



**HAL**  
open science

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

Antoine Rigal

## ► To cite this version:

Antoine Rigal. Exposition géographique de la population équine française à la tique *Ixodes ricinus*. Médecine vétérinaire et santé animale. 2025. <dumas-05042756>

**HAL Id: dumas-05042756**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-05042756v1>**

Submitted on 23 Apr 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0 - Attribution - Non-commercial use - No Derivative Works - International License

Année 2025

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

## THÈSE

pour obtenir le diplôme d'État de

## DOCTEUR VÉTÉRAIRE

présentée et soutenue publiquement devant

la Faculté de Médecine de Créteil (UPEC)

le 27 mars 2025

par

**Antoine Guy Henri RIGAL**

sous la direction de

**Guillaume CROZET**

### JURY

<b>Président du jury :</b>	<b>M. Radu BLAGA</b>	Professeur à l'EnvA
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>M. Guillaume CROZET</b>	Maître de Conférences à l'EnvA
<b>Examinatrice :</b>	<b>Mme Estelle MANGUIN</b>	Maître de Conférences à l'EnvA
<b>Membre invitée :</b>	<b>Mme Maud MARSOT</b>	Épidémiologiste à l'Anses
<b>Membre invitée :</b>	<b>Mme Coralie LUPO</b>	Épidémiologiste au RESPE

**Liste des enseignants intervenant dans l'encadrement des thèses de Doctorat vétérinaire**



version Octobre 2024

**Liste des Professeurs et Maîtres de conférences titulaires de l'HDR**

M	Adjou	Karim	Professeur	DPASP
M	Audigé	Fabrice	Professeur	DEPEC
M	Bellier	Sylvain	Professeur	DSBP
Mme	Benckroun	Ghifa	Maître de conférences HDR	DEPEC
M	Blaga	Radu	Professeur	DSBP
M	Blot	Stéphane	Professeur	DEPEC
M	Boulouis	Henri-Jean	Professeur émérite	DSBP
Mme	Chahory	Sabine	Professeur	DEPEC
Mme	Chastant	Sylvie	Professeur	DPASP
M	Chateau	Henry	Professeur	DSBP
Mme	Chetboul	Valerie	Professeur	DEPEC
Mme	Crepeaux	Guillemette	Maître de conférences HDR	DSBP
Mme	Crevier-Denoix	Nathalie	Professeur	DSBP
M	Degueurce	Christophe	Professeur	DSBP
M	Denoix	Jean-Marie	Professeur émérite	DEPEC
M	Desquilbet	Loic	Professeur	DSBP
Mme	Dufour	Barbara	Professeur émérite	DPASP
M	Fayolle	Pascal	Professeur émérite	DEPEC
M	Federighi	Michel	Professeur	DPASP
M	Fontbonne	Alain	Professeur	DEPEC
Mme	Gilbert	Caroline	Professeur	DSBP
Mme	Grimard-Ballif	Bénédicte	Professeur émérite	DPASP
Mme	Haddad-Hoang Xuan	Nadia	Professeur	DPASP
M	Jouvion	Gregory	Professeur	DSBP
M	Kohlhauer	Matthias	Professeur	DSBP
Mme	Le Poder	Sophie	Professeur	DSBP
Mme	Le Roux	Delphine	Professeur	DSBP
M	Manassero	Mathieu	Professeur	DEPEC
Mme	Maurey-Guéneq	Christelle	Professeur	DEPEC
M	Millermann	Yves	Professeur	DPASP
M	Ponter	Andrew	Professeur	DPASP
Mme	Risco-Castillo	Véronica	Professeur	DSBP
Mme	Rivière	Julie	Professeur	DPASP
Mme	Robert	Céline	Professeur	DSBP
M	Tiret	Laurent	Professeur	DSBP
M	Tissier	Renaud	Professeur	DSBP
M	Verwaerde	Patrick	Professeur	DEPEC
Mme	Viateau	Véronique	Professeur	DEPEC

**Liste des Maîtres de conférences et Ingénieurs de recherche DMV**

M	Arné	Pascal	Maître de conférences	DPASP
Mme	Barassin	Isabelle	Maître de conférences	DPASP
Mme	Barbarino	Alix	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
M	Béguin	Jérémy	Maître de conférences	DEPEC
Mme	Bertal	Mileva	Maître de conférences associé	DEPEC
Mme	Bertoni	Lelia	Maître de conférences	DEPEC
Mme	Canonne-Guibert	Morgane	Maître de conférences	DEPEC
Mme	Chevallier	Lucie	Maître de conférences	DSBP
Mme	Cochet-Faivre	Noëlle	Maître de conférences	DEPEC
Mme	Cordonnier-Lefort	Nathalie	Maître de conférences	DSBP
Mme	Coudry	Virginie	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
M	Crozet	Guillaume	Maître de conférences	DPASP
Mme	De Paula Reis	Alline	Maître de conférences	DPASP
M	Delsart	Maxime	Maître de conférences	DPASP
Mme	Denis	Marine	Ingénieur de recherche (DMV)	DPASP
M	Deshuillers	Pierre	Maître de conférences	DSBP
Mme	Goutchat	Rebecca	Maître de conférences	DSBP
Mme	Guérin	Virginie	Maître de conférences	DSBP
Mme	Guélin-Poirier	Valentine	Maître de conférences	DPASP
Mme	Jacquet	Sandrine	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
M	Kurtz	Maxime	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
Mme	Lagrée	Anne-Claire	Maître de conférences	DSBP
Mme	Le Dudal	Marine	Ingénieur de recherche (DMV)	DSBP
Mme	Legrand	Chantal	Maître de conférences associé	DSBP
M	Mammeri	Mohamed	Maître de conférences	DSBP
Mme	Manguin	Estelle	Maître de conférences	DEPEC
Mme	Marignac	Genevieve	Maître de conférences	DSBP
Mme	Marotto	Stéphanie	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
Mme	Maurice	Emeline	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
Mme	Mespoules-Rivière	Céline	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
M	Mortier	Jérémy	Maître de conférences associé	DEPEC
Mme	Mtimet	Narjès	Maître de conférences	DPASP
M	Munir	Muhammad Tanveer	Maître de conférences	DPASP
M	Nudermann	Nicolas	Maître de conférences	DEPEC
M	Pignon	Charly	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
M	Polack	Bruno	Maître de conférences	DSBP
Mme	Quéré	Émilie	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
M	Radière	Guérric	Maître de conférences associé	DSBP
Mme	Ravary-Plumioën	Bérandère	Ingénieur de recherche (DMV)	DPASP
M	Reyes-Gomez	Edouard	Maître de conférences	DSBP
Mme	Rosé	Hélène	Maître de conférences associé	DSBP
M	Tanquerel	Ludovic	Maître de conférences	DEPEC
Mme	Touzot-Jourde	Gwenola	Maître de Conférences	DEPEC

# Remerciements

**Au Président du Jury de cette thèse, Professeur à l'EnvA, M. Radu Blaga,**

Sincères remerciements pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider cette thèse.

**À M. Guillaume Crozet, Maître de conférences à l'EnvA,**

Sincères remerciements pour m'avoir suivi dans cette thèse, pour votre accompagnement tout au long de sa réalisation et vos relectures attentives.

**À Mme Estelle Manguin, Maître de conférences à l'EnvA,**

Sincères remerciements pour m'avoir fait l'honneur d'être membre du jury de cette thèse.

**À Mme Maud Marsot et Mme Coralie Lupo, épidémiologistes respectivement à l'Anses et au RESPE,**

Sincères remerciements pour m'avoir suivi tout au long de mon stage de Master, et de m'avoir aidé pour la consolidation de cette thèse.

Mes remerciements également aux six autres expertes qui ont pris de leur temps pour répondre au questionnaire : **Mme Isabelle LEBERT** (INRAE), **Mme Christel MARCILLAUD-PITEL** (RESPE), **Mme Marie DELERUE** (IFCE), **Mme Sarah BONNET** (INRAE), **Mme Séverine BORD** (INRAE) et **Mme Anne-Lise PEPIN** (IFCE). 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.



