campagnol roussâtre (*Myodes glaerolus*) et le campagnol des champs (*Microtus arvalis*) (Monique L'Hostis *et al.*, 1996 ; Mihalca et Sándor, 2013). Leur charge en tiques varie de 1,3 à 4,9 tiques par animal et leur prévalence d'infestation de 25% à 43,3% (Hofmeester *et al.*, 2016 ; Monique L'Hostis *et al.*, 1996).

Les oiseaux sont des hôtes préférentiels pour les nymphes, et dans une moindre mesure les larves (Norte *et al.*, 2013). Contrairement aux rongeurs, il existe une grande diversité d'espèces aviaires pouvant être infestées (Rataud *et al.*, 2022). Les espèces d'oiseaux les plus infestées sont le merle noir (*Turdus merula*), la grive musicienne (*Turdus philomelos*), le rouge-gorge familier (*Erithacus rubecula*), et le troglodyte mignon (*Troglodytes troglodytes*) (Marsot *et al.*, 2012 ; Rataud *et al.*, 2022). Selon les espèces d'oiseaux et la saison, la prévalence d'infestation peut aller de 7% à 90% (Falchi *et al.*, 2012). Les charges en tiques peuvent varier de 1 à 15 tiques par animal en moyenne (Hofmeester *et al.*, 2016 ; Marsot *et al.*, 2012). Les oiseaux vont surtout servir dans la propagation des tiques à longue distance (Adamska, 2020 ; Pedersen Bn *et al.*, 2020), bien qu'en période de reproduction, les oiseaux effectuent de plus petites distances et interviennent donc à une propagation plus locale.

D'autres espèces de mammifères sauvages sont parfois cités comme étant porteuses de tiques *I. ricinus*, mais ont une importance significativement moindre que les espèces précédentes dans le nourrissage des tiques. On peut citer : les hérissons (*Erinaceus europaeus*), le lièvre variable (*Lepus timidus*) (Hofmeester *et al.*, 2016), des mustélidés comme la martre des pins (*Martes martes*) (Hofmeester Tim R. *et al.*, 2018 ; Hofmeester *et al.*, 2016), ou le renard (*Vulpes vulpes*) (Hofmeester *et al.*, 2016). Leur charge en tiques moyenne varie de 5 tiques par animal pour le renard et la martre des pins, à 120 tiques par animal pour les hérissons et 488 tiques par animal pour le lièvre (Hofmeester *et al.*, 2016).

D'autres animaux non mammifères que les oiseaux peuvent être infestés par *I. ricinus* comme les lézards bien qu'aucune étude n'en fasse mention en France à notre connaissance (De Sousa *et al.*, 2012 ; Perez *et al.*, 2023).

La présence abondante de certaines espèces domestiques peut être un facteur important sur la densité des tiques dans certains pays où les élevages sont en grand nombre comme les moutons en Irlande (Rousseau *et al.*, 2017). Il n'y a, à notre connaissance, pas de données en France sur l'effet des espèces

domestiques sur les populations de tiques, bien qu'elles puissent être infestées comme les bovins ou les équidés par exemple (M. L'Hostis *et al.*, 1996 ; Boyard *et al.*, 2007).

3. Les équidés et les tiques en France

A. Caractérisation des populations équinnes en France

L'Institut français du cheval et de l'équitation (IFCE), estime régulièrement la population d'équidés en France à partir de la base de données du système d'informations relatifs aux équidés (SIRE). L'identification des équidés en France est obligatoire depuis 2009, cependant comme l'identification est imparfaite, notamment des équidés nés avant 2009, l'IFCE modélise la population française totale à partir des équidés identifiés. Cette estimation situe la population totale française à 1.022.000 équidés en 2022, faisant ainsi de la France le pays européen comptant le plus grand nombre de chevaux. Depuis 2012, la population équine est en diminution à cause d'une baisse des flux entrants (naissances et importations). Les flux sortants (décès, abattages et exportations) sont mal connus mais l'IFCE estime une baisse des abattages et une hausse des équarissages.

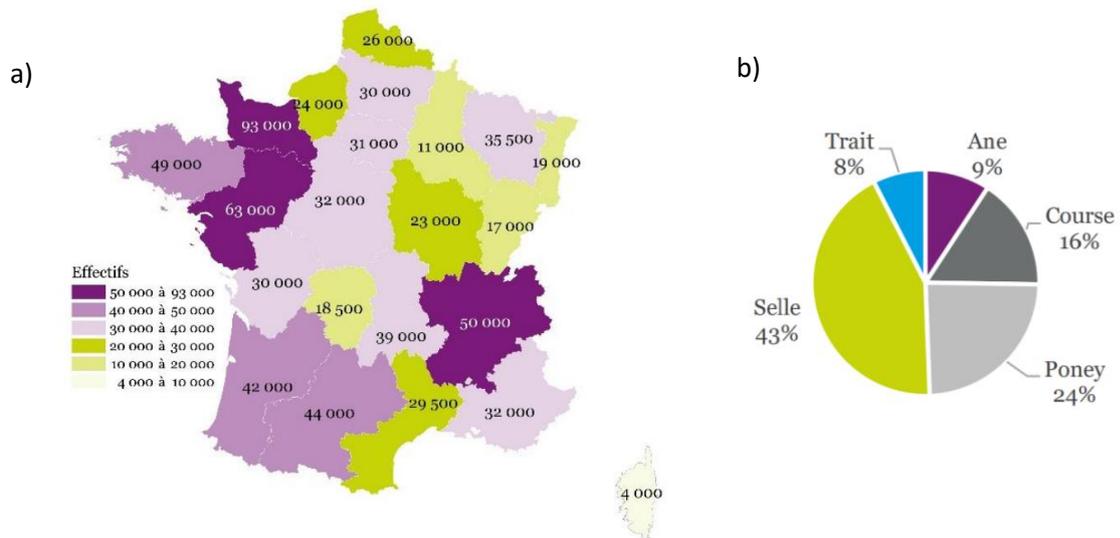
Si on s'intéresse à la répartition sur le territoire français (Figure 4 (a)), 31% du cheptel total est localisé dans les régions du Nord-Ouest (Bretagne, Normandie et Pays de la Loire). Certains types de races ont une majorité d'individus au Nord-Ouest (chevaux de course et poneys), les chevaux de trait et les chevaux de selle se situant pour la plupart en Nouvelle-Aquitaine et dans la région Auvergne Rhône-Alpes. Les ânes se situent équitablement en Normandie, en Nouvelle-Aquitaine et en Auvergne Rhône-Alpes. Les régions les moins peuplées en équidés sont la Bourgogne-Franche-Comté, le Grand-Est, et les Hauts-de-France.

Les équidés sont exploités dans le cadre d'activités variées. Pour l'illustrer, l'IFCE a regroupé les 54 races d'équidés enregistrées en France en grand types de races (Figure 4 (b)). Une majorité de chevaux est destinée à l'utilisation sportive (compétitions d'équitation) ou de loisir (centre équestre, randonnées, compagnie...) avec 67% d'équidés de selle et de poneys. Les deux types de chevaux sont des regroupements de race d'équidés dont la différence entre les deux groupes est la taille des équidés (1,48m au garrot non ferré au maximum pour les poneys (« Règlementation sur la toise des poneys | Fédération Française d'Équitation - FFE », s. d.)). Les chevaux de course, composés des chevaux de galop et de trot constituent 16% des équidés en France. Ce type de chevaux regroupent les races de chevaux utilisées en majorité dans les courses hippiques, soit les races Pur-sang et Autre-Que-Pur-Sang (AQPS) pour les courses au galop et le Trotteur Français pour les courses au trot. Enfin, les équidés les moins représentés sont les ânes (*Equus asinus*) et les chevaux de trait, avec respectivement 9% et 8% de la population équine française. Les chevaux de trait sont des chevaux à morphologie puissante qui étaient auparavant utilisés dans les travaux agricoles, mais qui sont surtout utilisés aujourd'hui pour la production de viande chevaline, et dans une moindre mesure les attelages et les activités de loisirs.

Environ deux tiers des équidés vivent dans des structures ayant une activité agricole (élevages et centres équestres pour la grande majorité), les équidés du dernier tiers sont hébergés chez des particuliers. Dans les élevages, les juments reproductrices et les jeunes chevaux (avant leur débouillage pour une activité particulière) ont souvent accès à des herbages une grande partie de l'année. Les lieux de vie diffèrent aussi selon le type de race : les ânes ou les chevaux de traits vivent majoritairement en extérieur, généralement au pré, alors que les chevaux de selle ou de course seront en majorité en boxes ou en paddock avec des accès variables à l'extérieur et aux environnements naturels. Ces

derniers peuvent aussi se retrouver dans des environnements urbains comme des parcs ou des hippodromes.

Figure 3 : Répartition des équidés en France par région (a) et par type de race (b) (Ifce-OESC 2016)



B. Exposition des chevaux aux tiques

Peu d'études se sont intéressées à l'infestation des chevaux par les tiques en Europe, la majorité s'intéressent préférentiellement à la prévalence des maladies vectorielles comme la piroplasmose équine (Cicculli *et al.*, 2019) ou la borréliose (Socolovschi *et al.*, 2012). Cependant, plusieurs études sur *I. ricinus* et d'autres tiques d'espèces différentes (*Rhipicephalus sp*, *Hyalomma anatolicum* et *Anocentor nitens* pour les plus abondantes) et dans des pays différents (Pakistan, Brésil, France) se sont penchés sur les facteurs pouvant influencer l'infestation des équidés par les tiques. D'après ces études, certaines races seraient plus propices à porter des charges de tiques conséquentes, comme par exemple chez les chevaux de trait avec une prédominance pour le Comtois (Nadal, 2023). Les équidés mâles ainsi que ceux plus âgés sont plus susceptibles d'être infestés (Ali *et al.*, 2021 ; Kamran *et al.*, 2021 ; Nadal, 2023). Par ailleurs, plus le nombre d'équidés présents sur une pâture est élevé, plus le risque d'infestation est grand (Labruna *et al.*, 2001). Concernant les facteurs liés à l'environnement, le risque d'infestation est corrélé avec des facteurs augmentant la densité de tiques. Les pâtures mixtes avec la présence d'autres mammifères sauvages ou domestiques favoriseraient une plus grande infestation des équidés (Labruna *et al.*, 2001 ; Kamran *et al.*, 2021 ; Nadal, 2023). Les pâtures avec de la végétation arbustive, des surfaces forestières à proximité ou des terrains boueux augmentent le risque d'infestation (Labruna *et al.*, 2001 ; Ali *et al.*, 2021 ; Nadal, 2023). L'utilisation de certains produits chimiques comme des produits acaricides ou des traitements comme la doramectine peuvent avoir un effet positif ou négatif sur la présence de tiques sur les équidés en fonction du produit (Kamran *et al.*, 2021 ; Labruna *et al.*, 2001 ; Nadal, 2023).

4. Introduction à l'analyse MCDA

Comme évoqué dans l'introduction, l'objectif de notre étude était de réaliser une carte de risque de la population équine française vis-à-vis de l'exposition à la tique *I. ricinus* pour la période d'activité principale de la tique. La réalisation de cette carte a été effectuée à l'aide de la méthode d'analyse décisionnelle multicritères à l'aide de système d'informations géographiques (MCDA-SIG). Cette méthode permet de modéliser une carte de risque en prenant en compte plusieurs facteurs de risque qui impactent le risque choisi. Elle se base sur les facteurs de risque identifiés et des outils d'analyse

cartographiques comme des logiciels SIG (QGIS par exemple). La méthode MCDA-SIG s'exécute en quatre étapes. La première étape consiste en une sélection des facteurs de risque, notamment par une recherche bibliographique approfondie ou par des avis d'experts. La deuxième étape est la pondération des facteurs de risque en associant un coefficient à chaque facteur. Ces pondérations sont effectuées à partir d'une méthode nommée l'Analyse Hiérarchique des Procédés (AHP) créé par Saaty en 1980 (Saaty TL, 1980). Cette méthode permet de faire intervenir plusieurs avis d'experts afin de donner des coefficients pour chaque facteur de risque. Plusieurs techniques de calcul permettent ensuite de prendre en compte les avis d'experts (Ramanathan et Ganesh, 1994). La troisième étape consiste en l'agrégation de ces facteurs et la formation d'une carte de risque. Le but est de former cette carte en calculant un indice de risque par unité spatiale par la combinaison tous les facteurs avec leur coefficient respectif. Les variables sont normalisées de 0 à 1 en prenant en compte leur minimum et leur maximum avant d'être combinées entre elles. Enfin, la dernière étape est la vérification des valeurs de risque des cartes obtenues à partir d'un modèle ou à partir de données de terrain. Cette dernière étape peut s'accompagner d'une analyse de sensibilité permettant d'apprécier l'impact des différentes variables associées aux facteurs choisis sur les résultats obtenus.

L'outil MCDA-SIG est utilisé dans de nombreuses études sur des sujets variés et notamment sur la tique *I. ricinus* à différentes échelles spatiales comme une région (Leoty *et al.*, 2021) ou la France entière (Lebert *et al.*, 2022). Cependant, à notre connaissance, aucune étude n'a mis en relation la densité et l'activité des tiques vis-à-vis de la population équine française. Dans les deux études citées, les facteurs utilisés pour modéliser les habitats favorables aux tiques sont :

- Le climat, en découpant la France selon différents climats (en se basant sur la littérature et les bases de données) ;
- L'altitude, avec l'utilisation de la source de données BD ALTI de l'IGN ;
- L'occupation des sols, en utilisant les sources de données CORINE LAND COVER de l'European environment agency ou BD FORET de l'IGN ;
- Les densités d'hôtes sauvages, et plus particulièrement des ongulés sauvages avec les données de l'OFB.

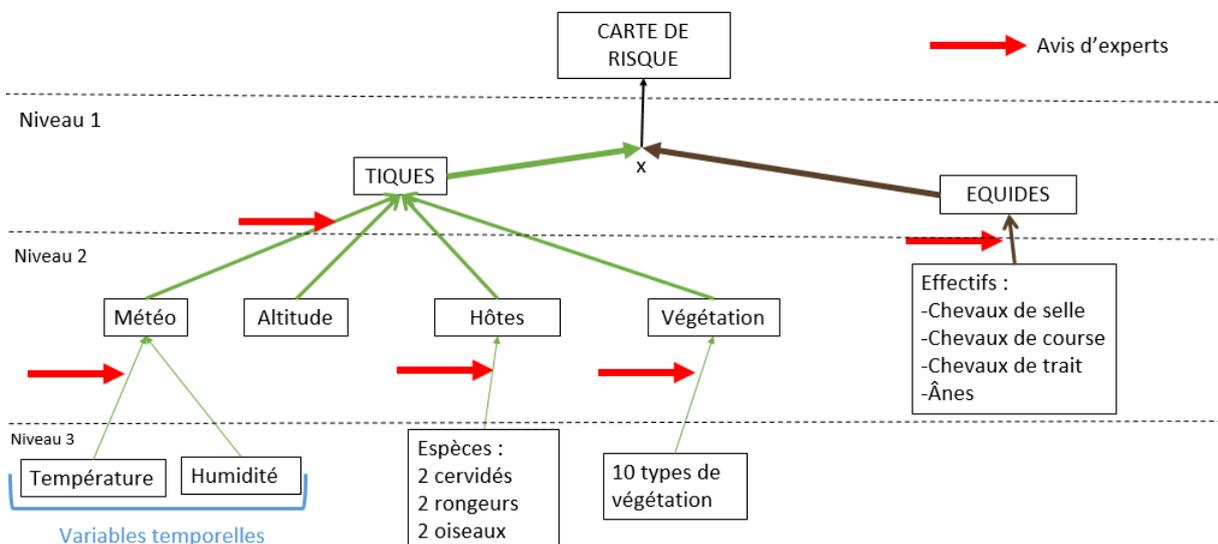
Deuxième partie : étude expérimentale

1. Contexte et problématique

L'objectif de notre étude était de réaliser une carte de risque de la population équine française vis-à-vis de l'exposition à la tique *I. ricinus* pour la période d'activité principale de la tique (printemps). L'exposition à *I. ricinus* est définie comme la présence de tiques se nourrissant sur les équidés, ce qui se caractérise à la fois par la répartition de présence des tiques en France et par la présence et le passage d'équidés dans les zones avec des tiques. La zone d'étude qui a été choisie est la France continentale, soit la France métropolitaine sans la Corse, en considérant une échelle communale. Pour réaliser cette carte, nous avons utilisé la méthode MCDA-SIG. Pour l'échelle spatiale, nous avons choisi les mois de la période d'activité des tiques et l'année avec les données disponibles les plus récentes, soit les mois d'avril, mai et juin pour l'année 2022. Concernant les facteurs de risque choisis pour former la carte, nous avons choisi une variable liée à la population équine ainsi que quatre variables favorables à la présence et à l'activité des tiques : (1) les variables météorologiques (comprenant température et humidité relative), (2) l'altitude, (3) la végétation et (4) les animaux sauvages hôtes. Ces variables ont été choisies à partir d'une synthèse bibliographique. Elles ont été validées par un entretien avec Mme Isabelle LEBERT (INRAE), qui a déjà élaboré une carte de présence de la tique *I. ricinus* en France par MCDA-SIG (Lebert *et al.*, 2022). Nous avons ensuite pris en compte des avis d'experts tiques et chevaux grâce à la méthode de l'AHP pour pondérer ces variables. Les variables ont ensuite été normalisées de 0 à 1 en prenant en compte leur minimum et leur maximum. Puis elles ont été agrégées par une somme pondérée de chaque coefficient calculé par l'AHP afin de former une carte « tique » et une carte « équidés » pour les mois considérés. Les valeurs des communes de ces deux cartes sont multipliées entre elles afin d'obtenir la carte de risque finale. La création de la carte finale ainsi que les localisations des pondérations des différents facteurs par les experts sont détaillées sur la figure 4.

Figure 4 : Formation de la carte de risque à partir des différentes variables.

Les flèches rouges indiquent les avis d'experts. Les coefficients relatifs à chaque facteur sont déterminés par les avis d'experts. Les cartes des tiques et des équidés sont multipliées entre elles pour former la carte de risque finale (indiquée par « x »).



2. Matériel et méthodes

A. Facteurs de risque : sources de données et variables créées

a. Variables météorologiques : température et humidité

Les variables de **température** et **humidité relative de l'air** de chaque commune française ont été calculées à partir du modèle SIM de Météo-France. Le modèle SIM est un modèle hydrométéorologique composé de 3 modules : SAFRAN, ISBA et MODCOU. Il a été créé en 2003 et permet de simuler sur la France les flux d'eau et d'énergie à la surface terrestre. Le module SAFRAN permet de générer une grille d'interpolation des paramètres de température, d'humidité, de vent et de précipitations à partir de paramètres mesurés en surface. Les données sont en libre accès sur le site internet Météo-France. Les informations concernant les données utilisées sont répertoriées dans le Tableau 1. Concernant le calcul des variables de température et d'humidité relative, nous nous sommes basés sur les données quotidiennes des mois d'avril, mai et juin 2022. Les données utilisées sont représentées pour le 1^{er} avril 2022 dans l'Annexe n°1. Les valeurs de températures moyennes, maximales et minimales ainsi que les humidités relatives moyennes quotidiennes sont cartographiées à l'aide de pixels, représentés par des carrés de 8 km de côté. Les deux variables de température et d'humidité sont calculées à l'échelle communale à partir des données des pixels.

Il est montré que la température de l'air joue un rôle crucial dans l'activité et la survie de *I. ricinus*. Une température trop froide (-19°C) ou trop chaude (35°C) diminue les densités de tiques (Gray *et al.*, 2016 ; Alfredsson *et al.*, 2017) alors que des températures optimales (10-20°C) stimulent l'activité des tiques (Beugnet *et al.*, 2009 ; Gethmann *et al.*, 2020). De même, il est montré que l'humidité relative de l'air joue un rôle dans la survie et l'activité d'*I. ricinus*. En-dessous de 80% d'humidité relative, les densités de populations de tiques diminuent drastiquement (Gray J., 1998 ; Beugnet *et al.*, 2009 ; Medlock *et al.*, 2013), alors qu'une humidité supérieure à 92% augmente la durée de la quête d'hôtes de la tique et donc son activité (Kahl et Knülle, 1988). Le **nombre mensuel de jours favorables à l'activité des tiques** a été calculé pour chaque commune de la France continentale pour les mois d'avril, mai et juin 2022 pour la température et l'humidité. Pour la température, pour chaque jour et chaque pixel, la proportion de l'amplitude de la température (comprise entre la valeur minimale et la valeur maximale) située dans l'intervalle d'optimum d'activité des tiques, soit entre 10 et 20°C a été calculé. Les proportions journalières ont ensuite été cumulées par mois afin d'obtenir un nombre mensuel de jours favorables par pixel. Enfin, une somme cumulée des nombres de jours favorable par pixel localisé dans la commune a été effectuée. Cette dernière somme a été pondérée par la proportion de surface du pixel dans la commune pour obtenir le nombre de jours favorables à l'échelle de la commune. De la même manière que la température, on a calculé le **nombre mensuel de jours favorables à l'activité des tiques** pour un seuil d'humidité relative de 70%. Cependant, comme seule l'humidité relative moyenne quotidienne était disponible par pixel, un jour était considéré comme favorable lorsque l'humidité relative moyenne dépasse 70%.

b. Altitude

L'**altitude** est un facteur limitant de la survie des tiques. En effet, plus l'altitude est élevée, plus le nombre de tiques diminue. De plus, aucune tique n'est trouvée au-delà de 2000 m d'altitude en France (Medlock *et al.*, 2013). Les données d'altitudes utilisées dans ce travail ont été collectées par l'IGN grâce à trois techniques : la technique par LiDAR pour les littoraux ainsi que les massifs forestiers, le radar pour les massifs de montagne et les corrélations de photographies aériennes pour le reste du

territoire. Ces données ont ensuite été modélisées sous forme d'une grille régulière de carré de 25m de côté et partagés publiquement via la base de données BD_ALTI (Tableau 1). Les données utilisées sont représentées dans l'Annexe n°2.

Une **valeur d'adéquation de la présence des tiques relative à l'altitude** a été attribué à chaque commune. Pour cela, la médiane des altitudes par commune a été calculée à partir des valeurs des pixels présents dans la commune. Ensuite la valeur d'adéquation de l'altitude comprise entre 0 et 1 a été calculée pour chaque commune de la même manière que Lebert et al. (2022) :

-pour les altitudes comprises entre 0 et 1000 m, la valeur d'adéquation était égale à 1,

-pour les altitudes comprises entre 1000 et 2000 m, la valeur d'adéquation était calculée par la formule : $\text{valeur d'adéquation} = \frac{2000 - \text{altitude}}{2000 - 1000} = \frac{2000 - \text{altitude}}{1000}$,

-pour les altitudes supérieures à 2000 m, la valeur d'adéquation était égale à 0.

c. Végétation

La **végétation** joue un rôle important dans l'activité et la survie d'*I. ricinus* puisque les tiques chassent en hauteur sur la végétation pour se nourrir sur leurs hôtes préférentiels (Dantas-Torres et Otranto, 2013). Certains types de végétation permettent une meilleure survie des tiques comme les forêts de feuillus en leur fournissant une litière de feuilles, les protégeant des conditions extérieures (Jordan et Schulze, 2020). Nous avons choisi d'utiliser la répartition de la végétation en France disponible dans la base de données BD_TOPO de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) (Tableau 1). Elle se base sur les données internes de l'IGN ainsi que les données de partenaires, notamment le Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN) et l'Office National des Forêts (ONF) pour les parcs et les forêts domaniales respectivement. Les données utilisées correspondent aux données disponibles les plus récentes (décembre 2023). Les différents types de végétation pris en compte sont représentés dans l'Annexe n°3 et leur définition attribuée par l'IGN sont détaillés dans l'Annexe n°4. Les types de végétation n'étant pas pris en compte étaient les bananeraies, cannes à sucre, mangroves et zone arborées non-présents en France métropolitaine ainsi que les rizières, landes herbacées et houblonnières, peu présents en France continentale (dans 2, 18 et 45 communes respectivement) en plus du fait que ces types de végétation ne soient pas favorable à la présence d'*I. ricinus* (Lebert *et al.*, 2022). Les types de végétation sélectionnés peuvent être classés en deux catégories. En premier lieu il y a les forêts caractérisées par leur surface arboricole et qui diffèrent entre elles par leur couvert absolu, leur couvert relatif et leur surface. Dans un second lieu les autres types de végétation qui comprennent les haies, les landes ligneuses et les peupleraies ainsi que les vignes et les vergers.

Pour chaque commune et chaque type de végétation considéré comme favorable à *I. ricinus*, une proportion correspondant à la surface du **type de végétation dans la commune divisée par la surface totale de la commune** a été calculée.

d. Animaux hôtes

Les **animaux hôtes** permettent le nourrissage des tiques et jouent donc un rôle dans leur présence et leur survie. Différentes espèces d'hôtes nourrissent les tiques : les cervidés nourrissent préférentiellement les adultes, les oiseaux les nymphes et les rongeurs les larves (Hofmeester, 2016). Concernant le choix des espèces, nous nous sommes limités aux deux espèces les plus importantes

dans le maintien des populations de tiques en France pour chacun des trois types d'hôtes (Monique L'Hostis *et al.*, 1996 ; Randolph, 2001 ; Marsot *et al.*, 2012 ; Mihalca et Sándor, 2013 ; Rataud *et al.*, 2022 ; Takumi *et al.*, 2021). Les espèces choisies ainsi que les sources de données utilisées sont répertoriées dans le Tableau 1. Pour le chevreuil (*Capreolus capreolus*), une carte de présence et d'absence par commune est réalisée d'après le recueil des tableaux de chasse par commune. Pour le cerf élaphe (*Cervus elaphus*), après la saison de chasse, les agents de l'OFB se basent sur les tableaux de chasse de leur département et sur des dires d'experts locaux pour cartographier les cervidés selon une carte de présence et d'absence par massif. Pour les oiseaux choisis, soit la grive musicienne (*Turdus philomelos*) et le merle noir (*Turdus merula*), les cartes d'abondance sont réalisées à partir de 5335 points d'écoute répartis dans toute la France aux abords des tronçons routiers non urbanisés avec une distance d'au moins 1km entre chaque point d'écoute. Il y a un premier inventaire dans chaque point d'écoute entre le 1^{er} et le 30 avril et un deuxième entre le 15 mai et le 15 juin. Chaque espèce est dénombrée dans un cercle de 500m avec une écoute de 10 minutes. Les données sont ensuite extrapolées en une carte d'abondance avec un lissage entre les points d'écoute, formant une grille régulière de carré de 3km de côté avec des abondances catégorisées de 1 à 9. Les données utilisées sont les données de présence/absence ou les classes d'abondance de la dernière année de collecte des données pour chaque espèce, visibles dans l'Annexe n°5. Les données utilisées pour les rongeurs sont issues de l'étude de Lumbierres *et al.*, 2022. Pour chaque espèce d'oiseau et de mammifère terrestre (16132 espèces), une zone d'habitat a été estimée. Cette estimation se base sur les données de la liste rouge de l'Union International pour la Conservation de la Nature (UICN) où sont stockées les informations des habitats favorables pour chaque espèce animale. Avec ces informations, les espaces non conformes aux habitats et aux altitudes favorables de chaque espèce ont été retirés pour ne garder que la carte de présence de l'espèce correspondante. Ces données ont été utilisées pour les deux espèces de rongeurs choisies, soit le mulot sylvestre (*Apodemus sylvaticus*) et le campagnol roussâtre (*Myodes glaerolus*). Les données sont représentées dans l'Annexe n°4.

Pour les cervidés et les rongeurs sur chaque commune, la **proportion de surface de présence par rapport à la surface de la commune** a été calculée. Pour les oiseaux, de la même manière que la température et l'humidité, une somme cumulée des classes d'abondance par carré localisé dans la commune pondérée par la proportion de surface du carré dans la commune est calculée pour obtenir une **classe d'abondance par commune**.

Tableau 1 : Description des sources de données utilisées pour la construction des variables d'intérêt

Variable	Source de données	Format	Emprise temporelle/période	Unité temporelle	Emprise spatiale	Unité spatiale	Référence
Température de l'air	Module SAFRAN du modèle hydrométéorologique SIM	Moyenne, minimum, maximum	1981 à 2024	Jour	France métropolitaine	8x8 km ²	https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/donnees-changement-climatique-sim-quotidienne/
Humidité relative de l'air	Module SAFRAN du modèle hydrométéorologique SIM	Moyenne	1981 à 2024	Jour	France métropolitaine	8x8 km ²	https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/donnees-changement-climatique-sim-quotidienne/
Altitude	Base de données BD ALTI de l'IGN	Moyenne	1987 à 2011	/	France métropolitaine	25x25 m ²	https://geoservices.ign.fr/bdalti
Végétation	Section Occupation du sol de la base de données BD TOPO de l'IGN	Surface	2008 à 2023	Trimestre	France métropolitaine	28x28 m ²	https://geoservices.ign.fr/bdtopo
Animaux hôtes (Chevreuil, <i>Capreolus capreolus</i>)	Cartes CARMEN de l'OFB	Présence /absence	1998-2018	5 ans	France métropolitaine	Commune	https://professionnels.ofb.fr/fr/node/1089
Animaux hôtes (Cerf élaphe, <i>Cervus elaphus</i>)	Cartes CARMEN de l'OFB	Présence /absence	1983-2020	Année	France métropolitaine	Commune	https://professionnels.ofb.fr/fr/node/1089

Animaux hôtes (Merle noir, <i>Turdus merula</i>)	Cartes CARMEN de l'OFB	Classe d'abondance	1996-2017	Année	France métropolitaine	3x3 km ²	https://professionnels.ofb.fr/fr/node/1089
Animaux hôtes (Grive musicienne, <i>Turdus philomelos</i>)	Cartes CARMEN de l'OFB	Classe d'abondance	1996-2017	Année	France métropolitaine	3x3 km ²	https://professionnels.ofb.fr/fr/node/1089
Animaux hôtes (Rongeurs : Mulot sylvestre, <i>Apodemus sylvaticus</i> et Campagnol roussâtre, <i>Myodes glaerolus</i>)	"Area of Habitat maps for the world's terrestrial birds and mammals" Lumbierres, Maria et al. (2022)	Présence /absence	2020	/	Europe	100x100 m ²	https://www.nature.com/articles/s41597-022-01838-w
Equidés	Estimation des effectifs sur le site stats et cartes de l'IFCE	Effectifs	2019 à 2022	Année	France	Département	https://statscartes.ifce.fr/effectif-dquids/par-departements_d76
	Corine land cover 2018 de l'European Environment Agency	Surface	1990 à 2018	6 ans	Europe	100x100 m ²	https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover/clc2018

e. Equidés

Un effectif par groupe d'équidés et par commune a été calculé à partir des effectifs d'équidés par département et des occupations de sol favorables à leur présence. Les cartes des effectifs d'équidés par département et par année sont obtenues à partir d'estimations effectuées tous les deux ans par l'IFCE. Ces estimations correspondent à la somme des équidés identifiés et enregistrés et des équidés estimés non identifiés (qui concernent surtout les chevaux âgés et les chevaux plus jeunes avec un retard d'identification). A cette somme sont soustraits les équidés présumés morts estimés à partir des courbes de survie des différents types de races définis par l'IFCE (trot, galop, selle, poney, origine non constatée, traits et ânes). Les effectifs par zone sont ensuite déterminés par les données de localisation des équidés morts du Système d'information du ministère de l'agriculture (SIGAL) et des données de la Direction générale de l'alimentation (DGAL) et sont extrapolés à la région ou au département. Le nombre d'équidés estimé par type de race et par département sont téléchargeables directement sur le site de l'IFCE. Les données utilisées correspondent aux effectifs par département de l'année 2022. Elles sont représentées dans l'Annexe n°6. Les surfaces de Corine Land Cover 2018 (CLC2018) correspondent à des images satellites interprétées visuellement, générées numériquement et classées en catégories d'occupations de sol. Ces catégories se décomposent en trois niveaux de précision. Les données de CLC2018 sont représentées dans l'annexe n°7. Les emprises spatiales et temporelles des deux sources de données sont détaillées dans le Tableau 1.

Pour chaque groupe d'équidés considéré, **un effectif d'équidés par commune** a été calculé à partir des effectifs d'équidés par département et à partir de la surface de sols favorables spécifiques à la présence des groupes d'équidés. Nous avons fait l'hypothèse que la répartition des équidés était homogène au sein de la commune. Les types d'équidés ont été répartis en quatre groupes. Les types de race selle, poney et Origine Non Constatée (ONC) ont été regroupés dans le groupe « chevaux de selle ». Les ONC sont des équidés sans origine certifiée. Les types de race trot et galop ont été regroupés en « chevaux de course ». Les types « ânes » et « trait » ont été laissés tels quels. Ces regroupements ont été effectués car il a été estimé que les chevaux d'un même groupe ont des modes de vie qui les exposent à un risque similaire d'infestation par les tiques. Par exemple les poneys et les chevaux de selle sont souvent utilisés comme chevaux de centre équestre et de randonnée, et ont donc des modes de vie similaires. Les types de sol favorables à la présence d'équidés ont été sélectionnés parmi les occupations de sols du jeu de données CLC2018. Ces occupations de sol ont été choisis, car ils ont été jugés favorables pour convenir à des lieux de vie ou des lieux de promenades des équidés. Les occupations de sol prises en compte sont répertoriées dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Occupations de sols de la base de données CLC2018 pris en compte pour calculer les effectifs d'équidés par commune

Occupations de sols	Définition	Numérotation CLC2018
Espaces verts urbains	Espaces végétalisés inclus dans le tissu urbain	141
Equipement sportifs et de loisirs	Infrastructures sportives et de loisirs incluant notamment les hippodromes	142
Terres arables non irriguées	Parcelles de culture régulièrement labourées	211
Vergers et vignes	Terrains de cultures comprenant vergers et vignes	221-222
Prairies	Surfaces enherbées denses	231
Zones agricoles hétérogènes	Surfaces de zones de culture mixtes ou associées à des parcelles naturelles.	241-242-243-244

Forêts	Formations végétales arboricoles comprenant notamment les forêts de conifères, de feuillus et mixtes	311-312-313
Milieux à végétation arbustive et/ou herbacée	Formations végétales denses composées en majorité d'arbustes et d'herbe.	321-322-323-324
Zones humides	Terres basses et humides, susceptibles aux inondations	411-421

Les occupations de sols favorables pour chaque groupe d'équidés ont été sélectionnés parmi les terrains du Tableau 2 par une sollicitation d'experts spécialisés dans les équidés (ce sont les mêmes experts que pour la partie pondération des facteurs de risque). Enfin, chaque effectif de groupe d'équidés par département est réparti dans les communes du même département selon la proportion de surface de sol favorable de la commune.

B. Pondération des facteurs de risque

Pour quatre des cinq catégories de facteurs de risque (météorologique, végétation, hôtes et équidés) ainsi que pour l'étape d'agrégation des catégories liées aux tiques pour former la carte de présence des tiques, un modèle d'Analyse Hiérarchique des Procédés (AHP) a été effectué pour pondérer chaque facteur de risque par catégorie. Concernant la cinquième catégorie de facteur de risque (l'altitude), l'utilisation de l'AHP n'était pas nécessaire. L'AHP permet de prendre en compte l'avis d'expert en comparant deux à deux chaque facteur de risque, puis l'ensemble de ces comparaisons permettent de calculer des coefficients de pondération pour chaque facteur (Saaty TL, 1980). Les experts sollicités sont des scientifiques travaillant sur la biologie de la tique *I. ricinus* ou sur les équidés en France. Ces experts ont été classés en deux groupes, les experts « tiques » pouvant répondre aux catégories liées aux tiques et les experts « équidés » pouvant répondre aux catégories liées aux équidés. Les choix des experts ont été recueillis sous la forme d'un questionnaire individuel de jugement leur permettant de comparer les facteurs de risque deux à deux. Aucune concertation n'a été effectuée entre les experts pour répondre au questionnaire. L'agrégation des jugements des experts et les calculs des coefficients ont été réalisés par l'intermédiaire de l'outil Excel développé par K. Goepel (version datant du 08/07/2022) (Goepel, 2013). L'utilisation de l'AHP dans la création des cartes de risque est présentée dans la Figure 5, sous la forme des « Avis d'experts ». Les questionnaires, les catégories liées aux tiques et aux équidés utilisées ainsi que la sélection des experts et leur répartition sont détaillés dans l'Annexe n°8. La cohérence des réponses des experts est évaluée par deux indices : le ratio de cohérence (RC) et l'indice de cohérence géographique (ICG). Les réponses sont jugées cohérentes lorsque le RC est inférieur à 10% et que l'ICG est inférieur à 0,35 (Saaty TL, 1980 ; Aguarón et Moreno-Jiménez, 2003).

C. Formation de la carte de risque d'exposition

Pour chaque mois de la période d'activité des tiques *I. ricinus* (avril, mai et juin), les variables relatives à chaque facteur de risque ont été normalisées de 0 à 1 selon leur minimum et leur maximum, et ont été ensuite agrégées par une somme pondérée par les coefficients déterminés par l'AHP. Finalement, une valeur de risque d'exposition des équidés vis-à-vis de la tique *I. ricinus* en France a été obtenue pour chaque commune et pour chaque mois de la période d'activité d'*I. ricinus* en effectuant la somme des différentes variables associées aux facteurs de risque pondérées par les coefficients établis par l'AHP, suivi de la multiplication des valeurs de la carte de présence et d'activité de tiques par les valeurs de la carte de présence d'équidés. L'agrégation des différents facteurs a été fait selon le schéma présenté dans la figure 4.

3. Résultats

A. Facteurs de risque

Les cartes des variables représentant les différents facteurs de risque (météorologique, altitude, végétation, hôtes et équidés) à l'échelle communale sont visibles dans l'Annexe n°9. Aucune valeur de risque d'exposition des équidés vis-à-vis d'*I. ricinus* n'a pu être évaluée pour les deux communes de l'île de Sein et l'île d'Ouessant car aucune donnée météorologique n'était disponible sur le modèle SIM de météo France pour ces deux communes.