# Table des matières

---

Liste des figures .....	3
Liste des tableaux .....	5
Liste des annexes.....	7
Liste des abréviations .....	9
Introduction.....	11
<b>Première partie : revue de la littérature sur les maladies vectorielles transmises par les tiques et leur impact sur les équidés, les principales tiques en France et les déterminants environnementaux associés .....</b>	<b>13</b>
1. Impact des maladies liées aux tiques chez les équidés .....	13
A. La borréliose de Lyme .....	13
B. Encéphalite à tiques .....	14
C. Piroplasmose équine .....	15
D. Anaplasmose.....	16
2. Répartition et caractéristiques des principales tiques dures en France .....	17
A. Répartition des principales tiques vectrices d'agents pathogènes en Europe et en France .....	17
B. Répartition de la tique <i>Ixodes ricinus</i> en Europe et en France .....	18
C. Caractérisation des tiques dures en France.....	19
D. Caractérisation de la tique <i>Ixodes ricinus</i> .....	22
3. Déterminants associés à la présence et à l'activité de la tique <i>Ixodes ricinus</i> .....	24
A. Facteurs météorologiques .....	24
a. Température de l'air .....	24
b. Humidité relative de l'air .....	25
c. Altitude .....	26
d. Photopériode .....	26
e. L'environnement gazeux .....	27
f. Sols .....	27
B. Facteurs biotiques .....	28
a. Végétation .....	28
b. Densité d'animaux sauvages.....	28
4. Les équidés et les tiques en France.....	30
A. Caractérisation des populations équines en France .....	30
a. Les chevaux de course.....	31
b. Les chevaux de selle.....	32
c. Les chevaux de trait .....	32
d. Les ânes.....	33
B. Exposition des chevaux aux tiques .....	33
5. Introduction à la Méthode d'Analyse Décisionnelle Multicritères.....	34

A. Sélection des facteurs .....	34
B. Pondération des facteurs de risque.....	34
C. Agrégation des facteurs de risque.....	35
D. Validation du modèle .....	36
E. Combinaison de la Méthode d'Analyse Décisionnelle Multicritères avec les Systèmes d'Information Géographique et ses précédentes utilisations pour étudier les populations de tiques .....	36
<b>Deuxième partie : production des cartes de score d'exposition des équidés à l'infestation par les tiques <i>Ixodes ricinus</i> .....</b>	<b>39</b>
1. Contexte et objectifs.....	39
2. Matériel et méthodes.....	40
A. Facteurs de présence et d'activité des tiques, et facteur relatif aux équidés : sources de données et variables créées.....	41
a. Variables météorologiques : température et humidité .....	41
b. Altitude .....	42
c. Végétation .....	43
d. Animaux hôtes.....	43
e. Équidés.....	47
B. Pondération des facteurs.....	48
C. Formation de la carte de score d'exposition.....	49
3. Résultats .....	49
A. Variables relatives aux facteurs de présence et d'activité des tiques, et au facteur de présence des équidés.....	49
B. Pondération des facteurs de présence et d'activité.....	50
C. Cartes de score de présence et d'activité des tiques <i>Ixodes ricinus</i> , de score de présence d'équidés sur les milieux favorables aux tiques et du score d'exposition des équidés à l'infestation par les tiques <i>Ixodes ricinus</i> .....	53
4. Discussion.....	58
A. Résultats obtenus.....	58
B. Choix des facteurs et des seuils considérés .....	59
C. Choix de la méthode.....	60
D. Interprétation du score d'exposition obtenu .....	60
E. Choix des sources de données .....	61
F. Perspectives .....	62
<b>Conclusion .....</b>	<b>63</b>
<b>Liste des références bibliographiques .....</b>	<b>65</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>77</b>

# Liste des figures

---

Figure 1 : Cartographie de présence des tiques (a) <i>Dermacentor reticulatus</i> , (b) <i>Rhipicephalus sanguineus</i> et (c) <i>Ixodes ricinus</i> en Europe (d'après ECDC, 2023) ...	18
Figure 2 : Cartographie des habitats favorables à <i>Ixodes ricinus</i> en France (d'après Lebert <i>et al</i> , 2022) .....	19
Figure 3 : Anatomie de la face ventrale et dorsale des tiques dures (a) (d'après l'Institut national de santé publique du Québec) et détail du rostre d'une tique <i>Ixodes ricinus</i> nymphe (b) (d'après Richter <i>et al.</i> , 2013) .....	21
Figure 4 : Cycle de vie des tiques <i>Ixodes ricinus</i> (d'après Hofmeester, 2016) .....	23
Figure 5 : Répartition des équidés en France par région (a) et par type de race (b) (d'après l'Ifce-OESC 2016).....	31
Figure 6 : Processus de production de la carte de score d'exposition à partir des différentes variables. ....	41
Figure 7 : Cartes des variables normalisées associées à chaque catégorie de facteurs de présence et d'activité des tiques <i>Ixodes ricinus</i> pour les mois d'avril, mai et juin 2022.....	55
Figure 8 : Cartes de score de présence et d'activité des tiques <i>Ixodes ricinus</i> (a), de score de présence d'équidés sur les milieux favorables aux tiques (b), ainsi que de score d'exposition des équidés à l'infestation par les tiques <i>Ixodes ricinus</i> (c) pour les mois d'avril, mai et juin 2022 .....	56



# Liste des tableaux

---

Tableau 1 :Description des sources de données utilisées pour la construction des variables d'intérêt .....	45
Tableau 2 :Occupations de sols de la base de données CLC2018 pris en compte pour calculer les effectifs d'équidés par commune .....	48
Tableau 3 :Pondération des facteurs de présence et d'activité liés à la présence et l'activité des tiques <i>I. ricinus</i> , ainsi que le facteur relatif aux groupes d'équidés étant les plus exposés à l'infestation par <i>I. ricinus</i> .....	52
Tableau 4 :Nombre d'expertes ayant choisis les occupations de sol favorables à la présence d'équidés pour chaque groupe d'équidés sur les 6 expertes interrogés ....	53



# Liste des annexes

---

Annexe n°1 : Carte des températures (a) et d'humidité relative (b) moyennes de l'air en France sur la journée du 1 <sup>er</sup> avril 2022 d'après les données SIM de météo-France. .....	77
Annexe n°2 : Carte des altitudes en France d'après les données BD ALTI de l'IGN.	78
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) en haut et sur la commune de Peyriat (01430) en bas.....	79
Annexe n°4 : Types de végétation de la catégorie « Zone de végétation » de la base de données BD TOPO de l'IGN ainsi que leurs définitions.....	80
Annexe n°5 : Carte de présence/absence et de classe d'abondance des hôtes sauvages les plus important vis-à-vis d'Ixodes ricinus, à partir des données CARMEN et issues de Lumbierres et al. (2022) .....	81
Annexe n°6 : Carte des effectifs d'équidés en France par département et selon le groupe de race .....	82
Annexe n°7 : Carte des occupations du sol en France selon les données Corine Land Cover 2018.....	83
Annexe n°8 : Questionnaire administré aux experts pour la pondération par l'analyse hiérarchiques des procédés (AHP).....	84
Annexe n°9 : Détail du calcul de la méthode AHP (utilisé dans le tableur d'aide au calcul de la méthode AHP développé par Goepel (2013).....	85
Annexe n°10 : Carte des variables par communes.....	87



# Liste des abréviations

---

ADN : acide désoxyribonucléique

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

MCDASIG : Méthode d'Analyse Décisionnelle Multicritères à l'Aide de Systèmes d'Informations Géographiques

OESC : Observatoire Économique et Social du Cheval

OFB : Office Français de la Biodiversité

ONC : Origine Non Constatée

ONF : Office National des Forêts

PCR : Polymerase Chain Reaction

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 et entraînant plus de 700 000 décès par an. 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 être infectés 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 sensu lato*, est l'agent transmis par les tiques le plus prévalent en France chez les principaux hôtes mammifères sauvages tels que les rongeurs et les cervidés. (Wolcott *et al.*, 2021). Cette maladie est une zoonose. Bien que très peu de signes cliniques 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). Les équidés sont des espèces exposées à l'infestation par les tiques, par conséquent, à l'infection par des maladies vectorisées par les tiques. Dans le cadre de cette étude, l'objectif a été d'évaluer et de cartographier l'exposition de la population équine française à l'infestation par les tiques *I. ricinus*. Ceci correspond à une première étape dans le cadre de l'appréciation du risque associées aux maladies transmises aux équidés par *I. ricinus*. 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 de la présence de la tique *I. ricinus* 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. Les cartes réalisées sont incluses dans un travail de préparation à une thèse d'Université dont l'objectif est de représenter une carte de risque des équidés vis-à-vis de l'infection à *B. burgdorferi s.l.*



# Première partie : revue de la littérature sur les maladies vectorielles transmises par les tiques et leur impact sur les équidés, les principales tiques en France et les déterminants environnementaux associés

---

## 1. Impact des maladies liées aux tiques chez les équidés

Les équidés peuvent être infectés par des agents pathogènes transmis par les tiques. En France, quatre maladies transmises par les tiques et qui touchent les équidés sont recensées : la borréliose de Lyme transmise par le complexe d'espèces *Borrelia burgdorferi sensu lato*, l'encéphalite à tiques, la piroplasmose équine et l'anaplasmose.