Pour les variables météorologiques, on observe des températures favorables à la présence et à l'activité d'*I. ricinus* principalement au mois de mai, alors que l'humidité relative de l'air est particulièrement favorable durant le mois d'avril. Le nord et l'ouest de la France sont des zones particulièrement favorables aux tiques concernant la température et l'humidité, quel que soit le mois de la période d'activité d'*I. ricinus*. Concernant les catégories d'altitudes favorables à la présence et à l'activité d'*I. ricinus*, on observe que la plupart du territoire français est favorable à la présence et à l'activité d'*I. ricinus*. Seuls le Massif central, les Pyrénées et les Alpes ont des altitudes supérieures à 1000 m, ce qui diminue la probabilité d'observer des tiques à l'affût. Pour les proportions de surface occupées pour chaque type de végétation, les types bois, forêt mixte, haie et lande ligneuse ont des répartitions homogènes sur toute la France, alors que les types de végétation forêt de conifères, forêt de feuillus, forêt ouverte, peupleraie, verger et vigne ont des répartitions hétérogènes sur toute la France, notamment les types forêt de conifères et vignes avec des proportions de surface plus élevées au niveau du sud et sud-ouest de la France. Concernant les proportions de présence des mammifères sauvages hôtes des tiques, certaines espèces ont des répartitions homogènes sur toute la France, c'est le cas pour le chevreuil, et le mulot sylvestre. Le cerf élaphe va avoir des proportions proches de 100% sur les massifs, et nulles sur le reste du territoire français. Concernant le campagnol roussâtre, on observe des proportions de présence plus élevées au niveau du sud de la France, avec des valeurs nulles sur le pourtour méditerranéen. Pour les classes d'abondance des oiseaux, les deux espèces présentent des zones de classes d'abondance élevées sur toute la France. On observe cependant des classes d'abondances faibles pour la grive musicienne au niveau du pourtour méditerranéen.

Enfin, concernant les effectifs des équidés, on observe une prédominance de chevaux de selle comparés aux autres groupes d'équidés en France, avec une répartition hétérogène des chevaux de selle dans le pays et une concentration plus élevée au niveau de la Normandie et du centre de la France. On observe une forte hétérogénéité sur le territoire français pour les chevaux de course, se situant principalement en Normandie, et au contraire une homogénéité chez les chevaux de trait et les ânes avec des densités légèrement supérieures au niveau du Massif Central pour les chevaux de trait et au niveau de la Bretagne et du Pays de la Loire pour les ânes.

B. Pondération des facteurs de risque

La hiérarchisation des facteurs de risque obtenue après l'AHP est synthétisée dans le tableau 3. Ici le RC et l'ICG sont inférieurs à 10% et 0.35 pour toutes les catégories, on peut donc juger la réponse des experts comme cohérente.

Au niveau des réponses d'experts, huit experts parmi les dix sélectionnés ont pu répondre au questionnaire (Mme Maud MARSOT, Mme Coralie LUPO, Mme Isabelle LEBERT, Mme Séverine BORD, Mme Sarah BONNET, Mme Christel MARCILLAUD-PITEL, Mme Marie DELERUE, et Mme Anne-Lise PEPIN), avec quatre réponses concernant les questions sur la présence et l'activité des tiques, et six réponses concernant les questions sur la présence d'équidés.

Concernant les tendances, les experts ont jugé que l'humidité (66,3%) était un facteur plus favorable à la présence et à l'activité des tiques *I. ricinus* que la température (33,7%). Concernant les hôtes, les espèces étant jugées les plus aptes à maintenir l'activité et la présence d'*I. ricinus* parmi les six espèces choisies ont été le mulot sylvestre (28,1%), le chevreuil (26,8%) et le campagnol roussâtre (21,2%). Pour les catégories de végétation, les poids sont généralement plus élevés pour les forêts, avec des poids élevés attribués aux catégories forêt fermée de feuillus (25,1%) et forêt fermée mixte (23,0%). Concernant les quatre catégories de facteurs de risques favorisant la présence et l'activité des tiques, les hôtes des tiques ont été jugés le facteur le plus important (33,2%), suivi de la météo (30,2%), de la végétation (22,7%) et de l'altitude (13,9%). Enfin, concernant les groupes d'équidés étant en contact avec les tiques *I. ricinus*, les ânes (42,3%) et les chevaux de trait (41,1%) ont été jugés les plus favorables comparé aux chevaux de selle (11,7%) et aux chevaux de course (5,0%).

Concernant le choix pour les occupations de sol favorables à la présence d'équidés, nous avons sélectionnés uniquement les occupations de sol pour lesquelles quatre experts ou plus les ont jugés favorables à la présence d'équidés. Les choix des experts sont visibles sur le tableau 4. On remarque que le groupe des chevaux de trait est le groupe d'équidés avec le plus d'occupations de sol favorable (huit sur neuf occupations de sol favorables). Au contraire, le groupe des chevaux de course est le groupe avec le moins d'occupations de sol favorables (trois sur neuf occupations de sol favorables). On remarque que les chevaux de trait occupent principalement des occupations de sol comportant de la végétation. Les chevaux de course occupent principalement soit les lieux de compétition (comme les hippodromes compris dans l'occupation de sol « Equipements sportifs et de loisirs »), soit des lieux d'habitation comme les prairies ou les zones arbustives. Pour les chevaux de selle et les ânes, ils occupent tous les deux six occupations de sol sur neuf, avec un mixte entre les occupations de sols d'habitation (les écuries compris dans l'occupation de sol « Equipements sportifs et de loisirs », les prairies et les zones arbustives) et les occupations de sols qui correspondraient à de la promenade (espaces verts urbains, zones humides, zones agricoles hétérogènes et forêts).

Tableau 3 : Pondération des facteurs de risque liés à la présence et l'activité des tiques

Catégorie	Facteurs de risque	Poids	Ratio de cohérence (RC)	Indice de cohérence géométrique (ICG)
Météo	Température	33,7%	/	/
	Humidité	66,3%		
Hôtes	Cerf élaphe	5,5%	0,3%	0,01
	Chevreuril	26,8%		
	Mulot sylvestre	28,12%		
	Campagnol roussâtre	21,2%		
	Merle noir	9,3%		
	Grive musicienne	9,1%		
Végétation	Forêt ouverte	11,7%	3,2%	0,12
	Forêt fermée de feuillus	25,1%		
	Forêt fermée de conifères	4,5%		
	Haie	7,7%		
	Bois	11,8%		
	Forêt fermée mixte	23,0%		
	Lande ligneuse	3,9%		
	Peupleraie	5,0%		
	Verger	5,0%		
	Vigne	2,2%		
Catégories	Météo	30,2%	1.4%	0,05
	Altitude	13,9%		
	Végétation	22,7%		
	Hôtes	33,2%		
<i>Equidés vis-à-vis des tiques</i>	Chevaux de trait	41,1%	4,1%	0,15
	Chevaux de course	5,0%		
	Chevaux de selle	11,7%		
	Ânes	42,3%		

Tableau 4 : Nombre d'experts ayant choisis les occupations de sol favorables à la présence d'équidés pour chaque groupe d'équidés sur les 6 experts interrogés.

En vert, les occupations de sol retenus, et en rouge les occupations de sol rejetés.

Terrains	Groupes d'équidés			
	Trait	Course	Selle	Anes
Espaces verts urbains	4	2	5	5
Equipements sportifs et de loisirs	3	6	6	5
Terres arables	4	0	0	3
Vergers et vignes	5	0	0	2
Prairies	6	5	6	6
Zones agricoles hétérogènes	5	3	3	6
Forêts	6	3	6	3
Milieus à végétation arbustive et/ou herbacée	6	4	6	6
Zones humides	4	3	4	4

C. Cartes de présence et d'activité des tiques *I. ricinus*, de la présence d'équidés vis-à-vis des tiques et de risque d'exposition des équidés vis-à-vis d'*I. ricinus*

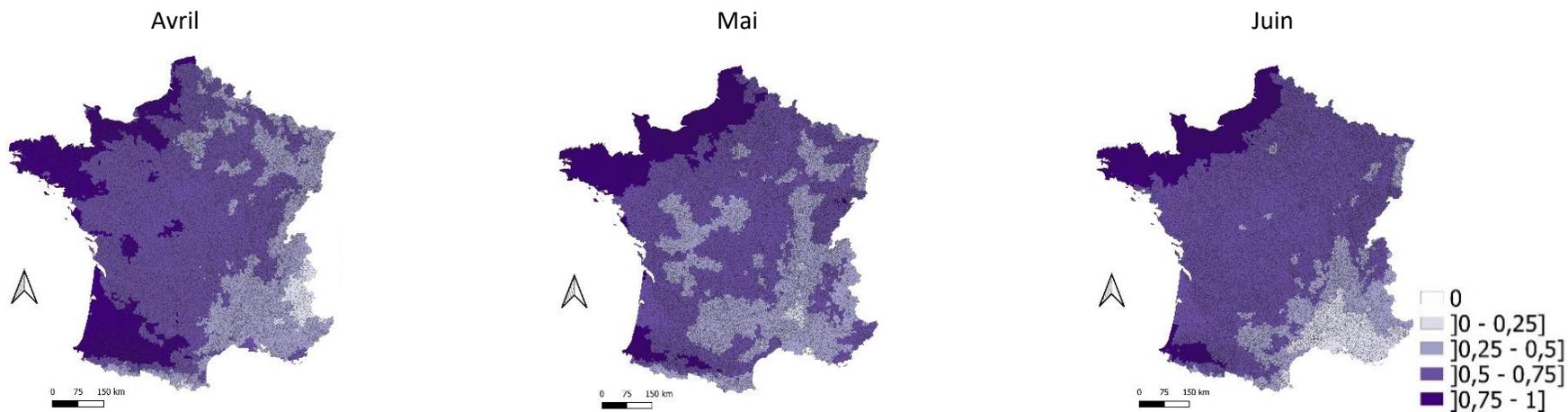
Les cartes pour chaque catégorie de facteurs de risques obtenues par la méthode AHP et l'agrégation des avis d'experts sont représentées sur la figure 5. Parmi les variables associées aux catégories de facteurs de risque liées aux tiques, seules les variables météorologiques variaient selon le mois, les autres restaient fixes au cours du temps, du fait des données utilisées. Concernant la variable météorologique, des zones favorables constantes sur les trois mois sont observées au nord-ouest de la France ainsi que vers la Nouvelle-Aquitaine et les Pyrénées. Les Alpes ainsi que le pourtour méditerranéen sont, au contraire, les zones avec les valeurs de probabilité de présence et d'activités des tiques les plus basses. Pour l'altitude, la plupart du territoire français est favorable à la présence et à l'activité d'*I. ricinus*, seuls le Massif central, les Pyrénées et les Alpes ont des altitudes supérieures à 1000 m, ce qui diminue la probabilité d'observer des tiques à l'affût. Pour les hôtes, la répartition des valeurs de probabilité de présence et d'activités des tiques forment des zones hétérogènes avec des valeurs moins importantes sur le pourtour méditerranéen. Enfin, la carte de végétation montre des valeurs de probabilité de présence et d'activités des tiques moins importantes que celles des autres cartes (avec un maximum à 0,242). Cependant, on remarque certaines zones hétérogènes, avec notamment des valeurs plus basses vers les régions de Normandie, Bretagne, et des Hauts-de-France.

Les variables normalisées associées à chaque facteur de risque ont été regroupés en une carte de probabilités de présence des tiques par mois par la somme pondérée par les coefficients calculés grâce à la méthode AHP et aux avis d'experts. Les cartes de risque liées à la présence des tiques *I. ricinus* et à la présence d'équidés sont visibles sur la figure 6. Concernant les cartes liées à la présence et à l'activité d'*I. ricinus*, on observe une présence sur tout le territoire français, avec des zones favorables sur le nord-ouest et le sud-ouest de la France, et des zones moins favorables au niveau des côtes méditerranéennes. Ces zones restent visibles sur les trois mois d'avril, mai et juin 2022, cependant on observe des différences de valeurs de probabilités plus marquées au mois de mai, avec une diminution des probabilités dans le centre de la France comparé aux autres mois. Concernant la carte des

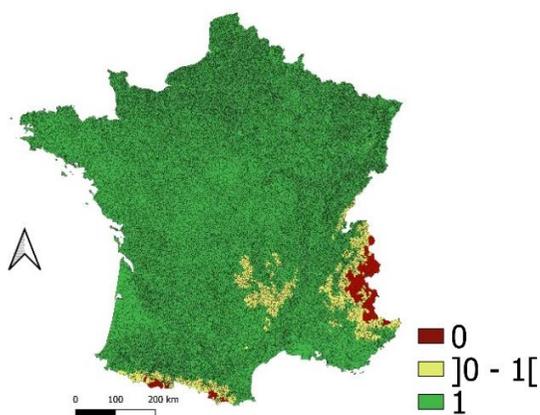
probabilités de présence d'équidés vis-à-vis des tiques, on observe une répartition des valeurs les plus élevées similaire à la répartition des chevaux de selles visible dans l'annexe n°9. Les cartes de risque d'exposition des équidés vis-à-vis des tiques *I. ricinus* par mois formées à partir des cartes de probabilités de présence et d'activité des tiques ainsi que de la carte de probabilité de présence des équidés vis-à-vis des tiques sont représentées sur la figure 6. On observe des valeurs de risque d'exposition comprises entre 0 et 5,6%. On observe très peu d'évolution entre les cartes des différents mois, avec de légères modifications au niveau des communes avec les valeurs de risque les plus faibles. De plus, la répartition des valeurs les plus élevées est très similaire à la répartition des valeurs pour la carte des effectifs d'équidés. Les valeurs les plus élevées sont surtout condensées au nord-ouest, sur le pourtour méditerranéen ainsi qu'au centre de la France.

Figure 5 : Cartes des variables normalisées associées à chaque catégorie de facteurs de risque liés à la présence et à l'activité des tiques *I. ricinus* pour les mois d'avril, mai et juin 2022

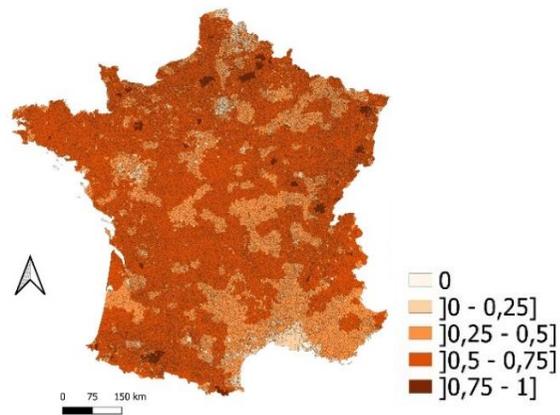
a) Météorologique



b) Altitude



c) Hôtes



d) Végétation

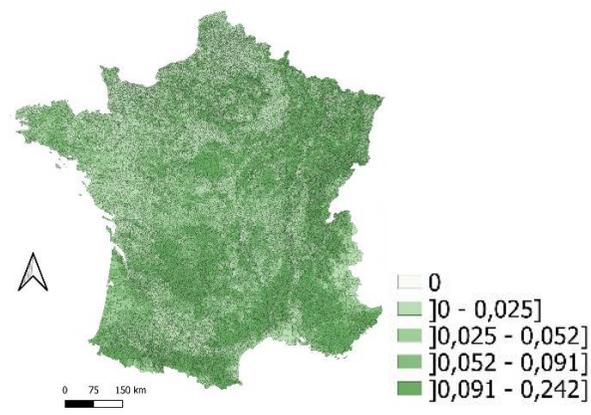
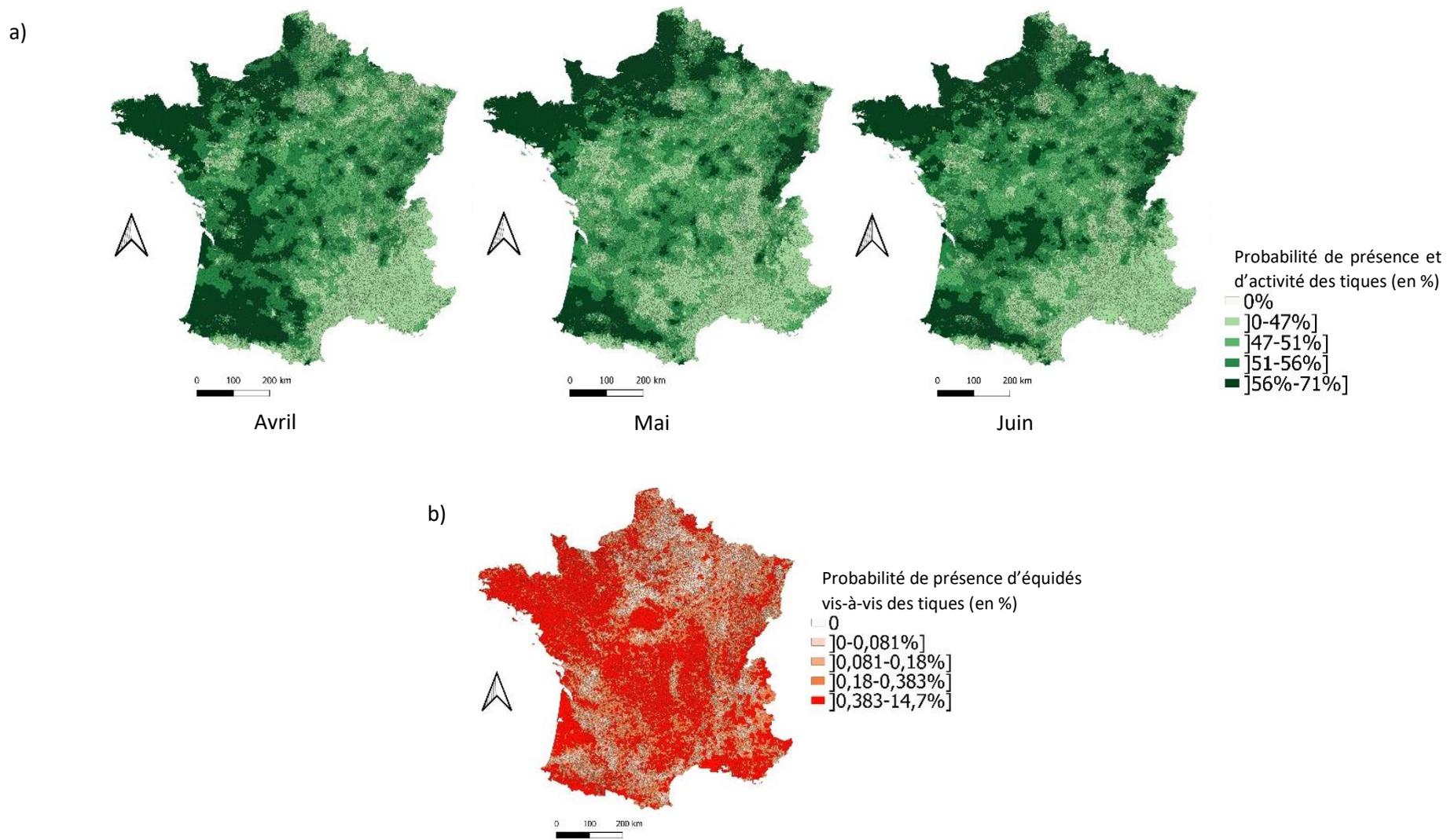
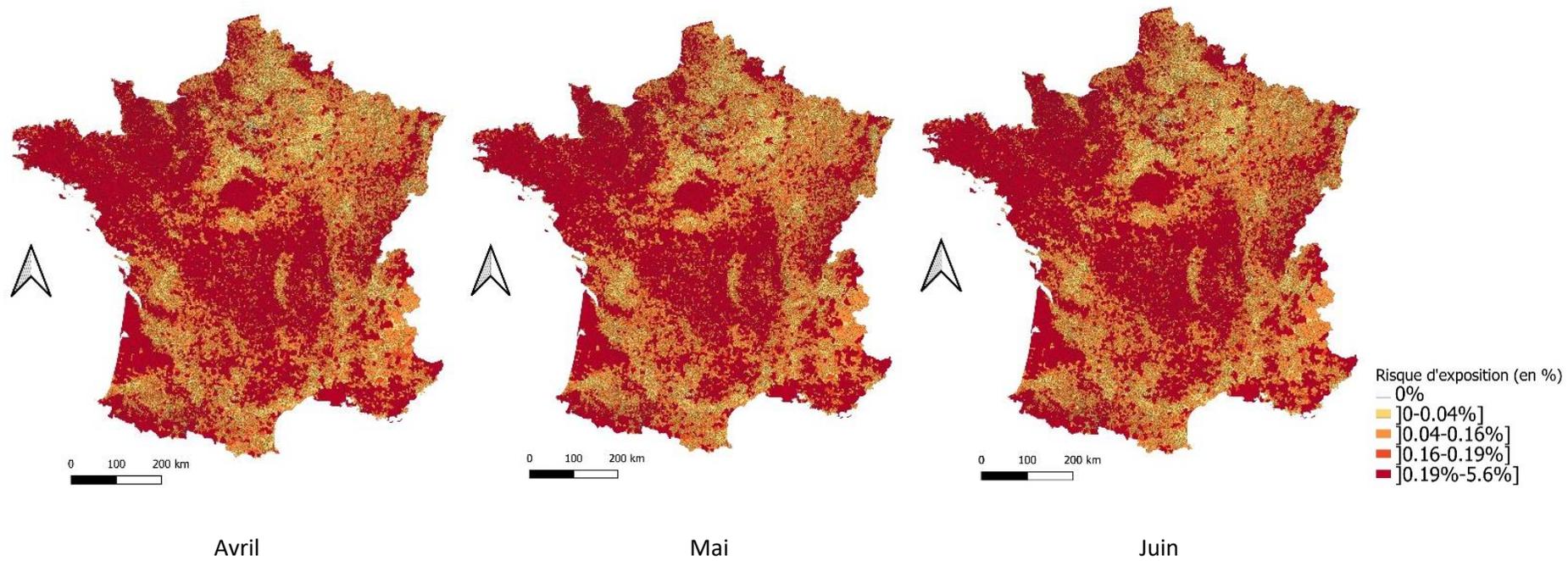


Figure 6 : Cartes de présence et d'activités des tiques *I. ricinus* (a), de probabilité de présence d'équidés vis-à-vis des tiques (b), ainsi que de risque d'exposition des équidés vis-à-vis des tiques *I. ricinus* (c) pour les mois d'Avril, Mai et Juin 2022



c)



4. Discussion

A. Résultats obtenus

L'objectif de cette étude était de représenter le risque d'exposition des équidés vis-à-vis des tiques *I. ricinus* sur la France continentale. Les cartes mensuelles étaient relativement similaires, avec des valeurs élevées condensées au nord-ouest, sur le pourtour méditerranéen ainsi qu'au centre de la France. Toutefois, les valeurs du risque d'exposition étaient plutôt faibles, comprises entre 0 et 5,6%. Il semblerait que la répartition spatiale du risque soit très proche de celle obtenue pour les populations d'équidés, notamment des effectifs chevaux de selle. On peut noter aussi que les probabilités de présence associées aux équidés sont très faibles comparés aux probabilités de présence des tiques, avec un maximum de 14,7% pour les équidés, et de 71% pour les tiques. Ce qui, lors de l'association de ces deux cartes par la formule multiplicative, va inévitablement tendre vers des valeurs faibles et une prédominance des risques élevées comparable à la répartition des probabilités de présence élevées pour les équidés vis-à-vis des tiques. Nous avons choisi la formule multiplicative pour la formation des cartes de risque finales plutôt que la formule additive. En effet, la formule multiplicative nous semblait plus réaliste car, dans l'hypothèse où la probabilité de présence de tique ou d'équidés est nulle dans une commune donnée, on aurait obtenu un risque nul dans cette même commune, ce qui n'est pas le cas par la formule additive où on aurait obtenu une compensation avec un risque d'exposition non nul pour des zones pourtant sans tique ou sans équidé.

Nous avons représenté les cartes de risque pour les mois d'avril, mai et juin, car ces mois correspondent à la saison où la tique est la plus active (Boulanger *et al.*, 2019 ; Kahl et Gray, 2023). Représenter les cartes séparément par mois au lieu de les combiner sur toute la saison permettait d'observer la possibilité d'une évolution temporelle du risque d'avril jusqu'à juin. Concernant l'année, nous avons choisi de représenter les cartes de risque pour l'année 2022 puisque c'était l'année où les données les plus récentes correspondant aux équidés étaient disponibles. Certaines autres sources de données avaient une dernière année de récolte des données antérieure (comme les hôtes par exemple), mais comme l'évolution de la répartition de ces jeux de données a été supposée minime, nous les avons considérés comme constantes jusqu'à l'année 2022. Une autre façon de représenter les cartes de risque aurait pu être de les représenter pour chaque groupe d'équidés, en obtenant quatre cartes pour les mois d'avril mai et juin pour chaque groupe. Cependant, représenter le risque sur des cartes prenant en compte tous les équidés de France permettait de synthétiser les résultats obtenus, en rassemblant tous les groupes d'équidés via la méthode AHP.

Jusqu'à maintenant, aucune étude n'avait mis en relation le risque d'exposition des équidés vis-à-vis des tiques en France via la méthode MCDA, cependant d'autres études ont essayé d'estimer des cartes de présence des tiques *I. ricinus* en France (Lebert *et al.*, 2022). Nous n'avons pas souhaité utiliser ces cartes pour notre étude parce que nous avons voulu recréer une carte de présences des tiques en utilisant des variables plus spécifiques aux tiques (avec par exemple des variables météorologiques à la place des variables de climat), et à la fois en utilisant la méthode de l'AHP pour estimer les poids entre les différentes variables associées à chaque catégorie de facteur de risque.

B. Choix des facteurs de risque et des seuils considérés

Les facteurs de risque pris en compte pour générer la carte de risque ont été sélectionnés d'après une revue de la littérature. Toutefois, des études prennent en compte d'autres facteurs comme le climat (Leoty *et al.*, 2021 ; Lebert *et al.*, 2022) ou les précipitations au lieu de l'humidité pour prédire la densité de tiques (Uusitalo *et al.*, 2022). Cependant, nous avons jugé que le climat n'était pas un facteur assez discriminant entre les communes françaises pour permettre une variation de densité et d'activité des tiques *I. ricinus*, c'est pourquoi nous avons pris en compte des variables météorologiques plus

spécifiques comme la température et l'humidité relative de l'air. Concernant les précipitations, il n'existe pas, à notre connaissance, de valeur seuil où l'activité des tiques est reconnue comme diminuée, contrairement à l'humidité relative de l'air, ce qui permettait de placer aisément une valeur seuil où les jours n'étaient pas considérés comme favorable à la présence et à l'activité des tiques. Les valeurs seuils caractérisant les jours favorables à l'activité des tiques *I. ricinus* concernant les variables météorologiques (10-20°C pour la température et 70% pour l'humidité) ont été choisies d'après l'étude de Beugnet *et al.*, 2009 où il est estimé que l'activité arrive à un optimum à partir de ces valeurs seuils. Cependant, une diminution des densités des tiques a été observé à partir de 80% (Macleod, 1935 ; Gray J., 1998, p. 1 ; Medlock *et al.*, 2013 ; Vollack *et al.*, 2017 ; Perez *et al.*, 2023). Comme nous avons uniquement accès à l'humidité relative moyenne de la journée, nous avons estimé qu'à partir d'une moyenne journalière de 70% d'humidité relative, l'humidité relative pouvait dépasser les 80% à un moment de la journée, et donc permettre l'activité des tiques. Une autre solution aurait pu être d'utiliser une méthode de logique floue linéaire (Vitez *et al.*, 1996) en attribuant une probabilité de compatibilité comprise entre zéro et un pour un jour donné en fonction de la moyenne de température ou d'humidité relative de l'air. Cette probabilité prendrait la valeur de 1 lorsque la température ou l'humidité moyenne est optimale, et diminuerait si elle s'éloignait de ces valeurs jusqu'à arriver à zéro pour les valeurs météorologiques incompatibles avec l'activité des tiques. Cette méthode permettrait une plus grande flexibilité dans la prise en compte des imprécisions ou des incertitudes liées aux seuils d'activité des tiques.

Aucune concertation entre les experts a été effectuée pour répondre au questionnaire. Ce choix a été réalisé car la méthode de l'AHP ne requiert pas une concertation pour attribuer les poids à chaque facteur de risque. Cependant on peut se demander si une concertation n'aurait pas affiné les poids attribués pour chaque facteur de risque en arrivant à un consensus entre les experts, pourtant il n'y avait que peu de variabilité entre les réponses des experts, la mise en commun n'aurait eu que peu d'effet sur les poids obtenus.

C. Choix de la méthode

Concernant le choix de la méthode, nous avons utilisé la méthode MCDA pour la création de la carte de risque. En effet la méthode MCDA permet de calculer un risque à partir de facteurs de risque connus pour le danger identifié, et de combiner des systèmes d'informations géographiques (SIG) couplés à la connaissance et des avis d'experts. L'avantage de l'analyse MCDA est qu'elle est simple d'utilisation, rapide, et nécessite uniquement des facteurs de risque sélectionnés, contrairement à d'autres méthodes d'analyse de risque comme le machine learning où il est nécessaire d'entraîner une intelligence artificielle sur un jeu de données. L'Analyse hiérarchique des procédés (AHP) a été utilisée pour hiérarchiser et pondérer les facteurs de risque. En effet, l'AHP est utilisée dans plus de 80% des études incluant la méthode MCDA couplé avec les SIG (Huang *et al.*, 2011). Elle permet de prendre en compte les avis d'experts de la manière la plus simple dans le temps qui nous était imparti, comparé aux autres méthodes de pondérations de facteurs (Concordance/discordance, Théorie de l'Utilité Multi-Attribut (MAUT)... (Valim *et al.*, 2013)). Pour mener à bien cette analyse, nous avons utilisés l'avis de huit experts, avec quatre réponses aux questionnaires portant sur la présence et l'activité des tiques et six réponses aux questionnaires portant sur la présence d'équidés. Il n'y a à notre connaissance pas de nombre d'experts minimum pour déterminer la fiabilité des résultats. Nous sommes donc à même de nous demander si le nombre de jugements est suffisant. Les valeurs déterminant la cohérence des réponses d'experts étaient en-dessous des valeurs seuils (avec le RC inférieur à 10% et l'ICG inférieur à 0.35), on peut donc estimer la cohérence des résultats comme très favorable. La principale limite de cette méthode est la subjectivité des réponses. Un manque de précision sur la définition de certaines catégories de réponses a pu être observé. Par exemple, notre définition du groupe « chevaux de course » basée sur les définitions de l'IFCE ne permettait pas de différencier les chevaux de course à

l'entraînement de ceux utilisés pour la reproduction, alors que ces deux catégories de chevaux ont des modes de vie différents, et donc une exposition aux tiques qui peut être modifiée. En effet, les chevaux d'élevage vivent dans des pâtures alors que les chevaux à l'entraînement sont plus souvent hébergés au box.

D. Choix des sources de données

Nous avons voulu utiliser des sources de données disponibles en France et facilement accessibles dans le cadre du stage. Toutes les sources de données étaient donc accessibles gratuitement à partir des données d'institutions publiques (OFB, IGN...) ou de résultats d'études en libre accès (Lumbierres *et al.*, 2022). Nous avons essayé de privilégier des sources françaises lorsqu'elles étaient disponibles (OFB, IGN, modèle SIM pour les données météorologiques...) car nous avons estimé que les modèles à l'échelle de la France étaient plus exacts que les modèles internationaux (par exemple les modèles Copernicus pour les variables météorologiques disponibles à l'échelle mondiale). Pour les données de végétation, nous avons choisi les données de la base de données BD TOPO qui possédait des types de végétation permettant de catégoriser les différentes densités d'*I. ricinus* selon les catégories de végétation, contrairement à d'autres sources de catégorisation de la végétation comme la BD FORET de l'IGN ou le Corine Land Cover. En effet, on retrouve dans la BD TOPO des types de végétations les différents types de forêts comme les forêts de conifères, de feuillus et les forêts ouvertes et d'autres végétations de types arbustives comme les landes ligneuses dont il est avéré que ces différences jouent sur les densités de tiques (Degeilh *et al.*, 1994 ; Medlock *et al.*, 2013 ; Sormunen *et al.*, 2016). Concernant le choix de la source de données des occupations de sols favorables à la présence d'équidés, nous avons choisi la base de données Corine Land Cover 2018 puisqu'elle prenait en compte tous les types de sols les plus favorables pour chaque groupe d'équidés ; comme les hippodromes pour les chevaux de course et les forêts et prairies pour les chevaux de trait et les ânes. Cependant, les occupations de sol de Corine land cover restent relativement floue dans leur définition par rapport à la présence d'équidés. En effet nous avons considéré l'occupation « Equipement sportifs et de loisirs » en totalité, par manque de temps, alors que les hippodromes ne représentent qu'une minorité des infrastructures de cette occupation de sol, qui comprend toutes les infrastructures humaines sportives et de loisirs (gymnases, terrains de sport en extérieur...). Une façon de contourner ce problème aurait pu être de prendre en compte uniquement les localisations des écuries et des hippodromes pour affiner cette occupation de sol. Les localisations de ces infrastructures sont disponibles en libre-service sur le site de France Galop ou du Trot, sociétés mères gérant les courses hippiques en France.

E. Perspectives

Les cartes réalisées sont incluses dans un travail de préparation à une thèse dont l'objectif est de représenter une carte de risque des équidés vis-à-vis de l'infection à *Borrelia burgdorferi* s.l. L'objectif des cartes que nous avons réalisé étaient d'observer ce qu'il était possible de réaliser dans un temps relativement court, pour ensuite perfectionner la création des futures cartes de risque réalisées dans la thèse. Par manque de temps, nous n'avons pas pu réaliser deux étapes pourtant cruciales pour finaliser l'analyse MCDA : la vérification des résultats obtenus et la réalisation d'une analyse de sensibilité (Leoty *et al.*, 2021 ; Lebert *et al.*, 2022). L'une des méthodes que l'on aurait pu employer pour réaliser la vérification des résultats aurait pu être de comparer les valeurs de risque obtenus sur les cartes finales avec des valeurs de charge en tique observées sur des équidés durant la même période, par des enquêtes de terrain. Des charges en tiques ont été récoltées sur des chevaux de trait en Auvergne-Rhône-Alpes en avril et mai 2021 dans l'étude de Nadal, 2023. Nous aurions pu comparer les valeurs de charges en tiques récoltées sur les chevaux de trait avec les valeurs de risque calculées des communes correspondantes pour des cartes réalisées pour les périodes d'avril et mai 2021 à l'aide d'un test statistique de corrélation, comme le test de Pearson ou Spearman. Concernant la deuxième étape, l'objectif d'une analyse de sensibilité consiste à modifier légèrement les variables contribuant

à la formation de la carte de risque selon un certain pourcentage (20-25% usuellement (Leoty *et al.*, 2021)) afin d'apprécier quelles sont les variables ayant le plus d'impact sur les valeurs de risque obtenues. Au vu de nos résultats, il aurait pu être intéressant d'effectuer une analyse de sensibilité sur les effectifs d'équidés obtenus, que l'on soupçonne être la variable avec le plus d'impact sur les résultats, car les cartes ont une répartition du risque très semblable à la répartition de probabilité de présence d'équidés. Les autres variables dont il aurait pu être intéressant d'effectuer une analyse de sensibilité sont les coefficients relatifs à chaque facteur de risque obtenus par la méthode AHP. En effet, on a pu observer que la répartition des probabilités de présence de tiques étaient similaires avec la répartition des valeurs des variables météorologiques, et ces variables avaient les coefficients les plus élevés. En faisant varier selon un certain pourcentage les valeurs de ces coefficients, on aurait pu observer si les coefficients obtenus avaient un impact significatif sur la répartition des probabilités de présence de tiques en France, et *in fine*, sur les valeurs de risque d'exposition des équidés vis-à-vis des tiques.

Conclusion

Notre étude avait pour objectif d'évaluer et de cartographier le risque d'exposition des équidés vis-à-vis de la tique *I. ricinus* en France métropolitaine à l'échelle communale pour la période d'activité de la tique *I. ricinus* de l'année 2022. Pour cela, nous avons identifié, d'après une revue bibliographique, quatre catégories de facteurs de risque liés aux tiques (météorologique, altitude, végétation et hôtes). En assemblant chaque variable associée à chaque catégorie de facteur de risque avec une cinquième variable liée à la présence d'équidés grâce à la méthode MCDA, nous avons pu former une carte de risque d'exposition des équidés vis-à-vis des tiques *I. ricinus* par mois considéré.

Les résultats obtenus présentent des risques faibles, avec un maximum à 5,6%. On a observé des zones à risque élevés aux alentours de la Bretagne, de la Normandie ainsi qu'au centre de la France. Ces zones restaient visibles sur les trois mois de la période d'activité d'*I. ricinus* avec peu de variation temporelle. Nous avons observé que la répartition du risque d'exposition visible sur les trois cartes était très similaire à la répartition des probabilités de présence des équidés vis-à-vis des tiques et plus particulièrement, à la répartition des effectifs des chevaux de selle. Une vérification des résultats obtenus avec des données de collecte de tiques sur des équidés pourrait être effectué, afin de vérifier si les résultats correspondent à des observations de terrain. Une analyse de sensibilité pourrait aussi être effectuée pour apprécier l'impact des variables utilisées sur les valeurs et la répartition du risque d'exposition.