### A. La borréliose de Lyme

*Borrelia burgdorferi*, l'agent responsable de la borréliose de Lyme, est une bactérie de type bacille à Gram négatif. La bactérie est transmise par les tiques dures de l'espèce *Ixodes ricinus* en Europe (Madison-Antenucci *et al.*, 2020). La bactérie est peu résistante dans le milieu extérieur, et elle utilise le tube digestif des tiques et le sang des mammifères hôtes comme milieu favorable pour sa survie et son développement (Kurokawa *et al.*, 2020). Le nombre de transmissions de l'agent pathogène des tiques à leur hôte aura une évolution temporelle similaire à l'évolution temporelle de l'activité des tiques, avec un pic durant le printemps et l'été et une diminution des cas de transmission durant la saison hivernale (Lou et Wu, 2017). Lorsque les tiques se nourrissent par repas sanguin sur leur hôte, les bactéries, jusqu'alors accrochées au tube digestif de la tique via des protéines de surface OspA et OspB, vont se détacher par l'afflux de sang chaud qui vont entraîner leur migration vers les glandes salivaires de la tique et ensuite dans la circulation sanguine de l'hôte (Kurokawa *et al.*, 2020).

La borréliose de Lyme est une zoonose et peut être transmise à différentes espèces de mammifères domestiques ou sauvages tels que les chiens, les équidés, les bovins et les cervidés. Chez l'Homme, la maladie est généralement asymptomatique. Elle est détectable grâce à des signes caractéristiques comme l'apparition d'un érythème migrant à l'endroit de la morsure de la tique chez 80 % des personnes atteintes (Sanchez *et al.*, 2016 ; Strle et Wormser, 2022). Cependant, il est fréquent que l'érythème ne soit pas remarqué par le patient ou qu'il n'apparaisse pas, ce qui complexifie le diagnostic. Un test sérologique est alors recommandé pour confirmer la maladie chez les patients atteints de syndromes neurologiques ou possédant des

signes d'arthrite. Ce test possède une sensibilité aux alentours des 80 % (Sanchez *et al.*, 2016). Chez les équidés, la maladie est très difficile à diagnostiquer. Il existe de nombreux cas asymptomatiques et les signes cliniques, lorsqu'ils sont présents, sont peu évocateurs de la maladie (Divers, 2013). Les principaux signes cliniques décrits chez les équidés sont : 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). Le vétérinaire peut suspecter la maladie lorsque ces signes cliniques sont accompagnés d'une anamnèse mentionnant une morsure de tique et peut confirmer le diagnostic grâce à des tests en laboratoire comme un test sérologique ou un test « Polymerase Chain Reaction » (PCR). La présence d'anticorps détectables au test sérologique indique que l'équidé a été infecté par la bactérie *B. burgdorferi*, cependant les anticorps peuvent être présents plusieurs mois après l'infection et donc le test peut s'avérer positif bien que la bactérie ne soit plus présente dans l'organisme (Neely *et al.*, 2021). Le test sérologique est peu coûteux mais peu spécifique, avec une proportion de faux positifs élevés (avec une sensibilité de 40 % et une spécificité de 79 % chez les équidés (Johnson *et al.*, 2018)). Le test PCR permet quant à lui de détecter l'acide désoxyribonucléique (ADN) de la bactérie. Il peut être effectué sur plusieurs matrices telles que le sang ou le liquide articulaire de l'articulation présentant une arthrite. Cependant ces tests engendrant beaucoup de résultats faux négatifs et détectent très difficilement la bactérie, les rendant peu sensibles, avec chez l'Homme, une spécificité de 93 % et une sensibilité de 85 % (Johnstone *et al.*, 2016 ; Divers *et al.*, 2022). De nouveaux tests se fondant sur de la chromatographie de masse avec une sensibilité et une spécificité plus importantes sont en phase de développement (Madison-Antenucci *et al.*, 2020).

La maladie de Lyme est associée chez les équidés, dans la plupart des cas, à un assez bon pronostic avec un traitement reposant sur l'utilisation d'antibiotiques de la famille des tétracyclines (Swinebroad, 2018). Ces antibiotiques ne sont pas recommandés dans les cas asymptomatiques afin de prévenir les phénomènes d'antibiorésistance.

Nous avons donc vu que la maladie de Lyme a peu de répercussions si elle est traitée rapidement. Cependant, l'association de signes cliniques parfois frustrés dans le cadre de cette infection de la maladie et de la difficulté du diagnostic, y compris lors de l'utilisation de tests de laboratoires, font que les équidés ne sont que peu traités correctement, engendrant une hausse de morbidité et de mortalité. Ces conséquences soulignent la nécessité d'une mise en place de méthodes de prévention de la maladie.

## **B. Encéphalite à tiques**

L'encéphalite à tiques (appelée aussi méningo-encéphalite à tiques) est une zoonose transmise causée par un virus de la famille des *Flaviviridae*, transmise en grande majorité par les morsures de tiques (Kwasnik *et al.*, 2023). En France, cette maladie est principalement transmise par la tique *Ixodes ricinus* (Madison-Antenucci *et al.*, 2020). D'autres voies de transmission sont possibles chez l'Homme comme la voie alimentaire, mais elle est responsable de moins de 1 % des cas. Chez les équidés, la plupart des cas sont asymptomatiques. Chez les équidés sensibles, les signes

cliniques prédominants sont généraux avec une anorexie et un amaigrissement, et des signes neurologiques comme de la nervosité, de l'ataxie ainsi que des crises d'épilepsie et de l'hyperalgie au niveau de l'encolure (Salat et Ruzek, 2020). Les équidés récupèrent de la maladie en général après un an, avec parfois une persistance de signes neurologiques. Un taux élevé d'équidés présentant une séropositivité pour cet agent pathogène a été décrite en Europe centrale et plus particulièrement en Autriche et en Allemagne avec plus de 20 % des équidés présentant un résultat positif au test (Klaus *et al.*, 2013). Le virus est endémique dans les pays d'Europe centrale mais les cas réellement détectés d'encéphalite à tiques chez les équidés sont sporadiques à cause de la distribution géographique hétérogène de l'infection, ce qui rend difficile la surveillance dans des aires géographiques importantes (Rushton *et al.*, 2013 ; Pautienius *et al.*, 2021). Les cas humains d'encéphalite à tiques sont aussi difficiles à détecter à cause de la couverture vaccinale mise en place, les chevaux pourraient alors intervenir comme espèce sentinelle afin de mieux détecter les cas humains (Pautienius *et al.*, 2021).

Le diagnostic de cette infection chez les équidés se fonde généralement sur l'utilisation d'un test sérologique avec une détection des anticorps dirigés contre le virus. Cependant ce test possède une sensibilité relativement faible (de l'ordre de 30 %) et des réactions croisées sont possibles avec d'autres virus comme le virus West-Nile ou le virus Louping-ill (Klaus *et al.*, 2014).

Pour conclure, bien que les signes cliniques de cette maladie puissent avoir des conséquences importantes sur la santé des équidés, la grande majorité des cas sont asymptomatiques et ne sont pas détectés alors, qu'au contraire, les cas ayant des symptômes importants sont plutôt rares.

### C. Piroplasmose équine

La piroplasmose équine est une maladie parasitaire transmises en France principalement par les tiques *Dermacentor reticulatus* et *Rhipicephalus sanguineus* (Nadal, 2023). La France est l'un des trois pays les plus touchés par cette maladie en Europe (Nadal, 2023). La piroplasmose équine est due à *Theileria equi* et *Babesia caballi*. Ces deux parasites ont un cycle de vie relativement similaire, et infectent tous deux les érythrocytes des équidés, à la différence que *T. equi* infecte aussi les leucocytes comme les lymphocytes et les macrophages (Ramsay *et al.*, 2013). En Europe, la séroprévalence chez les chevaux serait aux alentours de 25 % pour les theilérioses, et environ 2 % pour les babésioses (Nadal *et al.*, 2022).

Concernant les signes cliniques, il est très difficile de différencier *B. caballi* et *T. equi*. La forme aiguë est la plus caractéristique, on observe un abattement, une anorexie, une anémie avec des muqueuses pâles et une hyperthermie marquée (Delaunay, 2023). Une forme chronique associée à *T. equi* peut apparaître avec un syndrome anémique et des signes peu spécifiques avec une baisse d'état et une intolérance à l'effort.

Le diagnostic se fonde surtout sur l'examen clinique ainsi que sur l'anamnèse et les commémoratifs. Un frottis sanguin peut également être effectué afin d'apprécier la

présence de parasites dans les érythrocytes. Ce test permet difficilement de différencier *B. caballi* de *T. equi* à la simple vue des parasites dans les érythrocytes. D'autres tests de laboratoires sont possibles pour approfondir le diagnostic et différencier les parasites comme des tests sérologiques ou des tests PCR. Les tests sérologiques permettent de déterminer si l'équidé a été exposé au parasite, avec une sensibilité et une spécificité d'environ 90 %, mais peuvent rester positif 24 mois après la disparition du parasite (Wise *et al.*, 2013). Les tests PCR, quant à eux, permettent de déterminer la présence du parasite dans l'organisme, leur sensibilité est proche des 100 %, ce qui conduit à augmenter l'utilisation de ces tests en routine (Wise *et al.*, 2013).

En France, le traitement s'effectue par des injections régulières par voie intramusculaire d'antiparasitaires spécifiques comme le propionate d'imidocarbe, à la posologie de 2,2 à 4,4 mg/kg en une fois ou à des doses plus faibles mais séparées dans le temps. Ce traitement est relativement efficace mais est associé à plusieurs effets secondaires comme de l'agitation, de la sudation, des coliques et des diarrhées (Wise *et al.*, 2014 ; Delaunay, 2023).

Pour finir, la piroplasmose équine est une maladie qui peut entraîner des conséquences importantes sur la santé des équidés symptomatiques non traités, mais qui ont des diagnostics rapides et fiables ainsi qu'un traitement qui permet une bonne récupération de l'animal. Un impact économique important a été observé dû à la piroplasmose dans la filière équine à cause des frais médicaux et des arrêts des activités des chevaux sportifs (Bonnet et Boulanger, 2019).

#### **D. Anaplasmose**

L'anaplasmose est une zoonose causée par la bactérie *Anaplasma phagocytophilum*. La bactérie est transmise en France par les tiques du genre *Ixodes*, dont *I. ricinus*, et elle touche de nombreux mammifères comme les équidés. Comme pour la borréliose de Lyme, il existe une saisonnalité des cas d'anaplasmose avec un pic vers le printemps, chez les équidés (Tilliette, 2008).

Les principaux signes cliniques chez les équidés sont une perte d'appétit, une léthargie, de la fatigue ainsi que des œdèmes distaux des membres (Saleem *et al.*, 2018). Ces signes sont similaires à ceux des piroplasmoses et l'anaplasmose, ces maladies doivent donc être prise en compte dans le diagnostic différentiel des piroplasmoses (Sandersen *et al.*, 2007). Elle est une maladie faiblement mortelle pour les équidés et elle est en général autorésolutive.

Le diagnostic de laboratoire s'effectue de la même manière que pour la piroplasmose équine : soit par un frottis sanguin, soit un test PCR (Dzięgiel *et al.*, 2013 ; Russell *et al.*, 2021).

Le traitement de choix s'effectue par l'administration d'antibiotiques de la famille des oxytétracyclines, bien que la plupart des cas d'anaplasmose puissent guérir spontanément (Dzięgiel *et al.*, 2013 ; Saleem *et al.*, 2018 ; Delaunay, 2023).

L'anaplasmose reste minoritaire par rapport à la piroplasmose équine, et est fréquemment associée à une guérison spontanée. Elle peut toutefois engendrer des signes cliniques sévères chez certains équidés. Cette maladie engendre aussi un impact économique important à cause de l'abattement et l'arrêt d'activité des chevaux de sport (Bonnet et Boulanger, 2019).

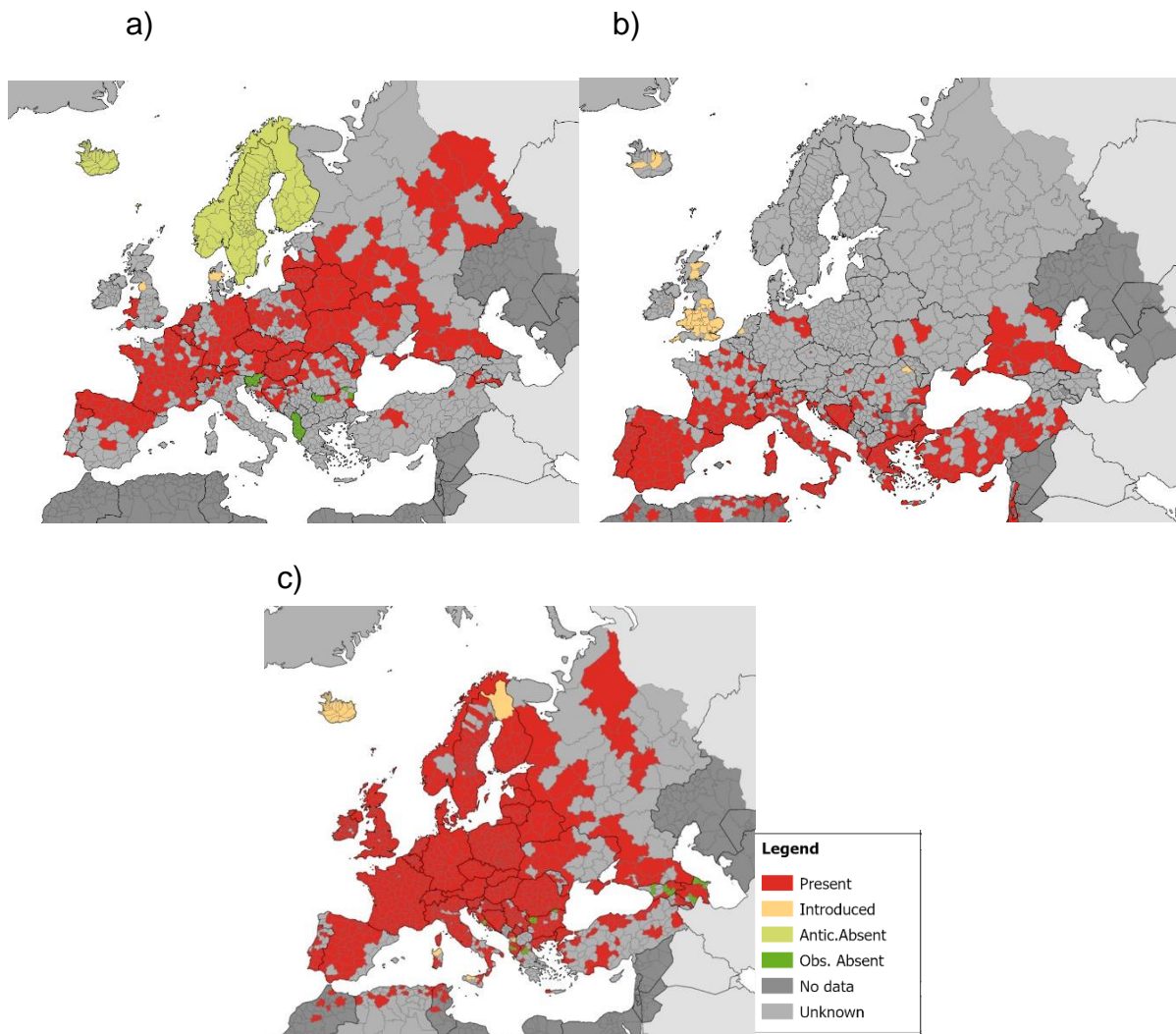
Pour conclure, parmi ces maladies transmises par les tiques aux équidés les piroplasmoses ainsi que la borréliose de Lyme sont celles qui ont les plus grands impacts sanitaires et économiques. Cependant, alors que la piroplasmose équine est relativement détectable via les signes cliniques et les tests diagnostiques, la borréliose de Lyme est plus difficile à diagnostiquer. Il est donc essentiel de mettre en place des mesures de prévention visant à limiter les risques d'infection par la borréliose de Lyme, tout en favorisant une détection précoce des cas pour garantir un diagnostic plus rapide et efficace.