Liste des références bibliographiques

- ADAMSKA, M. (2020) The role of different species of wild ungulates and *Ixodes ricinus* ticks in the circulation of genetic variants of *Anaplasma phagocytophilum* in a forest biotope in north-western Poland. *Ticks and Tick-Borne Diseases* vol. 11, n° 5, p. 101465. [https://doi.org/10.1016/j.ttbdis.2020.101465]
- AGOULON, A., BUTET, A., HOCH, T., *et al.* (2017) 3. Dynamique des populations de tiques et liaison avec les facteurs environnementaux. In Boulanger, N., McCoy, K.D. (Éd.), *Tiques et maladies à tiques : Biologie, écologie évolutive, épidémiologie, Didactiques*. Marseille, IRD Éditions, p. 85-112. [https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.9027]
- AGUARÓN, J., MORENO-JIMÉNEZ, J.M. (2003) The geometric consistency index: Approximated thresholds. *European Journal of Operational Research* vol. 147, n° 1, p. 137-145. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00255-2]
- ALFREDSSON, M., OLAFSSON, E., EYDAL, M., *et al.* (2017) Surveillance of *Ixodes ricinus* ticks (Acari: Ixodidae) in Iceland. *Parasites & Vectors* vol. 10, n° 1, p. 1-11. [https://doi.org/10.1186/s13071-017-2375-2]
- ALI, A., ZAHID, H., ZEB, I., *et al.* (2021) Risk factors associated with tick infestations on equids in Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan, with notes on *Rickettsia massiliae* detection. *Parasites & Vectors* vol. 14, n° 1, p. 1-12. [https://doi.org/10.1186/s13071-021-04836-w]
- BELOZEROV, V.N., FOURIE, L.J., KOK, D.J. (2002) Photoperiodic Control of Developmental Diapause in Nymphs of Prostriate Ixodid Ticks (Acari: Ixodidae). *Experimental & Applied Acarology* vol. 28, n° 1, p. 163-168. [https://doi.org/10.1023/A:1025377829119]
- BEUGNET, F., CHALVET-MONFRAY, K., LOUKOS, H. (2009) FleaTickRisk: A meteorological model developed to monitor and predict the activity and density of three tick species and the cat flea in Europe. *Geospatial health* vol. 4, p. 97-113. [https://doi.org/10.4081/gh.2009.213]
- BOULANGER, N., BOYER, P., TALAGRAND-REBOUL, E., *et al.* (2019) Ticks and tick-borne diseases. *Médecine et Maladies Infectieuses, Maladie de Lyme* vol. 49, n° 2, p. 87-97. [https://doi.org/10.1016/j.medmal.2019.01.007]
- BOYARD, C., BARNOUIN, J., GASQUI, P., *et al.* (2007) Local environmental factors characterizing *Ixodes ricinus* nymph abundance in grazed permanent pastures for cattle. *Parasitology* vol. 134, n° 7, p. 987-994. [https://doi.org/10.1017/S0031182007002351]
- BREGNARD, C., RAIS, O., HERRMANN, C., *et al.* (2021) Beech tree masting explains the inter-annual variation in the fall and spring peaks of *Ixodes ricinus* ticks with different time lags. *Parasites & Vectors* vol. 14, n° 1, p. 570. [https://doi.org/10.1186/s13071-021-05076-8]
- BROWN, L., MEDLOCK, J., MURRAY, V. (2014) Impact of drought on vector-borne diseases – how does one manage the risk? *Public Health* vol. 128, n° 1, p. 29-37. [https://doi.org/10.1016/j.puhe.2013.09.006]
- CAT, J., BEUGNET, F., HOCH, T., *et al.* (2017) Influence of the spatial heterogeneity in tick abundance in the modeling of the seasonal activity of *Ixodes ricinus* nymphs in Western Europe. *Experimental and Applied Acarology* vol. 71, n° 2, p. 115-130. [https://doi.org/10.1007/s10493-016-0099-1]
- CHEMINI, C., RIZZOLI, A., MERLER, S., *et al.* (1997) *Ixodes ricinus* (Acari: Ixodidae) infestation on roe deer (*Capreolus capreolus*) in Trentino, Italian Alps. *Parassitologia* vol. 39, n° 1, p. 59-63.
- CICCULLI, V., CAPAI, L., QUILICHINI, Y., *et al.* (2019) Molecular investigation of tick-borne pathogens in ixodid ticks infesting domestic animals (cattle and sheep) and small rodents (black rats) of Corsica, France. *Ticks and Tick-Borne Diseases* vol. 10, n° 3, p. 606-613. [https://doi.org/10.1016/j.ttbdis.2019.02.007]
- DANTAS-TORRES, F., OTRANTO, D. (2013) Seasonal dynamics of *Ixodes ricinus* on ground level and higher vegetation in a preserved wooded area in southern Europe. *Veterinary Parasitology* vol. 192, n° 1-3, p. 253-258. [https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2012.09.034]

- DE SOUSA, R., LOPES DE CARVALHO, I., SANTOS, A.S., *et al.* (2012) Role of the lizard *Teira dugesii* as a potential host for *Ixodes ricinus* tick-borne pathogens. *Applied and Environmental Microbiology* vol. 78, n° 10, p. 3767-3769. [<https://doi.org/10.1128/AEM.07945-11>]
- DEGEILH, P., GUIGUEN, C., GILOT, B., *et al.* (1994) Distribution of *Ixodes ricinus* (Linne, 1758) (Acarina: Ixodidae) in the forest regions of the Massif Armoricain. *Acarologia* vol. 35, n° 4, p. 327-334.
- DIVERS, T. J., GARDNER, R. B., MADIGAN, J. E., *et al.* (2018) *Borrelia burgdorferi* Infection and Lyme Disease in North American Horses: A Consensus Statement. *Journal of Veterinary Internal Medicine* vol. 32, n° 2, p. 617-632. [<https://doi.org/10.1111/jvim.15042>]
- DOBSON, A.D.M., TAYLOR, J.L., RANDOLPH, S.E. (2011) Tick (*Ixodes ricinus*) abundance and seasonality at recreational sites in the UK: Hazards in relation to fine-scale habitat types revealed by complementary sampling methods. *Ticks and Tick-borne Diseases* vol. 2, n° 2, p. 67-74. [<https://doi.org/10.1016/j.ttbdis.2011.03.002>]
- ESTRADA-PEÑA, A., AYLLÓN, N., DE LA FUENTE, J. (2012) Impact of Climate Trends on Tick-Borne Pathogen Transmission. *Frontiers in Physiology* vol. 3, p. 64. [<https://doi.org/10.3389/fphys.2012.00064>]
- FALCHI, A., DANTAS-TORRES, F., LORUSSO, V., *et al.* (2012) Autochthonous and migratory birds as a dispersion source for *Ixodes ricinus* in southern Italy. *Experimental and Applied Acarology* vol. 58, n° 2, p. 167-174. [<https://doi.org/10.1007/s10493-012-9571-8>]
- GETHMANN, J., HOFFMANN, B., KASBOHM, E., *et al.* (2020) Research paper on abiotic factors and their influence on *Ixodes ricinus* activity-observations over a two-year period at several tick collection sites in Germany. *Parasitology Research* vol. 119, n° 5, p. 1455-1466. [<https://doi.org/10.1007/s00436-020-06666-8>]
- GOEPEL, K. (2013) Implementing the Analytic Hierarchy Process as a Standard Method for Multi-Criteria Decision Making in Corporate Enterprises – a New AHP Excel Template with Multiple Inputs. [<https://doi.org/10.13033/isahp.y2013.047>]
- GRAY J. (1998) Review The ecology of ticks transmitting Lyme borreliosis. *Experimental & Applied Acarology* vol. 22, n° 5, p. 249-258. [<https://doi.org/10.1023/A:1006070416135>]
- GRAY, J. (1991) The development and seasonal activity of the tick *Ixodes ricinus*: a vector of Lyme borreliosis. [<https://www.semanticscholar.org/paper/The-development-and-seasonal-activity-of-the-tick-a-Gray/fb76b59bf37d1ad634caf043832e4af2d1a00b93>] (consulté le 08/01/2024).
- GRAY, J.S., DAUTEL, H., ESTRADA-PEÑA, A., *et al.* (2009) Effects of Climate Change on Ticks and Tick-Borne Diseases in Europe. *Interdisciplinary Perspectives on Infectious Diseases* vol. 2009, p. e593232. [<https://doi.org/10.1155/2009/593232>]
- GRAY, J.S., KAHL, O., LANE, R.S., *et al.* (2016) Diapause in ticks of the medically important *Ixodes ricinus* species complex. *Ticks and Tick-borne Diseases* vol. 7, n° 5, p. 992-1003. [<https://doi.org/10.1016/j.ttbdis.2016.05.006>]
- GREENFIELD, B.P.J. (2011) Environmental parameters affecting tick (*Ixodes ricinus*) distribution during the summer season in Richmond Park, London. *Bioscience Horizons: The International Journal of Student Research* vol. 4, n° 2, p. 140-148. [<https://doi.org/10.1093/biohorizons/hzr016>]
- HOFMEESTER, T. (2016) The wild life of tick-borne pathogens. [<https://doi.org/10.18174/393112>]
- HOFMEESTER TIM R., KRAWCZYK AI, VAN LEEUWEN AD, *et al.* (2018) Role of mustelids in the life-cycle of ixodid ticks and transmission cycles of four tick-borne pathogens. *Parasites & vectors* vol. 11, n° 1. [<https://doi.org/10.1186/s13071-018-3126-8>]
- HOFMEESTER, T.R., COIPAN, E.C., WIEREN, S.E. van, *et al.* (2016) Few vertebrate species dominate the *Borrelia burgdorferi* s.l. life cycle. *Environmental Research Letters* vol. 11, n° 4, p. 043001. [<https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/4/043001>]
- HUANG, I.B., KEISLER, J., LINKOV, I. (2011) Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: Ten years of applications and trends. *Science of The Total Environment* vol. 409, n° 19, p. 3578-3594. [<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.06.022>]

- JAENSON TG, LINDGREN E (2011) The range of *Ixodes ricinus* and the risk of contracting Lyme borreliosis will increase northwards when the vegetation period becomes longer. *Ticks and tick-borne diseases* vol. 2, n° 1. [<https://doi.org/10.1016/j.ttbdis.2010.10.006>]
- JAENSON, T.G.T., JAENSON, D.G.E., EISEN, L., *et al.* (2012) Changes in the geographical distribution and abundance of the tick *Ixodes ricinus* during the past 30 years in Sweden. *Parasites & Vectors* vol. 5, p. 8. [<https://doi.org/10.1186/1756-3305-5-8>]
- JANZÉN, T., HAMMER, M., PETERSSON, M., *et al.* (2023) Factors responsible for *Ixodes ricinus* presence and abundance across a natural-urban gradient. *PLOS ONE* vol. 18, n° 5, p. e0285841. [<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0285841>]
- JONES, C.J., KITRON, U.D. (2000) Populations of *Ixodes scapularis* (Acari: Ixodidae) Are Modulated by Drought at a Lyme Disease Focus in Illinois. *Journal of Medical Entomology* vol. 37, n° 3, p. 408-415. [<https://doi.org/10.1093/jmedent/37.3.408>]
- JORDAN, R.A., SCHULZE, T.L. (2020) Artificial Accumulation of Leaf Litter in Forest Edges on Residential Properties via Leaf Blowing Is Associated with Increased Numbers of Host-Seeking *Ixodes scapularis* (Acari: Ixodidae) Nymphs. *Journal of Medical Entomology* vol. 57, n° 4, p. 1193-1198. [<https://doi.org/10.1093/jme/tjaa033>]
- JOE, S., VILJUGREIN, H., HOFSHAGEN, M., *et al.* (2011) Multi-source analysis reveals latitudinal and altitudinal shifts in range of *Ixodes ricinus* at its northern distribution limit. *Parasites & Vectors* vol. 4, n° 1, p. 84. [<https://doi.org/10.1186/1756-3305-4-84>]
- KAHL, O., GRAY, J.S. (2023) The biology of *Ixodes ricinus* with emphasis on its ecology. *Ticks and Tick-borne Diseases* vol. 14, n° 2, p. 102114. [<https://doi.org/10.1016/j.ttbdis.2022.102114>]
- KAHL, O., KNÜLLE, W. (1988) Water vapour uptake from subsaturated atmospheres by engorged immature ixodid ticks. *Experimental & Applied Acarology* vol. 4, n° 1, p. 73-83. [<https://doi.org/10.1007/BF01213843>]
- KAMRAN, K., ALI, A., VILLAGRA, C., *et al.* (2021) A cross-sectional study of hard ticks (acari: ixodidae) on horse farms to assess the risk factors associated with tick-borne diseases. *Zoonoses and Public Health* vol. 68, n° 3, p. 247-262. [<https://doi.org/10.1111/zph.12809>]
- KIFFNER, C., LÖDIGE, C., ALINGS, M., *et al.* (2010) Abundance estimation of *Ixodes* ticks (Acari: Ixodidae) on roe deer (*Capreolus capreolus*). *Experimental & Applied Acarology* vol. 52, n° 1, p. 73-84. [<https://doi.org/10.1007/s10493-010-9341-4>]
- KJELLANDER P, BERGVALL UA, CHIRICO J, *et al.* (2023) Winter activity of *Ixodes ricinus* in Sweden. *Parasites & vectors* vol. 16, n° 1. [<https://doi.org/10.1186/s13071-023-05843-9>]
- KRÓL, N., CHITIMIA-DOBLER, L., DOBLER, G., *et al.* (2020) Tick burden on European roe deer (*Capreolus capreolus*) from Saxony, Germany, and detection of tick-borne encephalitis virus in attached ticks. *Parasitology Research* vol. 119, n° 4, p. 1387-1392. [<https://doi.org/10.1007/s00436-020-06637-z>]
- LABRUNA, M.B., KERBER, C.E., FERREIRA, F., *et al.* (2001) Risk factors to tick infestations and their occurrence on horses in the state of São Paulo, Brazil. *Veterinary Parasitology* vol. 97, n° 1, p. 1-14. [[https://doi.org/10.1016/s0304-4017\(01\)00387-9](https://doi.org/10.1016/s0304-4017(01)00387-9)]
- LEBERT, I., BORD, S., SAINT-ANDRIEUX, C., *et al.* (2022) Habitat suitability map of *Ixodes ricinus* tick in France using multi-criteria analysis. *Geospatial Health* vol. 17, n° 1. [<https://doi.org/10.4081/gh.2022.1058>]
- LEES (1946) The water balance in *Ixodes ricinus* L. and certain other species of ticks. *Parasitology* vol. 37, n° 1-2, p. 1-20. [<https://doi.org/10.1017/S0031182000013093>]
- LEOTY, D., LEBERT, I., JOLIVEAU, T. (2021) Cartographie des conditions favorables à la tique *Ixodes ricinus* en région Auvergne-Rhône-Alpes. report. INRAE.
- L'HOSTIS, M., BUREAUD, A., GORENFLOT, A. (1996) Female *Ixodes ricinus* (Acari, Ixodidae) in cattle of western France: infestation level and seasonality. *Veterinary Research* vol. 27, n° 6, p. 589-597.
- L'HOSTIS, Monique, DUMON, H., FUSADE, A., *et al.* (1996) Seasonal incidence of *Ixodes ricinus* ticks (Acari: ixodidae) on rodents in western France. *Experimental & Applied Acarology* vol. 20, n° 7, p. 359-368. [<https://doi.org/10.1007/BF00130548>]

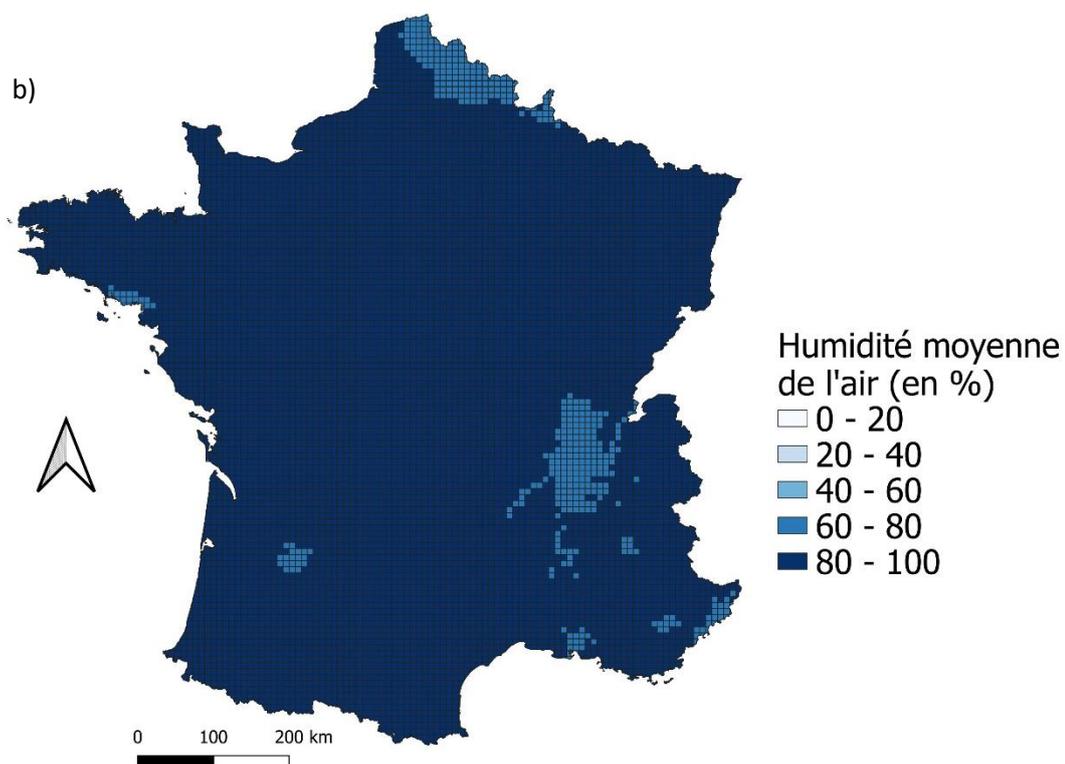
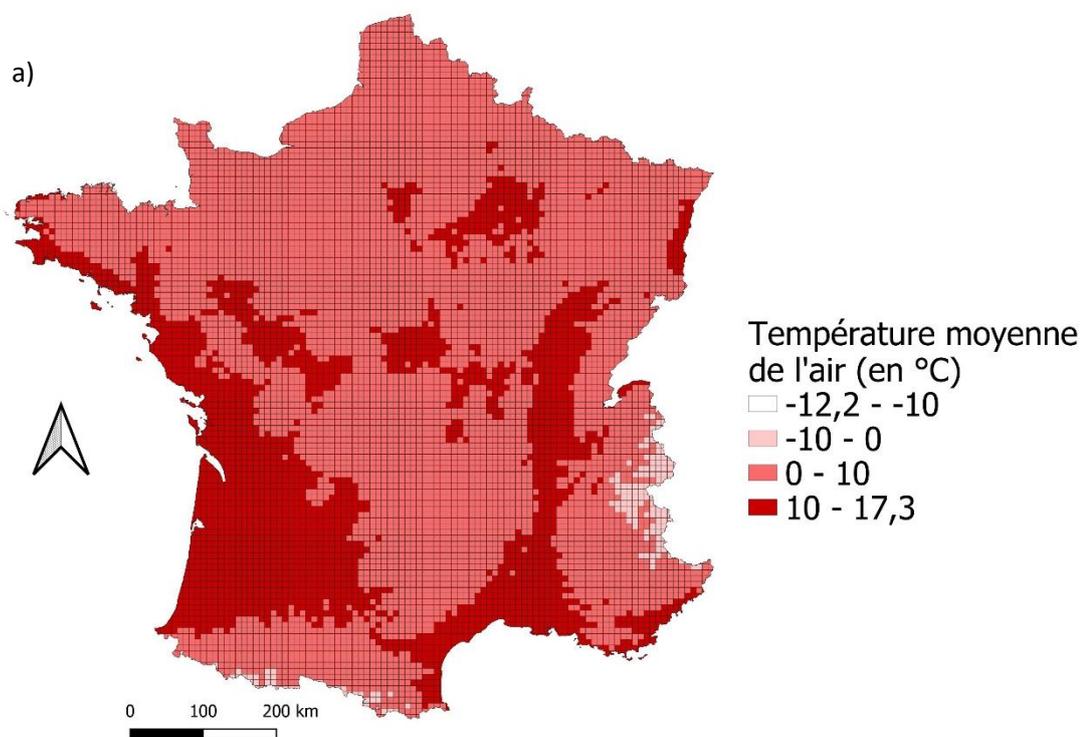
- LINSKE, M.A., STAFFORD, K.C., WILLIAMS, S.C., *et al.* (2019) Impacts of Deciduous Leaf Litter and Snow Presence on Nymphal *Ixodes scapularis* (Acari: Ixodidae) Overwintering Survival in Coastal New England, USA. *Insects* vol. 10, n° 8, p. 227. [<https://doi.org/10.3390/insects10080227>]
- LUMBIERRES, M., DAHAL, P.R., SORIA, C.D., *et al.* (2022) Area of Habitat maps for the world's terrestrial birds and mammals. *Scientific Data* vol. 9, n° 1, p. 749. [<https://doi.org/10.1038/s41597-022-01838-w>]
- MACLEOD, J. (1935) *Ixodes ricinus* in Relation to its Physical Environment: II. Climate and Reproduction. *Parasitology* vol. 27, n° 4, p. 489-500. [<https://doi.org/10.1017/S0031182000015420>]
- MARSOT, M., HENRY, P.-Y., VOUREC'H, G., *et al.* (2012) Which forest bird species are the main hosts of the tick, *Ixodes ricinus*, the vector of *Borrelia burgdorferi sensu lato*, during the breeding season? *International Journal for Parasitology* vol. 42, n° 8, p. 781-788. [<https://doi.org/10.1016/j.ijpara.2012.05.010>]
- MATERNA, J., DANIEL, M., DANIELOVÁ, V. (2005) Altitudinal distribution limit of the tick *Ixodes ricinus* shifted considerably towards higher altitudes in central Europe: results of three years monitoring in the Krkonose Mts. (Czech Republic). *Central European Journal of Public Health* vol. 13, n° 1, p. 24-28.
- MATERNA, J., DANIEL, M., METELKA, L., *et al.* (2008) The vertical distribution, density and the development of the tick *Ixodes ricinus* in mountain areas influenced by climate changes (The Krkonoše Mts., Czech Republic). *International Journal of Medical Microbiology, Proceedings IX. International Jena Symposium on Tick-borne Diseases (formerly IPS) March 15-17, 2007* vol. 298, p. 25-37. [<https://doi.org/10.1016/j.ijmm.2008.05.004>]
- MEDLOCK, J.M., HANSFORD, K.M., BORMANE, A., *et al.* (2013) Driving forces for changes in geographical distribution of *Ixodes ricinus* ticks in Europe. *Parasites & Vectors* vol. 6, n° 1, p. 1. [<https://doi.org/10.1186/1756-3305-6-1>]
- MIHALCA, A., SÁNDOR, A. (2013) The role of rodents in the ecology of *Ixodes ricinus* and associated pathogens in Central and Eastern Europe. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology* vol. 3.
- MYSTERUD, A., HÜGLI, C., VILJUGREIN, H. (2021) Tick infestation on medium–large-sized mammalian hosts: are all equally suitable to *Ixodes ricinus* adults? *Parasites & Vectors* vol. 14, n° 1, p. 254. [<https://doi.org/10.1186/s13071-021-04775-6>]
- NADAL, C. (2023) *Eco-épidémiologie de la piroplasmose équine et des vecteurs impliqués en France*. Thèse. Paris 12.
- NOLZEN, H., BRUGGER, K., REICHHOLD, A., *et al.* (2022) Model-based extrapolation of ecological systems under future climate scenarios: The example of *Ixodes ricinus* ticks. *PLOS ONE* vol. 17, n° 4, p. e0267196. [<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0267196>]
- NORTE, A.C., RAMOS, J.A., GERN, L., *et al.* (2013) Birds as reservoirs for *Borrelia burgdorferi* s.l. in Western Europe: circulation of *B. turdi* and other genospecies in bird–tick cycles in Portugal. *Environmental Microbiology* vol. 15, n° 2, p. 386-397. [<https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2012.02834.x>]
- PEDERSEN BN, JENKINS A, KJELLAND V (2020) Tick-borne pathogens in *Ixodes ricinus* ticks collected from migratory birds in southern Norway. *PloS one* vol. 15, n° 4. [<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230579>]
- PEREZ, G., BOURNEZ, L., BOULANGER, N., *et al.* (2023) The distribution, phenology, host range and pathogen prevalence of *Ixodes ricinus* in France: a systematic map and narrative review. [<https://doi.org/10.1101/2023.04.18.537315>]
- PERRET, J.-L., GUERIN, P.M., DIEHL, P.A., *et al.* (2003) Darkness induces mobility, and saturation deficit limits questing duration, in the tick *Ixodes ricinus*. *Journal of Experimental Biology* vol. 206, n° 11, p. 1809-1815. [<https://doi.org/10.1242/jeb.00345>]
- RAMANATHAN, R., GANESH, L.S. (1994) Group preference aggregation methods employed in AHP: An evaluation and an intrinsic process for deriving members' weightages. *European Journal of Operational Research* vol. 79, n° 2, p. 249-265. [[https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)90356-5](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)90356-5)]