## **2. Répartition et caractéristiques des principales tiques dures en France**

### **A. Répartition des principales tiques vectrices d'agents pathogènes en Europe et en France**

Les principales tiques dures se nourrissant sur des équidés en France sont *I. ricinus*, *R. sanguineus* et *D. reticulatus* (Boulanger *et al.*, 2019). Ces tiques ont des répartitions étendues sur plusieurs pays d'Europe et leurs répartitions diffèrent selon chaque espèce (Figure 1). En effet, la tique *I. ricinus* est très résistante aux conditions de son environnement et va donc avoir une répartition très large et homogène dans toute l'Europe. Pour *D. reticulatus*, le milieu est davantage favorable aux tiques dans les zones où le climat est océanique ou continental, et peu favorable pour les climats méditerranéens. Elle se situe surtout dans les régions du nord de l'Europe, en plus faible abondance qu'*I. ricinus*. Enfin, *R. sanguineus* se situe dans des régions à climat sec et humide, les climats méditerranéens sont donc très favorables à leur présence et leur activité, et elle sera donc surtout retrouvée dans des pays du Sud de l'Europe comme l'Espagne, l'Italie, et la Grèce.

**Figure 1 : Cartographie de présence des tiques (a) *Dermacentor reticulatus*, (b) *Rhipicephalus sanguineus* et (c) *Ixodes ricinus* en Europe (d'après ECDC, 2023)**



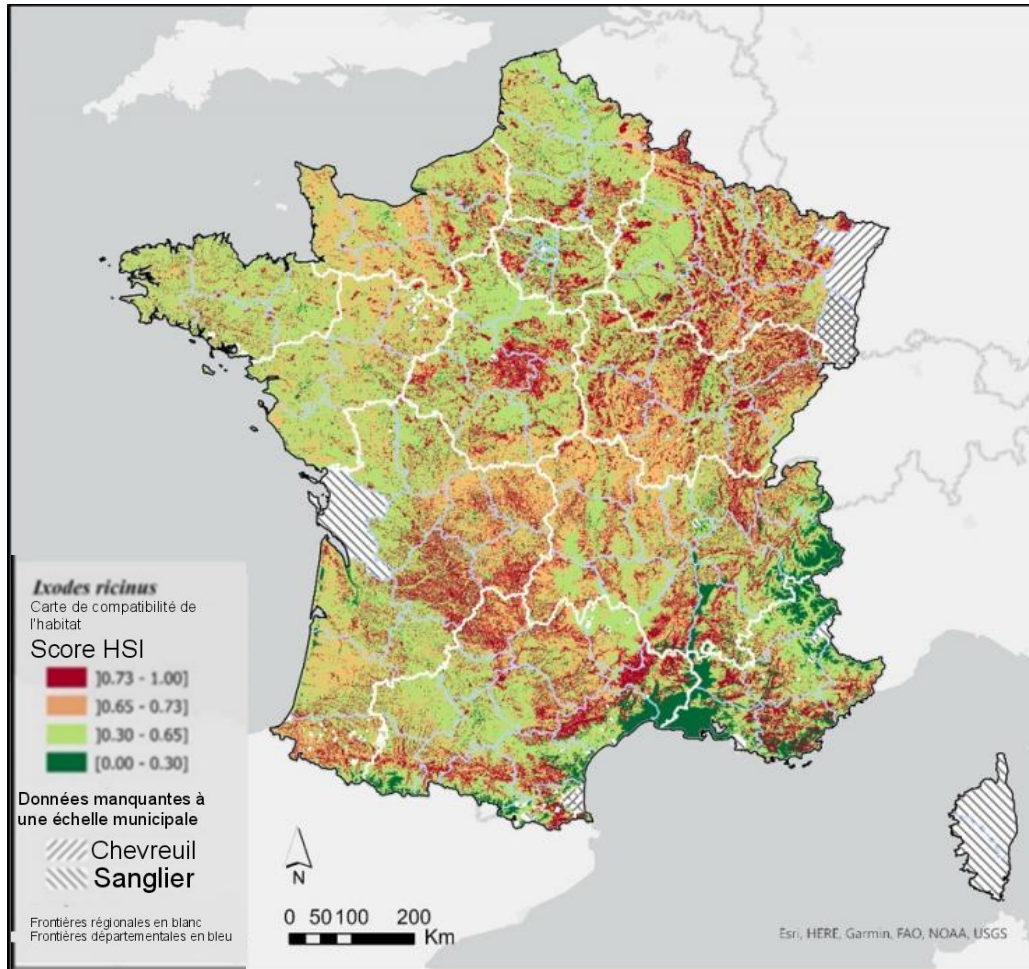
## **B. Répartition de la tique *Ixodes ricinus* en Europe et en France**

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* du Centre européen de prévention et de contrôle des maladies (ECDC) (Figure 1 (c)).

Concernant la France, une carte d'estimation de la densité de tiques a été réalisé par Lebert *et al.* (2022) (Figure 2), en se fondant sur les conditions les plus propices à leur survie. Ainsi, *I. ricinus* serait 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 2 : Cartographie des habitats favorables à *Ixodes ricinus* en France (d'après Lebert *et al*, 2022)**

Plus le score d'indice de qualité de l'habitat (noté score HSI) est proche de un, plus le milieu est considéré comme favorable à *I. ricinus*.

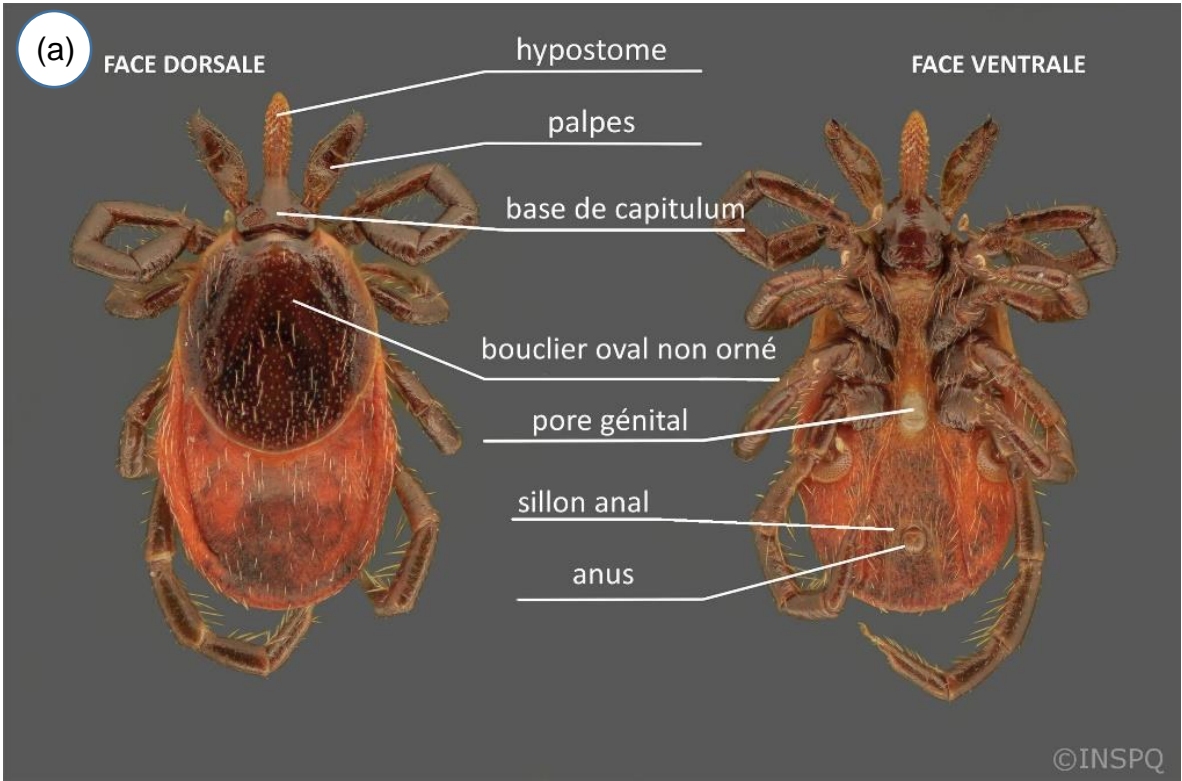


### C. Caractérisation des tiques dures en France

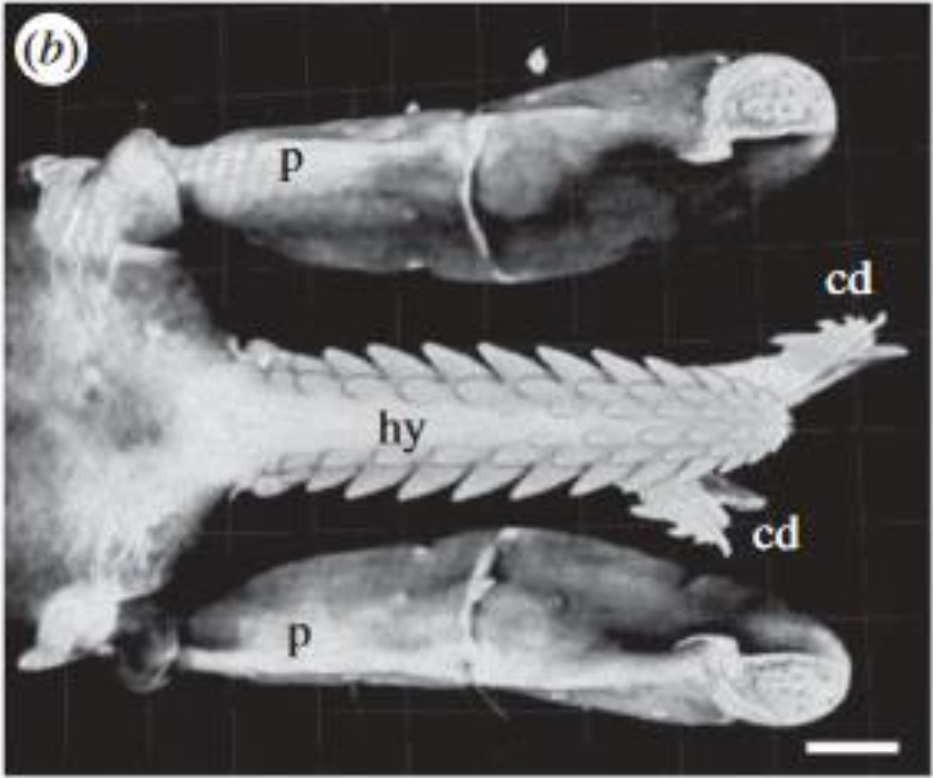
Les principales tiques se nourrissant sur les équidés en France sont des tiques qualifiées de « dures ». Les tiques sont des arthropodes acariens de grande taille, qui possèdent un exosquelette, et un corps en deux parties fusionnées (Figure 3). La première partie s'appelle le rostre, formant la tête de la tique, composée de chélicères, de pédipalpes et d'un capitulum qui sert de base à la tête. Ces différentes structures anatomiques permettent à la tique de piquer l'hôte à travers sa peau et de se nourrir de son sang. En effet, les chélicères en forme de pointe permettent de percer la peau de l'hôte, et l'hypostome situé sur la face ventrale du capitulum va permettre de s'enfoncer de plus en plus profondément dans la peau de l'hôte et de se maintenir accroché pour se nourrir dans les jours suivant la morsure (Richter *et al.*, 2013). Les pédipalpes ont majoritairement un rôle sensoriel, composées de chémorécepteurs gustatifs et olfactifs (Farge, 2012). Elles servent aussi à se placer correctement lors de la morsure en se posant de part et d'autre du capitulum (Richter *et al.*, 2013). Les

chéllicères ont aussi un rôle reproducteur car ils vont permettre l'insémination du spermatophore des tiques mâles, un organe mâle contenant les spermatozoïdes dans le pore génital femelle lors de l'accouplement (Carr *et al.*, 2016). La deuxième partie de la tique forme l'abdomen, qui est généralement recouvert d'un bouclier dorsal appelé scutum. La présence du scutum différencie les tiques dures des tiques molles, qui n'en possèdent pas. Les tiques dures possèdent aussi trois paires de pattes durant la stase larve, et quatre paires de pattes durant leurs stases nymphe et adulte leur permettant de se déplacer ou de s'accrocher à la végétation pendant la phase d'affût ou aux hôtes vertébrés pendant le repas sanguin. La différence taxonomique entre les différentes espèces de tiques peut être faite d'une part par le sillon anal, situé en face ventrale de la tique, qui peut se trouver devant ou derrière l'anus, et d'autre part par la présence ou l'absence de festons qui sont des crénelures régulières situées à l'extrémité de son scutum.

**Figure 3 : Anatomie de la face ventrale et dorsale des tiques dures (a) (d'après l'Institut national de santé publique du Québec) et détail du rostre d'une tique *Ixodes ricinus* nymphe (b) (d'après Richter *et al.*, 2013)**



p : pédipalpes ; hy : hypostome ; cd : chélicères.



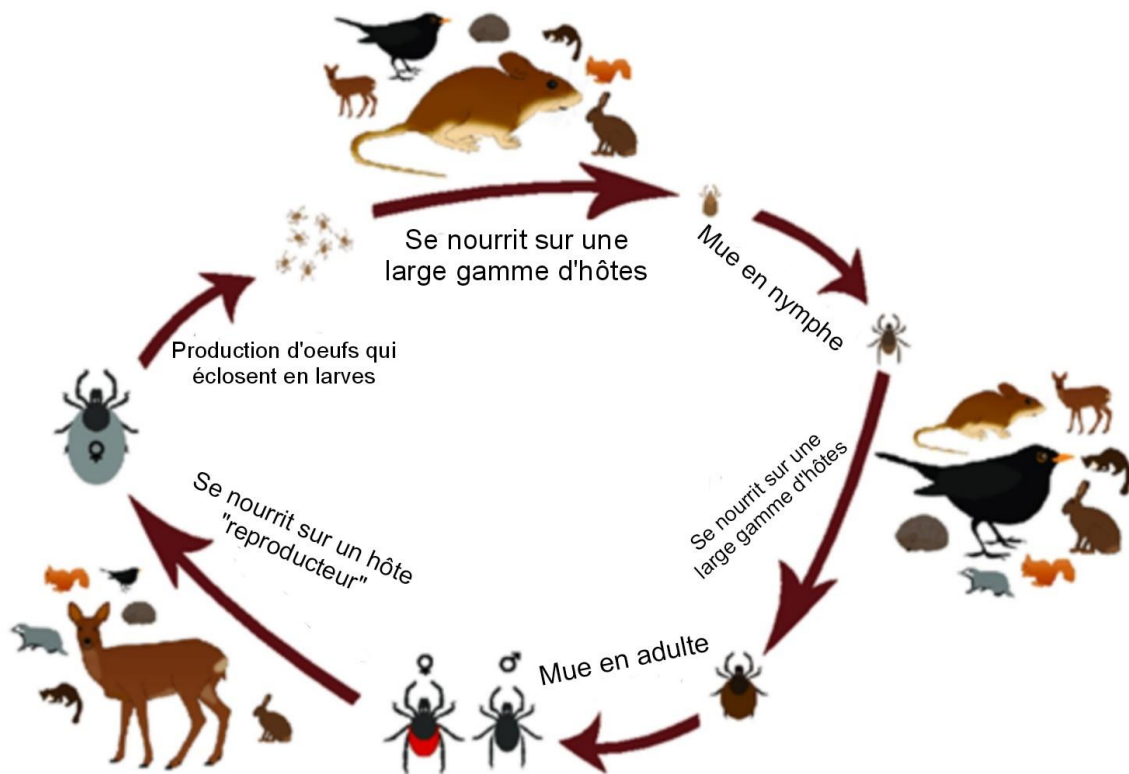
Les tiques dures en France possèdent un dimorphisme sexuel très marqué. En effet, le scutum des tiques femelles est plus petit que celui des tiques mâles, ce qui permet à la tique femelle de se gorger plus abondamment de sang lors de ses nourrissages par rapport aux tiques mâles. Les principales tiques dures en France sont toutes des tiques triphasiques, donc se nourrissant trois fois sur un hôte vertébré.