- RANDOLPH, S.E. (2001) The shifting landscape of tick-borne zoonoses: tick-borne encephalitis and Lyme borreliosis in Europe. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences* vol. 356, n° 1411, p. 1045-1056. [<https://doi.org/10.1098/rstb.2001.0893>]
- RATAUD, A., GALON, C., BOURNEZ, L., *et al.* (2022) Diversity of Tick-Borne Pathogens in Tick Larvae Feeding on Breeding Birds in France. *Pathogens* vol. 11, n° 8, p. 946. [<https://doi.org/10.3390/pathogens11080946>]
- Règlementation sur la toise des poneys | Fédération Française d'Équitation - FFE (s.d.). [<https://www.ffe.com/le-cheval/espace-propretaire/passeport-fei/certificats-de-toisage>] (consulté le 18/03/2024).
- ROUSSEAU, R., MCGRATH, G., MCMAHON, B.J., *et al.* (2017) Multi-criteria Decision Analysis to Model Ixodes ricinus Habitat Suitability. *EcoHealth* vol. 14, n° 3, p. 591-602. [<https://doi.org/10.1007/s10393-017-1247-8>]
- RUYTS, S.C., TACK, W., AMPOORTER, E., *et al.* (2018) Year-to-year variation in the density of Ixodes ricinus ticks and the prevalence of the rodent-associated human pathogens Borrelia afzelii and B. miyamotoi in different forest types. *Ticks and Tick-borne Diseases* vol. 9, n° 2, p. 141-145. [<https://doi.org/10.1016/j.ttbdis.2017.08.008>]
- SAATY TL (1980) Saaty Multicriteria Decision Making: The Analytic Hierarchy Process, McGraw-Hill. New York.
- SCHÜTTE, K., SPRINGER, A., BRANDES, F., *et al.* (2024) Ectoparasites of European hedgehogs (Erinaceus europaeus) in Germany and their health impact. *Parasites & Vectors* vol. 17, n° 1, p. 2. [<https://doi.org/10.1186/s13071-023-06081-9>]
- SEMENZA, J.C., SUK, J.E. (2018) Vector-borne diseases and climate change: a European perspective. *FEMS microbiology letters* vol. 365, n° 2, p. fnx244. [<https://doi.org/10.1093/femsle/fnx244>]
- SOCOLOVSKI, C., REYNAUD, P., KERNIF, T., *et al.* (2012) Rickettsiae of spotted fever group, Borrelia valaisiana, and Coxiella burnetii in ticks on passerine birds and mammals from the Camargue in the south of France. *Ticks and Tick-borne Diseases* vol. 3, n° 5, p. 355-360. [<https://doi.org/10.1016/j.ttbdis.2012.10.019>]
- SORMUNEN, J.J., KLEMOLA, T., VESTERINEN, E.J., *et al.* (2016) Assessing the abundance, seasonal questing activity, and Borrelia and tick-borne encephalitis virus (TBEV) prevalence of Ixodes ricinus ticks in a Lyme borreliosis endemic area in Southwest Finland. *Ticks and Tick-borne Diseases* vol. 7, n° 1, p. 208-215. [<https://doi.org/10.1016/j.ttbdis.2015.10.011>]
- SWINEBROAD, E.L. (2018) Borreliosis in Sport Horse Practice. *The Veterinary Clinics of North America. Equine Practice* vol. 34, n° 2, p. 313-343. [<https://doi.org/10.1016/j.cveq.2018.04.011>]
- TAKUMI, K., HOFMEESTER, T.R., SPRONG, H. (2021) Red and fallow deer determine the density of Ixodes ricinus nymphs containing Anaplasma phagocytophilum. *Parasites & Vectors* vol. 14, n° 1, p. 59. [<https://doi.org/10.1186/s13071-020-04567-4>]
- TRAPE, J.-F., GODELUCK, B., DIATTA, G., *et al.* (1996) The Spread of Tick-Borne Borreliosis in West Africa and Its Relationship to Sub-Saharan Drought. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene* vol. 54, n° 3, p. 289-293. [<https://doi.org/10.4269/ajtmh.1996.54.289>]
- UUSITALO, R., SILJANDER, M., LINDÉN, A., *et al.* (2022) Predicting habitat suitability for Ixodes ricinus and Ixodes persulcatus ticks in Finland. *Parasites & Vectors* vol. 15, n° 1, p. 310. [<https://doi.org/10.1186/s13071-022-05410-8>]
- VALIM, L., CAMILO PEREIRA, A., FREITAS, B., *et al.* (2013) Decision-Making with Multiple Criteria Using AHP and MAUT: An Industrial Application. *International European Journal of Science and Technology* vol. 2, p. 87.
- VAN OORT, B.E.H., HOVELSRUD, G.K., RISVOLL, C., *et al.* (2020) A Mini-Review of Ixodes Ticks Climate Sensitive Infection Dispersion Risk in the Nordic Region. *International Journal of Environmental Research and Public Health* vol. 17, n° 15, p. 5387. [<https://doi.org/10.3390/ijerph17155387>]
- VÁZQUEZ, L., PANADERO, R., DACAL, V., *et al.* (2011) Tick infestation (Acari: Ixodidae) in roe deer (Capreolus capreolus) from northwestern Spain: population dynamics and risk stratification. *Experimental and Applied Acarology* vol. 53, n° 4, p. 399-409. [<https://doi.org/10.1007/s10493-010-9403-7>]

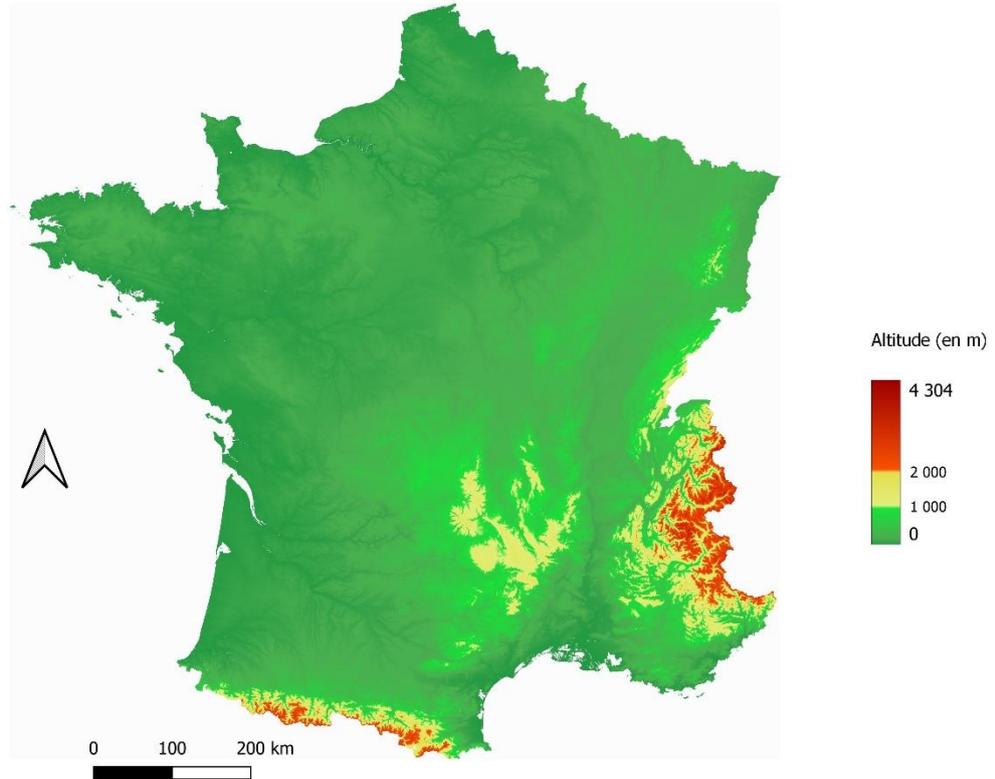
- VITEZ, T.S., WADA, R., MACARIO, A. (1996) Fuzzy logic: Theory and medical applications. *Journal of Cardiothoracic and Vascular Anesthesia*, Special Articles: Intraoperative Echocardiography - New Indications Myocardial Stunning and Hibernation Fuzzy Logic Applications vol. 10, n° 6, p. 800-808. [[https://doi.org/10.1016/S1053-0770\(96\)80210-2](https://doi.org/10.1016/S1053-0770(96)80210-2)]
- VOLLACK, K., SODOUDI, S., NÉVIR, P., *et al.* (2017) Influence of meteorological parameters during the preceding fall and winter on the questing activity of nymphal Ixodes ricinus ticks. *International Journal of Biometeorology* vol. 61, n° 10, p. 1787-1795. [<https://doi.org/10.1007/s00484-017-1362-9>]
- VOR, T., KIFFNER, C., HAGEDORN, P., *et al.* (2010) Tick burden on European roe deer (*Capreolus capreolus*). *Experimental and Applied Acarology* vol. 51, n° 4, p. 405-417. [<https://doi.org/10.1007/s10493-010-9337-0>]
- WOLCOTT, K.A., MARGOS, G., FINGERLE, V., *et al.* (2021) Host association of *Borrelia burgdorferi* sensu lato: A review. *Ticks and Tick-borne Diseases* vol. 12, n° 5, p. 101766. [<https://doi.org/10.1016/j.ttbdis.2021.101766>]
-

Annexes

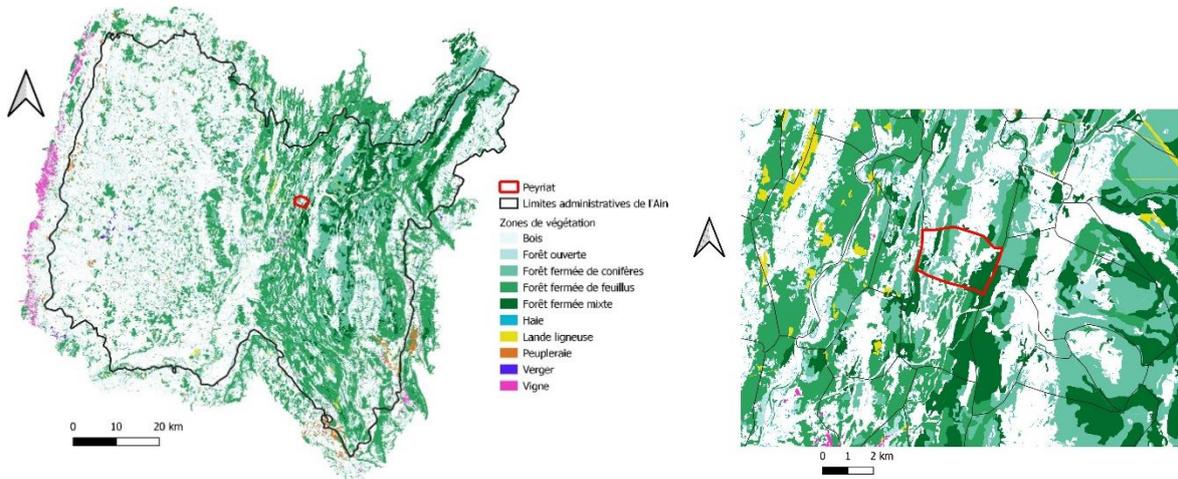
Annexe n°1 : Carte de température (a) et d'humidité relative (b) moyennes de l'air en France sur la journée du 1^{er} avril 2022 d'après les données SIM de météo-France.



Annexe n°2 : Carte des altitudes en France d'après les données BD ALTI de l'IGN



Annexe n°3 : Carte des types de végétation de la section « occupation du sol » de la base de données BD TOPO de l'IGN centrée sur le département de l'Ain (01) à gauche et la commune de Peyriat (01430) à droite



Annexe n°4 : Types de végétation de la catégorie « Zone de végétation » de la base de donnée BD TOPO de l'IGN ainsi que leur définition.

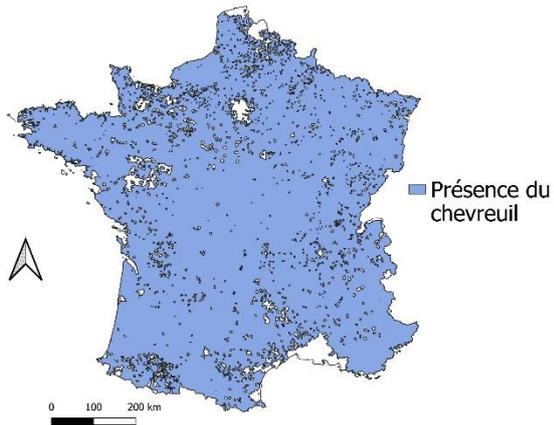
Les types de végétation utilisés sont en vert et ceux non utilisés en rouge.