Les tiques possèdent aussi des organes d'olfaction appelés organes de Haller (Gebremedhin *et al.*, 2023). Ces organes sont situés sur les tarses des premières paires de pattes des tiques (Farge, 2012). Bien que les processus moléculaires en jeu soient mal connus, leur rôle a été mis en évidence pour la détection de l'humidité (Farge, 2012), de molécules relatives à la présence de leurs hôtes comme le dioxyde de carbone, et l'ammoniac ainsi que certains types de phéromones relâchés par les autres tiques (Sonenshine, 2004 ; Gherman *et al.*, 2012 ; Gebremedhin *et al.*, 2023).

#### **D. Caractérisation de la tique *Ixodes 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. Comme les autres tiques dures, la tique *I. ricinus* a trois stases de développement (Figure 4) : larve, nymphe et adulte qui se terminent après chaque gorgement et mue dans la stase suivante (Boulanger *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 nourrir sur des animaux de grande taille (en majorité des cervidés, des 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 est plus rare. Du fait de la grande diversité d'hôtes sur lesquels elle se nourrit, *I. ricinus* est qualifiée d'espèce télotrope.

Figure 4 : Cycle de vie des tiques *Ixodes ricinus* (d'après 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 à l'infestation par les tiques *I. ricinus* afin de proposer des pistes pour diminuer la probabilité d'exposition et par la suite, le risque des équidés aux agents pathogènes précédemment cités.

### **3. Facteurs associés à la présence et à l'activité de la tique *Ixodes ricinus***

Les différents facteurs de présence et d'activité 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 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).

En dehors de l'intervalle de températures comprises entre 5°C et 30°C, l'activité d'*I. ricinus* se retrouve fortement diminuée. En dessous de 5-7°C, les tiques se cachent dans les endroits à l'abri du froid comme les litières de feuilles ou sous les couches de neige (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 *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 sont 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, 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 et Lindgren, 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).

Au-delà de 30°C, une activité presque nulle est observée (Macleod, 1935 ; Beugnet *et al.*, 2009 ; Gethmann *et al.*, 2020). Une activité à des températures aux alentours de 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).

À 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'activité des tiques, le 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, 1998 ; 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). L'absorption 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 États-Unis avec une biologie similaire à *I. ricinus*. Une diminution de la densité de larves a été montrée un an après un épisode de 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 tiques 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 de pluie 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 des 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, montagnard...), on observe une distribution verticale étendue des tiques *I. ricinus*, allant de 0 à 2 000 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 1 000 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 - 1 000 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 1 000m et 2 000m d'altitude, avec une limite de 1 550 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.

#### **e. L'environnement gazeux**

L'environnement aérien et notamment les gaz présents peuvent aussi avoir un impact sur la présence de tique et leur activité. En effet, il a été montré chez *I. scapularis* qu'une augmentation du taux de CO<sub>2</sub> dans l'air stimule l'activité des tiques et augmente leur rapidité de marche (Städele, 2024). Les tiques sont sensibles à d'autres gaz relatifs à la présence d'hôtes comme l'ammoniac (Gebremedhin *et al.*, 2023). La détection du taux de CO<sub>2</sub> et des autres molécules volatiles s'effectue via l'organe de Haller, l'organe chémosensible situé sur leurs pattes. Le taux de CO<sub>2</sub> est notamment utilisé dans la capture de tiques grâce au drapeau à CO<sub>2</sub>. Un caisson diffuseur de CO<sub>2</sub> est apposé sur le drapeau de capture et disperse le CO<sub>2</sub> grâce à des tuyaux lors du passage du drapeau. Il a été observé une nette amélioration de l'effectif de tiques capturées grâce à cette méthode (Gherman *et al.*, 2012).

Les tiques sont aussi sensibles à des phéromones. Ces phéromones servent d'informations chimiques aux autres tiques de la même espèce et peuvent être utilisées dans différentes situations comme la prévention d'un danger ou l'utilisation d'hormones sexuelles. Pour *I. ricinus*, il a été montré qu'elles seraient sensibles aux constituants volatils des fèces de leur propre espèce. La détection de ces composants favoriserait l'arrêt de déplacement des tiques, et donc l'accouplement des tiques sur ces zones (Grenacher *et al.*, 2001). Ces phéromones sont utilisées dans certains acaricides ou pièges plus écologiques (Sonenshine, 2004 ; Gowrishankar *et al.*, 2021).

#### **f. Sols**

Il y a peu d'informations sur les effets des types de sols sur la densité de tiques *I. ricinus*. Cependant il a été observé que les populations de tiques étaient plus denses au niveau des sols humides (Logan *et al.*, 2024).

Il a été observé chez d'autres espèces de tiques (*Haemaphysalis leporispalustris*) au Canada une différence de densité de tiques en fonction de la proportion d'argile dans les sols (Gabriele-Rivet *et al.*, 2015). Une densité de tiques significativement plus forte dans les zones avec des sols ayant une proportion d'argile modérée (20 à 49 %) est observée par rapport aux sols avec d'autres proportions d'argile. Chez *I. ricinus*, il a été mis en évidence une densité plus forte de nymphes au niveau des sols argileux que des sols de grès (Boulangier *et al.*, 2024).

## **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 stases immatures se trouvent plus proches du sol (Dantas-Torres et Otranto, 2013). Cependant, cette répartition peut être modifiée pour toutes les stases 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).

*Ixodes 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 (Janzén *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 augmentée 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 (Janzén *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**

*Ixodes 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 de 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 ; Mysterud *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, 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*) (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 ; 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 en France 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 moyennes des charges en tiques peuvent varier selon les espèces d'oiseaux infestées de une à 15 tiques par animal (Marsot *et al.*, 2012 ; Hofmeester *et al.*, 2016). Les oiseaux vont surtout servir dans la propagation des tiques à longue distance (Adamska, 2020 ; Pedersen *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 citées 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 *et al.*, 2016 ; Hofmeester *et al.*, 2018), ou le Renard (*Vulpes vulpes*) (Hofmeester *et al.*, 2016). Leur charge en tiques moyenne varie de cinq 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 (L'Hostis *et al.*, 1996 ; Boyard *et al.*, 2007).

## 4. 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 équarrissages.

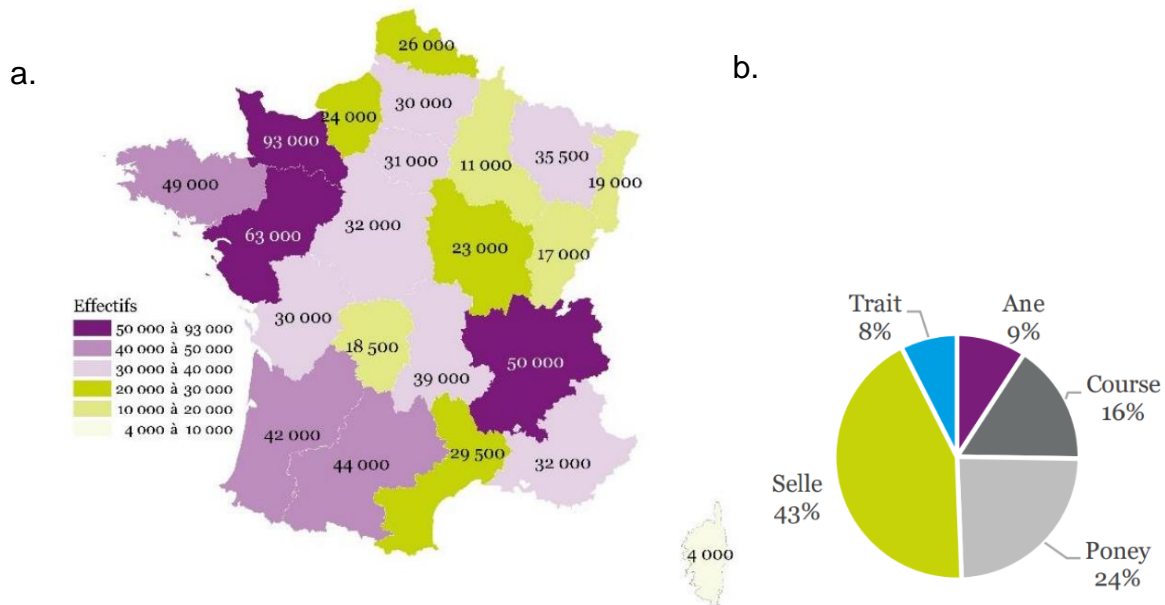
Si on s'intéresse à la répartition sur le territoire français (Figure 5 (a)), 31 % du cheptel total est localisé dans les régions du Nord-Ouest (Bretagne, Normandie et Pays de la Loire). Certains types de races ont une majorité d'individus au Nord-Ouest (chevaux de course et poneys), les chevaux de trait 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 grands types de races (Figure 5 (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 chevaux de course, composés des chevaux de galop et de trot, constituent 16 % des équidés en France. 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.