Type de végétation	Définition	Superficie
Forêt ouverte	Arbres forestiers dont le couvert absolu est compris entre 10 % et 40 %.	>5000m ²
Forêt fermée de feuillus	Arbres forestiers couvrant au moins 40 % du sol, et composée de plus de 75 % de feuillus.	>5000m ²
Forêt fermée de conifères	Arbres forestiers couvrant au moins 40 % du sol et composée de plus de 75 % de conifères.	>5000m ²
Haie	Clôture naturelle composée d'arbres, d'arbustes, d'épines ou de branchages et servant à limiter ou à protéger un champ.	Longueur : >25m Largeur : <20m
Bois	Arbres forestiers couvrant au moins 40 % du sol.	>500m ² et <5000m ²
Forêt fermée mixte	Arbres forestiers couvrant au moins 40 % du sol, et composée entre 25% et 75 % de feuillus.	>5000m ²
Lande ligneuse	Végétation spontanée qui comprend une proportion importante de plantes ligneuses (bruyères, genêts, ajoncs, épineux divers, etc.) et semi-ligneuses (fougères, phragmites...) dont la hauteur ne dépasse pas 5m. Cette végétation ligneuse présente un couvert végétal d'au moins 25 %.	>5000m ²
Peupleraie	Zone de culture de peuplier avec un couvert supérieur à 10%.	>5000m ²
Verger	Zone de plantation d'arbres hors peuplement forestier.	>5000m ²
Vigne	Zone de vigne.	>2000m ²
Bananaeraie	Plantation de bananiers dans les Collectivités et Départements d'Outre-Mer.	>30 000m ²
Canne à sucre	Plantation de canne à sucre d'une superficie supérieure à 30 000m ² dans les Collectivités et Départements d'Outre-Mer.	>30 000m ²
Houblonnière	Champ planté de houblon.	>5000m ²
Lande herbacée	Végétation spontanée qui comprend une proportion importante de plantes herbacée.	Variable
Mangrove	Dans les régions côtières intertropicales, formation végétale caractérisée par des forêts impénétrables de palétuviers qui fixent leurs fortes racines dans les baies aux eaux calmes où se déposent boues et limons. Présents seulement dans les Collectivités et Départements d'Outre-Mer.	/
Rizière	Champ régulièrement cultivé de riz, disposant d'un système d'irrigation.	>10 000m ²
Zone arborée	Terme utilisé pour identifier différents types de végétation dans les Collectivités et Départements d'Outre-Mer.	>500m ²

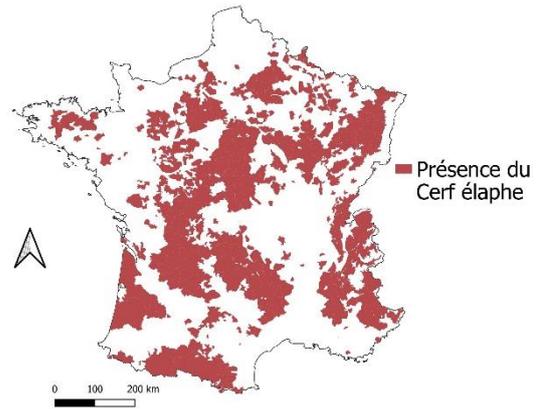
Annexe n°5 : Carte de présence/absence et de classe d'abondance des hôtes sauvages les plus important vis-à-vis d'*I. ricinus*, à partir des données CARMEN et Lumbierres et al (2022)

Avec le chevreuil (*Capreolus capreolus*) (a), le cerf élaphe (*Cervus elaphus*) (b), la grive musicienne (*Turdus philomelos*) (c), le merle noir (*Turdus merula*) (d), le mulot sylvestre (*Apodemus sylvaticus*) (e) et le campagnol roussâtre (*Myodes glaerolus*) (f)

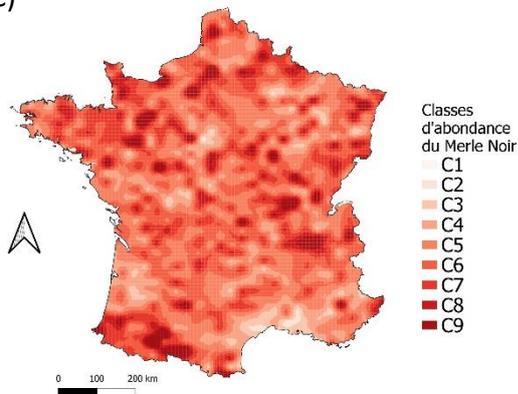
a)



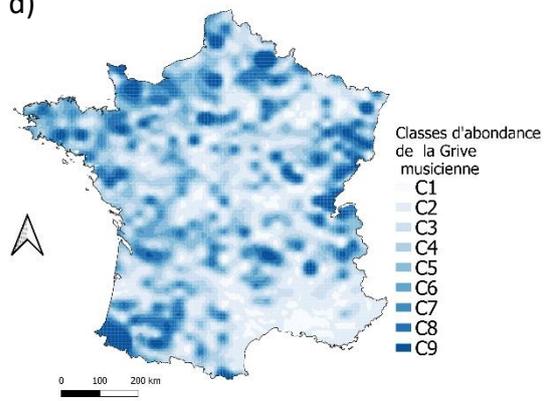
b)



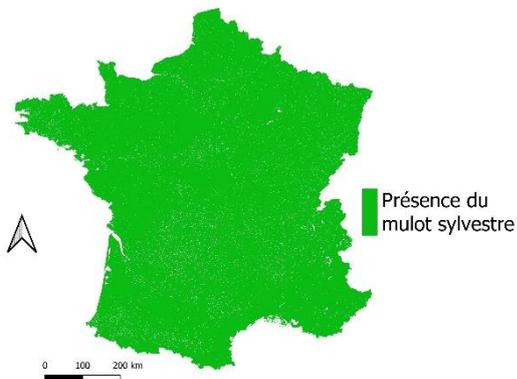
c)



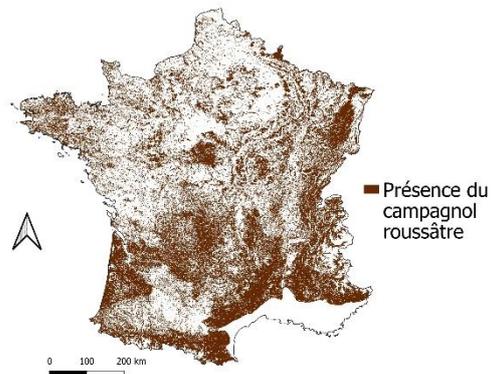
d)



e)

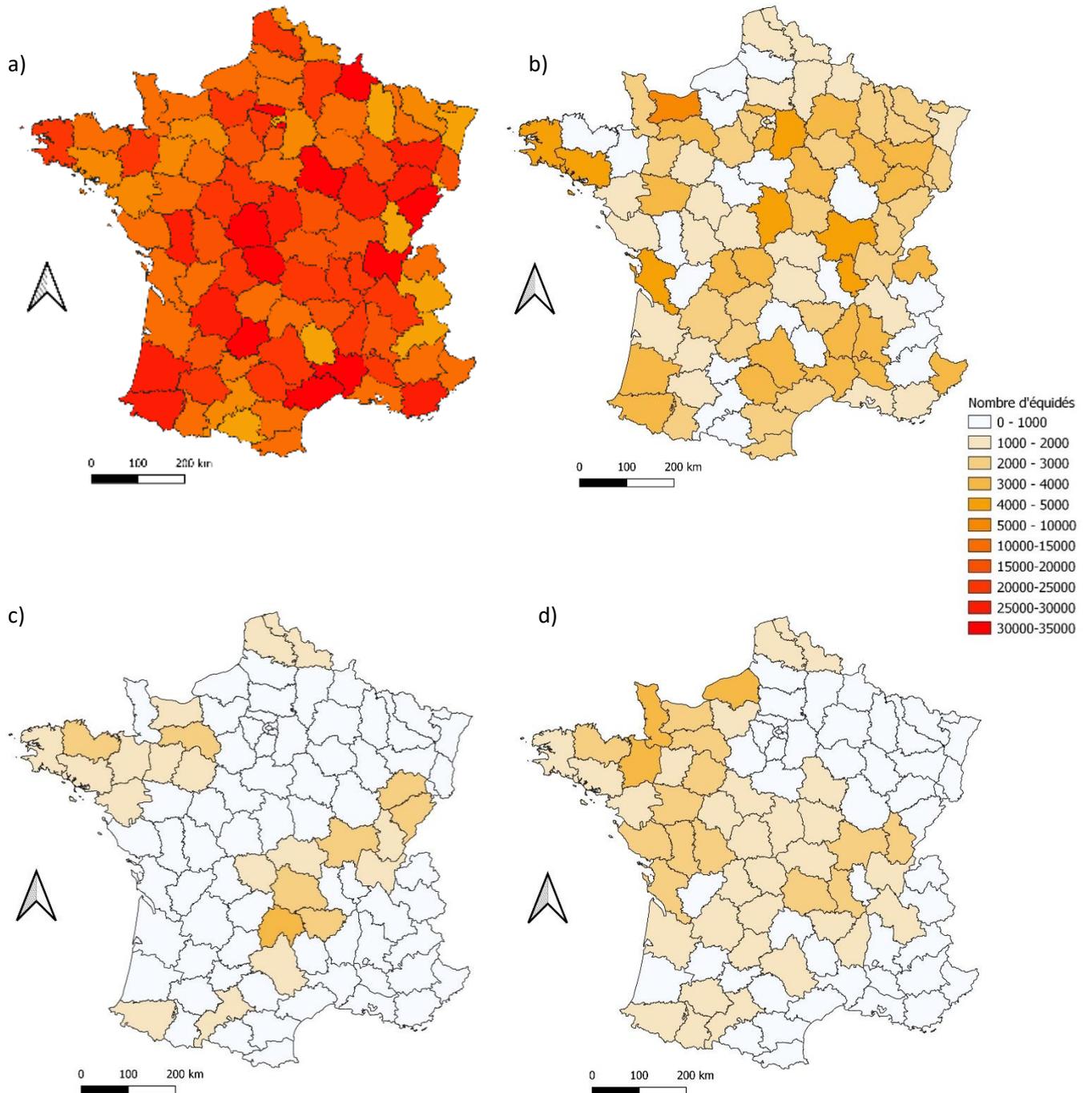


f)

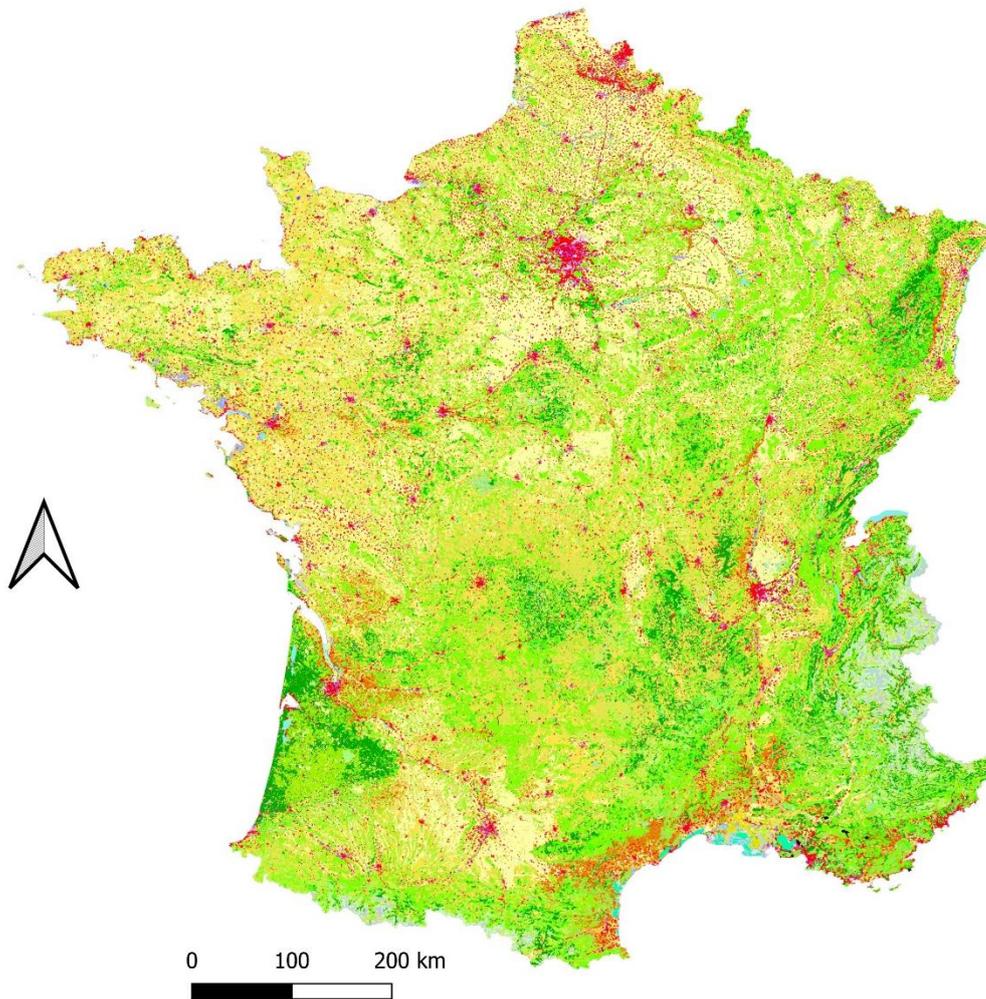


Annexe n°6 : Carte des effectifs d'équidés en France par département selon le groupe de race

Avec les chevaux de selle (a), les chevaux de course (b), les chevaux de trait (c) et les ânes (d)



Annexe n°7 : Carte des occupations du sol en France selon les données Corine Land Cover 2018



Classification Corine Land Cover 2018

- | | |
|--|---|
| 111 - Tissu urbain continu | 244 - Territoires agroforestiers |
| 112 - Tissu urbain discontinu | 311 - Forêts de feuillus |
| 121 - Zones industrielles ou commerciales et installations publiques | 312 - Forêts de conifères |
| 122 - Réseaux routier et ferroviaire et espaces associés | 313 - Forêts mélangées |
| 123 - Zones portuaires | 321 - Pelouses et pâturages naturels |
| 124 - Aéroports | 322 - Landes et broussailles |
| 131 - Extraction de matériaux | 323 - Végétation sclérophylle |
| 132 - Décharges | 324 - Forêt et végétation arbustive en mutation |
| 133 - Chantiers | 331 - Plages, dunes et sable |
| 141 - Espaces verts urbains | 332 - Roches nues |
| 142 - Equipements sportifs et de loisirs | 333 - Végétation clairsemée |
| 211 - Terres arables hors périmètres d'irrigation | 334 - Zones incendiées |
| 212 - Périmètres irrigués en permanence | 335 - Glaciers et neiges éternelles |
| 213 - Rizières | 411 - Marais intérieurs |
| 221 - Vignobles | 412 - Tourbières |
| 222 - Vergers et petits fruits | 421 - Marais maritimes |
| 223 - Oliveraies | 422 - Marais salants |
| 231 - Prairies et autres surfaces toujours en herbe à usage agricole | 423 - Zones intertidales |
| 241 - Cultures annuelles associées à des cultures permanentes | 511 - Cours et voies d'eau |
| 242 - Systèmes culturaux et parcellaires complexes | 512 - Plans d'eau |
| 243 - Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des espaces naturels importants | 521 - Lagunes littorales |
| | 522 - Estuaires |
| | 523 - Mers et océans |

Annexe n°8 : Questionnaire des experts pour la pondération par l'analyse hiérarchiques des procédés (AHP)

8.1 Exemple de comparaison entre 2 facteurs avec les définitions des degrés de comparaison.

Facteur A	Facteur B	A extrêmement plus important que B	A considérablement plus important que B	A fortement plus important que B	A un peu plus important que B	d'importance égale	B un peu plus important que A	B fortement plus important que A	B considérablement plus important que A	B extrêmement plus important que A	ne souhaite pas répondre
Température	Humidité			x							

Définition de l'échelle	Explication
d'importance égale	les deux facteurs contribuent de manière équivalente au risque
...un peu...	l'expérience et le jugement favorisent légèrement un facteur par rapport à un autre
...fortement...	l'expérience et le jugement favorisent fortement un facteur par rapport à un autre
...considérablement...	un facteur est fortement favorisé et sa prédominance est démontrée dans la pratique
...extrêmement...	les éléments de preuve favorisant un facteur par rapport à un autre sont du plus haut niveau de preuve possible

8.2 Noms des feuilles excel (en italique) avec chaque facteur de risque à comparer deux à deux.

Catégories liées aux facteurs favorisant la présence et l'activité des tiques :

Météorologique : Température et Humidité

Hôtes : Cerf élaphe, Chevreuil, Mulot sylvestre, Campagnol roussâtre, Merle noir et Grive musicienne

*Végétation** : Forêt ouverte, Forêt fermée de feuillus, Forêt fermée de conifères, Haie, Bois, Forêt fermée mixte, Lande ligneuse, Peupleraie, Verger et Vigne

Catégories : Météorologique, Altitude, Végétation, Hôtes

Équidés vis-à-vis des tiques : Chevaux de trait, Chevaux de course, Chevaux de selle et Ânes

Catégories liées aux facteurs favorisant la présence d'équidés :

Quatre feuilles excel nommées *Surface chevaux trait**, *Surface chevaux course**, *Surface chevaux selle**, *Surface ânes** avec les mêmes facteurs de présence d'équidés : Espaces verts urbains, Equipements sportifs et de loisirs, Terres arables, Vergers et vignes, Prairies, Zones agricoles hétérogènes, Forêts, Milieux à végétation arbustive et/ou herbacée et Zones humides

*Pour ces feuilles excel, les experts pouvaient, s'ils le désiraient, retirer les facteurs n'étant pas favorables à la présence de tique ou d'équidé.

8.3 Catégorisation des experts sélectionnés pour répondre au questionnaire

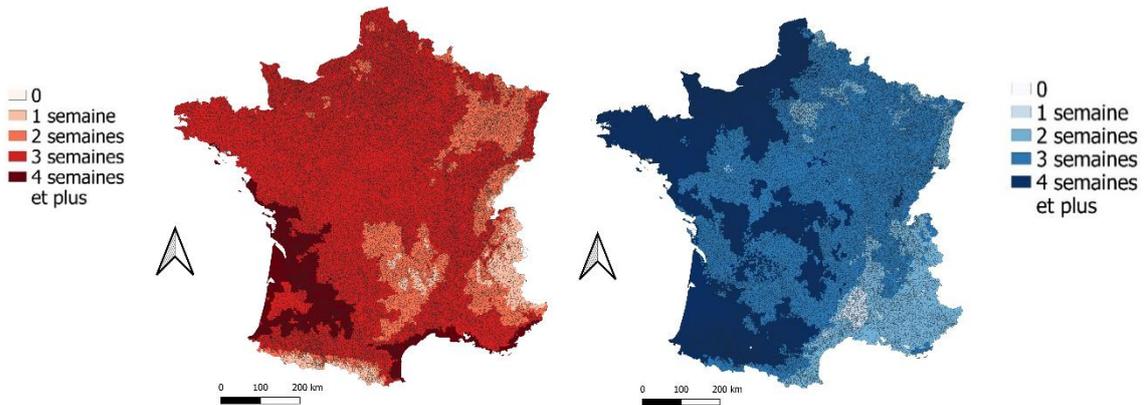
Experts « tiques » : Mme Maud MARSOT (Anses), Mme Isabelle LEBERT (INRAE), Mme Séverine BORD (INRAE), Mme Sarah BONNET (INRAE), M. Olivier PLANTARD (INRAE), et Mme Laure BOURNEZ (Anses).

Experts « équidés » : Mme Maud MARSOT (Anses), Mme Coralie LUPO (RESPE), Mme Christel MARCILLAUD-PITEL (RESPE), Mme Marie DELERUE (IFCE), Mme Anne-Lise PEPIN (IFCE) et Mme Sarah BONNET (INRAE).

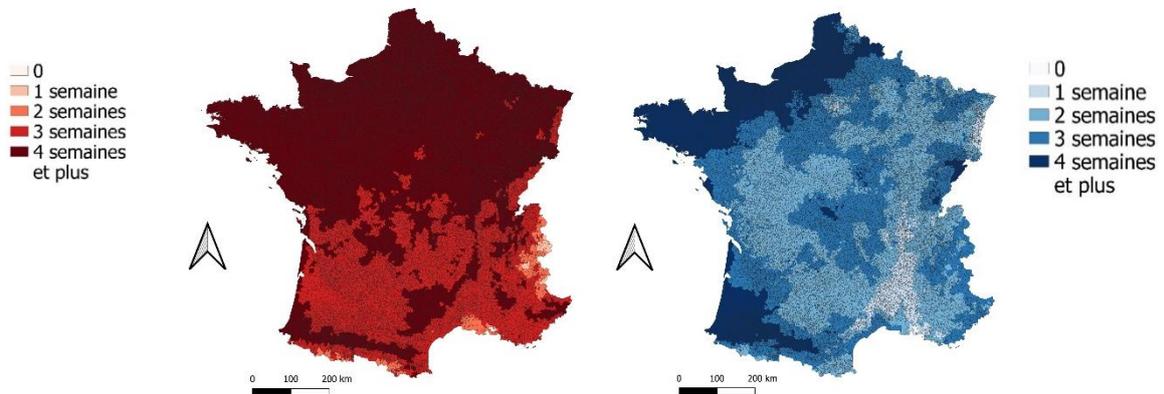
Annexe n°9 : Carte des variables par communes

9.1 Température et humidité : En rouge les jours favorables où la température de l'air est comprise entre 10 et 20°C et en bleu les jours favorables où l'humidité relative de l'air moyenne est au-dessus de 70%.

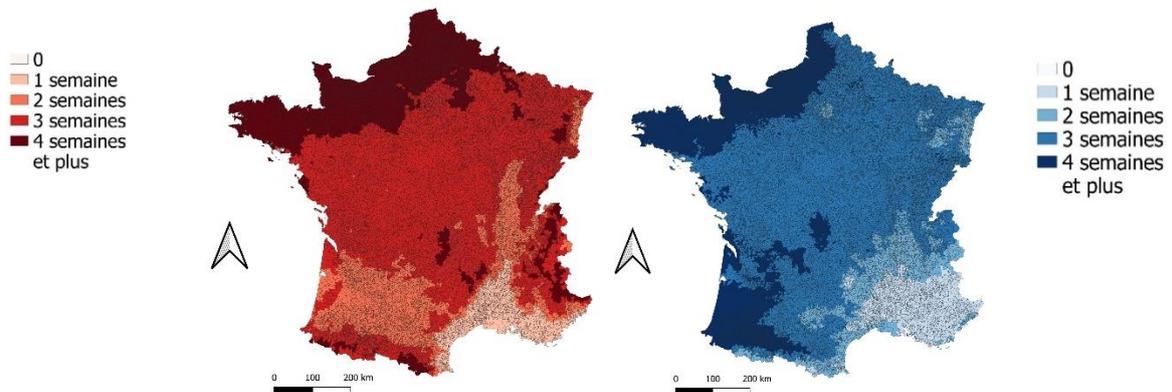
Avril 2022 :



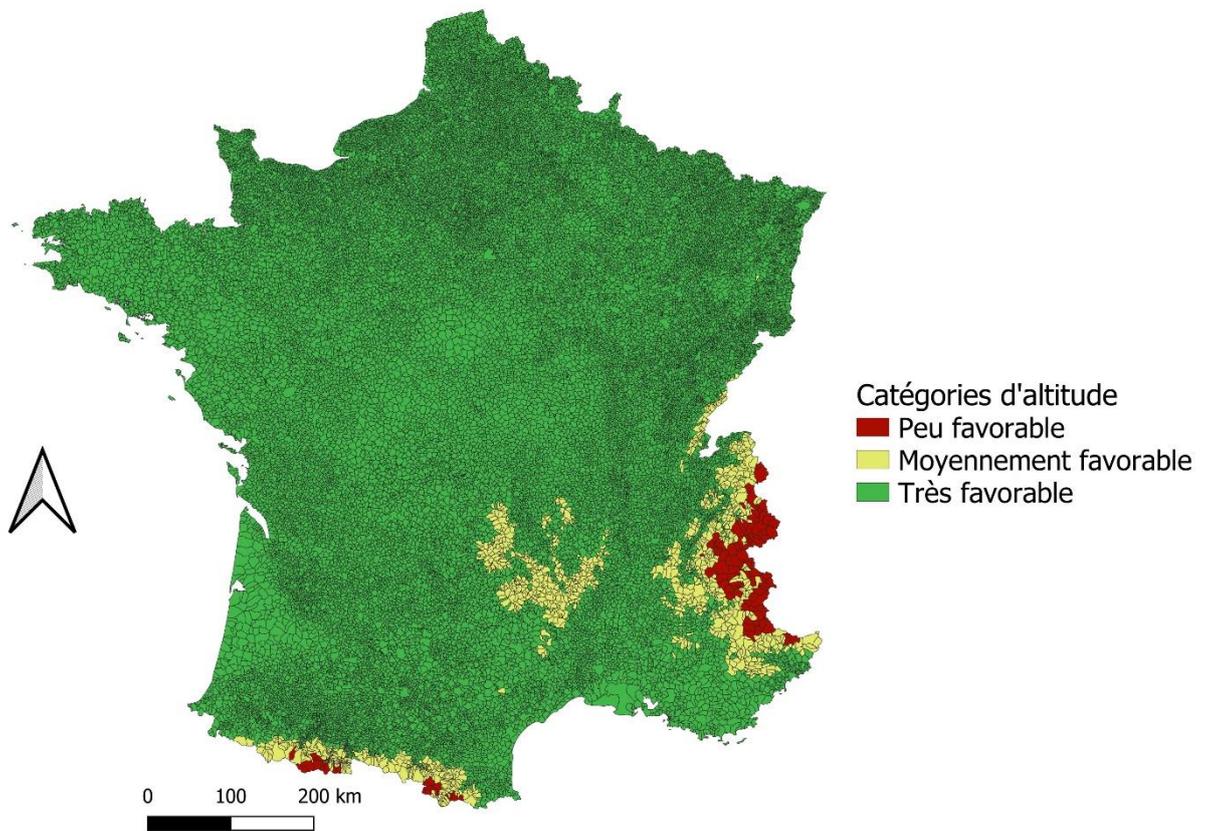
Mai 2022 :



Juin 2022 :

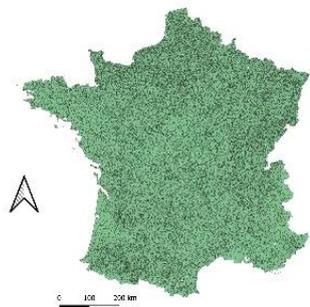


9.2 Altitude : Catégories d'altitude favorables à la présence et à l'activité de *I. ricinus*

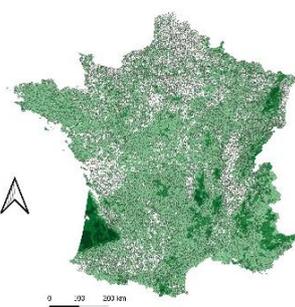


9.3 Végétation : Proportion de surface occupée par les différents types de végétation favorables choisies par commune

a) Bois



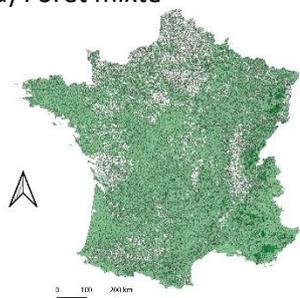
b) Forêt de conifères



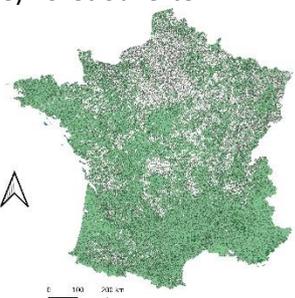
c) Forêt de feuillus



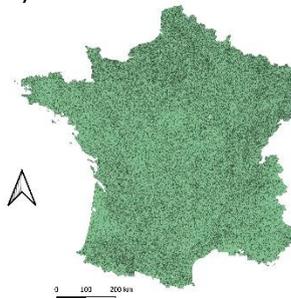
d) Forêt mixte



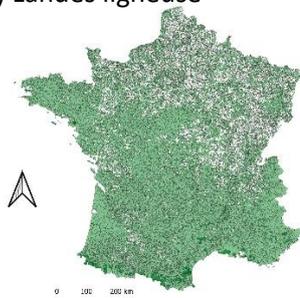
e) Forêt ouverte



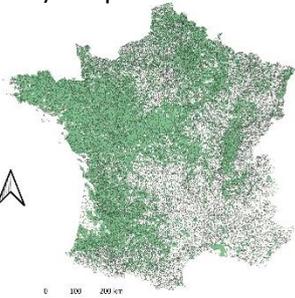
f) Haie



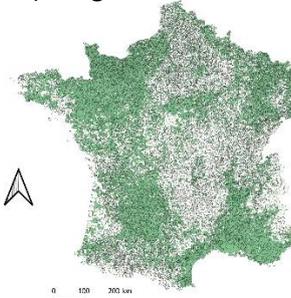
g) Landes ligneuse



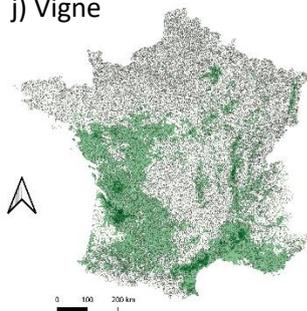
h) Peupleraie



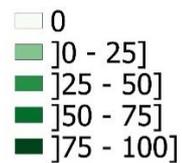
i) Verger



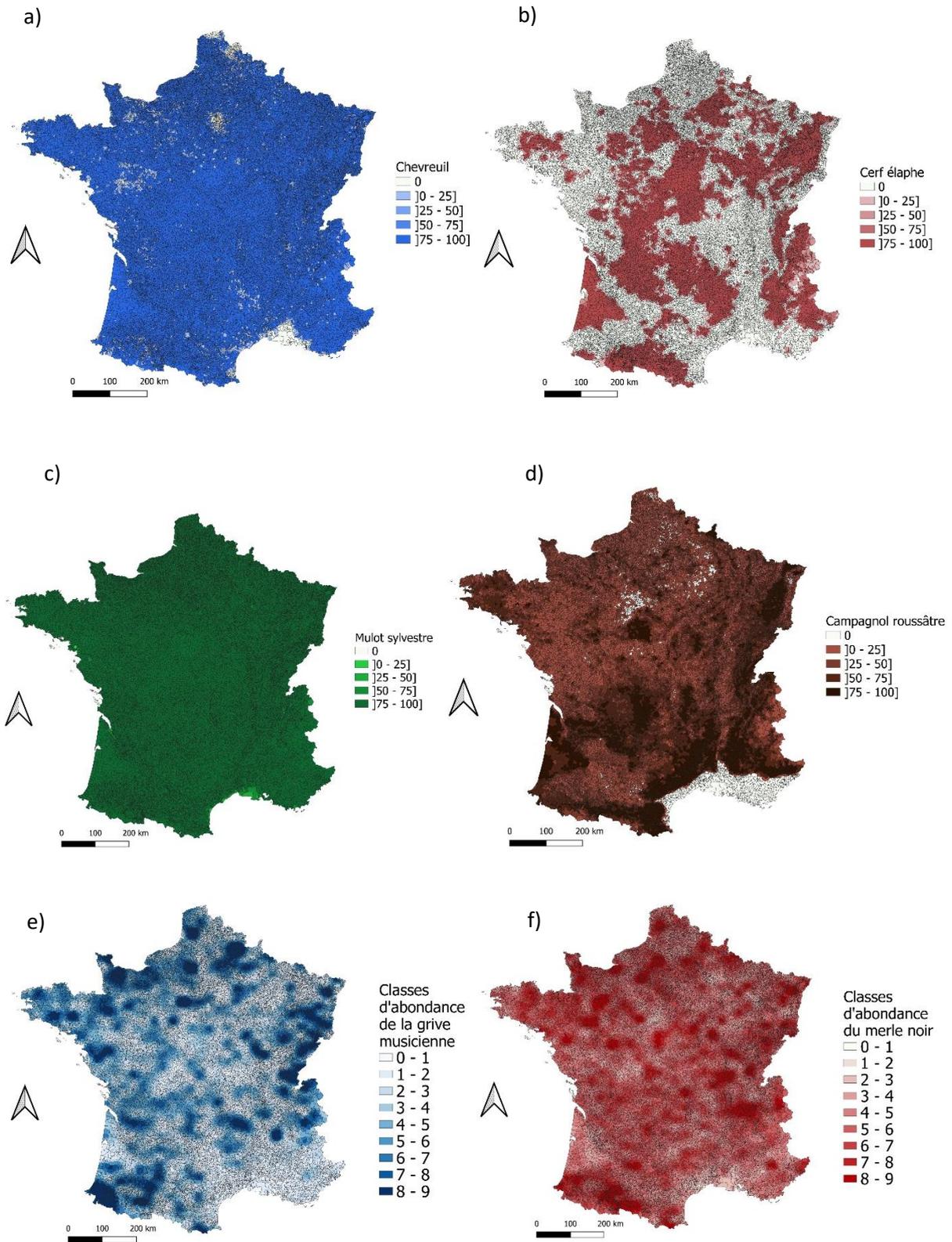
j) Vigne



Proportion des surfaces de végétation par commune (en %)



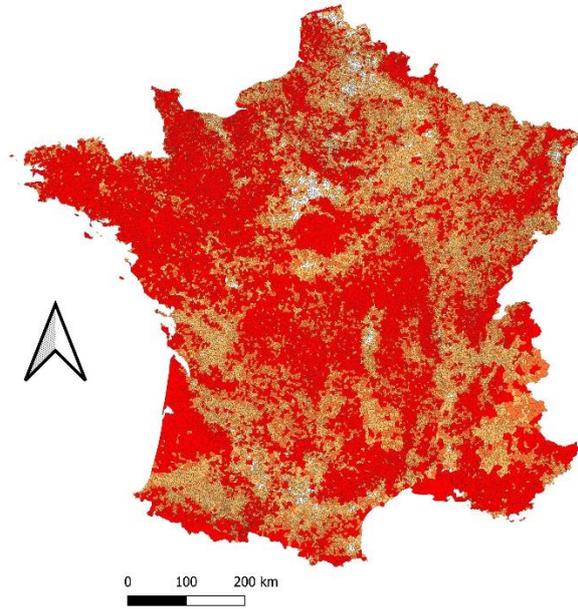
9.4 Hôtes : Proportion de présence pour les cervidés (a et b) et pour les rongeurs (c et d), et classes d'abondance pour les oiseaux (e et f) par commune



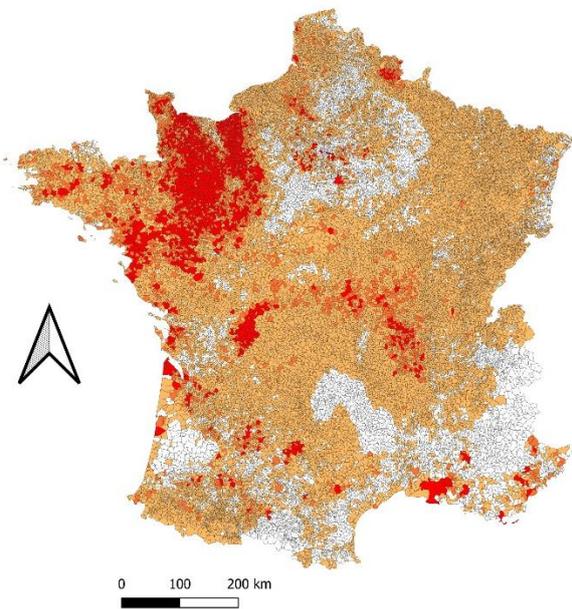
9.5 Equidés : Effectifs d'équidés par surface favorable, par commune et par groupe d'équidés

Avec les chevaux de selle (a), les chevaux de course (b), les chevaux de trait (c) et les ânes (d)

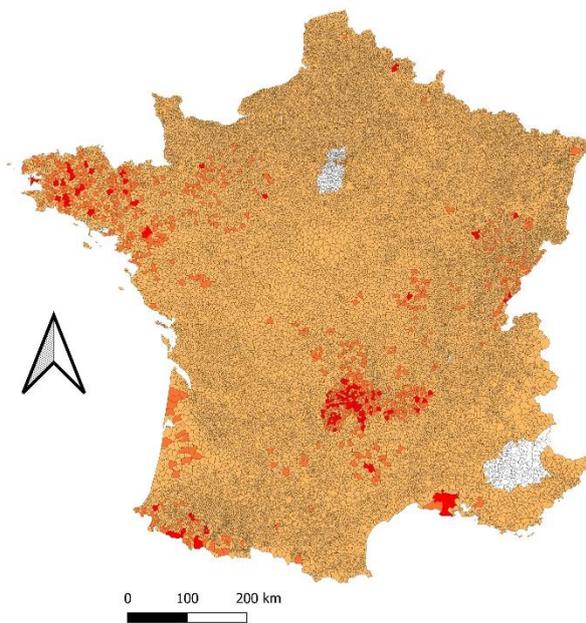
a)



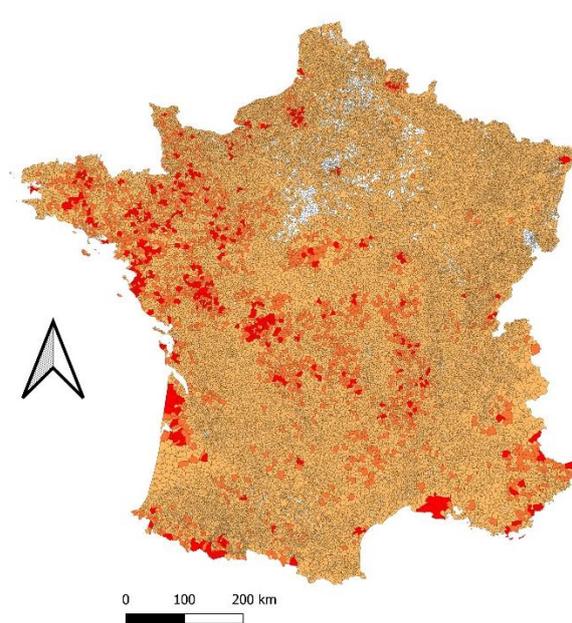
b)



c)



d)



Effectifs d'équidés
0
]0 - 10]
]10 - 20]
>20

Exposition géographique de la population équine française à la tique *Ixodes ricinus*

AUTEUR : Antoine RIGAL

RÉSUMÉ :

Les tiques *Ixodes ricinus* représentent un enjeu majeur en matière de risque sanitaire en France. Les équidés sont sensibles à de nombreux agents pathogènes véhiculés par ces tiques comme *Borrelia burgdorferi s.l.*, responsable de la maladie de Lyme pouvant engendrer des symptômes sévères et des conséquences importantes dans les filières sportives. Dans ce contexte, l'objectif de cette étude était d'évaluer et de cartographier le risque d'exposition des équidés en France métropolitaine vis-à-vis de la tique *I. ricinus*.

Pour représenter le risque d'exposition, nous avons sélectionné d'après une revue bibliographique, quatre catégories de facteurs de risque associés aux tiques (météorologique, altitude, végétation et hôtes). Nous avons ensuite utilisé la méthode d'analyse multicritères associée à des systèmes d'information géographique (MCDA-SIG) pour assembler les variables associées à chaque catégorie de facteurs de risque avec la probabilité de présence d'équidés vis-à-vis de celles des tiques pour obtenir les cartes de risque d'exposition en France métropolitaine durant la période d'activité de la tique durant le printemps 2022 à l'échelle communale.

Les résultats obtenus montrent un risque d'exposition relativement faible sur l'ensemble du territoire français (avec un maximum de risque estimé à 5,4%), et une répartition hétérogène des valeurs de risque avec des zones avec un risque plus élevé au niveau du nord-ouest et du centre de la France. Il semble que la distribution spatiale du risque soit très similaire à celle de la répartition de la probabilité de présence des équidés et plus particulièrement à la répartition des effectifs des chevaux de selle. Une étape de la méthode MCDA-SIG que nous aurions pu réaliser était une analyse de sensibilité. Cette étape aurait pu permettre d'apprécier l'impact des effectifs d'équidés de selle sur les résultats. Une autre étape que nous aurions pu réaliser était la vérification des résultats à partir d'observations de terrain composées de mesures de charges en tiques prélevées sur des équidés.

MOTS CLÉS :

TIQUES, *IXODES RICINUS*, EQUIDES, FRANCE, ANALYSE MULTI-CRITERES

MAITRE DE STAGE : Maud MARSOT & Coralie LUPO

LIEU DE STAGE : Anses de Maisons-Alfort, 14 Rue Pierre et Marie Curie, Maisons-Alfort.