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 5 : Répartition des équidés en France par région (a) et par type de race (b) (d'après l'Ifce-OESC 2016)**



Nous présentons les caractéristiques spécifiques de chaque type d'équidés en France. Les informations relatives à chaque type d'équidés ont été récupérées à partir des sites internet officiels des instituts ou fédérations nationaux travaillant sur les équidés en France (IFCE et Fédération française de l'équitation (FFE)).

### **a. Les chevaux de course**

Selon l'IFCE, les chevaux de course sont divisés en deux catégories. La première catégorie se compose des chevaux de trot, alors que la deuxième catégorie se compose des chevaux de galop. Les chevaux de trot sont en grande majorité des chevaux de race trotteurs, notamment le Trotteur Français. Ils pratiquent surtout les courses de trot, attelés à un sulky ou montés par un jockey, sur un hippodrome. Les courses de galop sont surtout représentées par les races Pur-sang et Autre-Que-Pur-Sang (AQPS). Les courses de galop de plat et d'obstacles se font aussi en hippodrome.

Les chevaux de courses vont donc surtout être en majorité présents soit dans les boxes pendant les temps de repos, soit dans les hippodromes pendant les phases d'entraînement et de courses. Ces chevaux ont donc une exposition faible à l'infestation par les tiques.

Il est à noter que certains chevaux de course peuvent être destinés selon leur pedigree et leurs performances en courses à devenir des chevaux reproducteurs. Leur semence est utilisée dans l'insémination artificielle des juments reproductrices. Certains de ces

chevaux, bien qu'ils soient placés dans la catégorie des chevaux de courses, vivent en pâture ou en box-paddock, et ont donc une exposition renforcée aux tiques. Il en va de même pour les jeunes chevaux non encore formés pour la course ou les juments poulinières, qui ont un mode de vie en pâture et qui ont donc une exposition renforcée aux tiques.

### ***b. Les chevaux de selle***

Les chevaux de selle sont aussi communément appelés chevaux de loisir ou de sport. Ces chevaux sont surtout utilisés soit en centre équestre pour une utilisation par des particuliers, notamment pour des promenades ou des cours d'équitation, soit pour des compétitions d'équitation telles que le saut d'obstacle ou le dressage. Les chevaux de selle sont classés en trois catégories : les chevaux de « sport » qui représentent 42 % des chevaux de selle, 46 % des chevaux de selle sont des chevaux de « promenade » et les chevaux de « compagnie » qui représentent 12 % des chevaux de selle (Bettinelli, 2022). Les races de chevaux utilisés vont surtout être des races à tempérament équilibré et facile à monter, bien qu'il existe une diversité de races d'équidés pouvant être utilisés comme chevaux de selle. Le plus connu étant le Selle Français, qui est la race traditionnellement retrouvée en France. Les poneys, étant définis comme des équidés de moins d'1,48 m au garrot non ferré d'après la FFE, sont surtout montés par les jeunes cavaliers. Il existe aussi une multitude de races locales selon les régions comme le Camargue localisé dans la région éponyme, ou des races importées comme le Halfinger, originaire d'Autriche, ou le Lusitanien, originaire du Portugal.

Les chevaux de selle ont des lieux de vie variables selon leur utilisation. Les chevaux de centre équestre et de sport vont surtout vivre au sein de boxes dans les centres équestres avec des sorties régulières sur les carrières ou les manèges. Pour les chevaux de promenade ou de tourisme, ils vont être davantage au contact des environnements naturels notamment les forêts, et donc plus fréquemment en contact avec les milieux de vie d'*I. ricinus*. Les chevaux de compagnie ou de propriétaires peuvent soit être logés en boxes au même titre que des chevaux de centre équestre, soit dans des pâturages extérieurs, pouvant être un lieu de présence de tiques.

### ***c. Les chevaux de trait***

Les chevaux de trait sont caractérisés par une musculature et une morphologie puissante. Ces chevaux ont été historiquement utilisés pour le travail agricole et le transport de charges mais cette fonction a été délaissée peu à peu à cause de l'industrialisation. Ils sont maintenant utilisés surtout pour la consommation de viande chevaline et comme montures de centre équestre ou de tourisme. Plusieurs races régionales sont catégorisées comme chevaux de trait tels que le Comtois ou l'Ardennais.

Ce type de chevaux vit surtout en zone de pâturages ou zones boisées, qui sont des zones propices à l'infestation par les tiques.

#### **d. Les ânes**

Les ânes représentent tous les équidés de l'espèce *Equus asinus*. De la même manière que les chevaux de trait, les ânes ont été utilisés historiquement pour l'agriculture et le transport de marchandises. Ces usages ont été peu à peu délaissés et ont été remplacés par une utilisation de loisir, plus orientée vers le tourisme, avec une préservation du patrimoine culturel. Il existe plusieurs races d'ânes relatives aux régions françaises comme l'âne Normand ou l'âne Bourbonnais.

Les ânes vivent dans des zones similaires aux chevaux de traits, et sont donc plutôt retrouvés dans des zones où ils peuvent être exposés aux tiques.

### **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*, *Hyaloma anatolicum* et *Anocentor nitens* pour les plus abondantes) et dans des pays différents (Pakistan, Brésil, France) se sont penchées sur les facteurs pouvant influencer l'infestation des équidés par les tiques. D'après ces études, certaines races seraient plus sujettes à porter des charges de tiques conséquentes, comme chez les chevaux de trait, avec une prédominance pour la race Comtoise (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 la probabilité d'infestation est grande (Labruna *et al.*, 2001). Concernant les facteurs liés à l'environnement, la probabilité d'infestation est corrélée 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 par les tiques (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 la probabilité 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).

Cependant, les facteurs d'exposition des équidés à l'infestation par des tiques *I. ricinus* sont difficiles à quantifier, rendant complexe leur utilisation pour le calcul d'un coefficient d'interaction entre les tiques et les équidés. Lorsque l'on examine les interactions entre les bovins et les tiques *I. ricinus*, il a été observé une densité de tiques *I. ricinus* plus élevée dans les zones de pâturages bovins, et notamment les zones avec un indice de végétation élevé (Agoulon *et al.*, 2012 ; Sprong *et al.*, 2020).

## **5. Introduction à la Méthode d'Analyse Décisionnelle Multicritères**

La Méthode d'Analyse Décisionnelle Multicritères couplée à un Système d'Informations Géographiques (MCDA-SIG) est un outil qui permet d'évaluer et de comparer des alternatives dans un processus de décision, à partir de facteurs connus. Initialement utilisée pour présenter des résultats à des décideurs, la méthode MCDA est de plus en plus utilisée pour analyser et quantifier un risque donné, notamment dans les problématiques de santé (Marsh *et al.*, 2017). Elle a l'avantage d'être facile à utiliser, elle peut convenir dans des circonstances très différentes, par exemple pour l'identification des zones à risque d'influenza aviaire (Sanogo *et al.*, 2024), ou des méfaits de la drogue (Nutt *et al.*, 2010). Le résultat de la méthode MCDA se présente sous forme d'un, ou plusieurs scores. Le score calculé quantifie la performance d'une décision en fonction des critères qui lui ont été définis. Ce score peut être comparé aux autres scores obtenus selon des critères différents, ce qui permettra d'aider à la prise de décision. L'analyse MCDA s'effectue en quatre étapes détaillées ci-après.

### **A. Sélection des facteurs**

La sélection des facteurs intervenant dans le processus de décision est une étape primordiale de l'analyse MCDA. Elle peut s'effectuer notamment par une recherche bibliographique approfondie ou par des avis d'experts. Il est donc nécessaire de bien définir les facteurs qui auront un impact réel sur la décision (Cinelli *et al.*, 2020). D'un côté, prendre trop de variables alourdirait le modèle et les temps de calcul, d'un autre côté, ne pas prendre assez de facteurs signifierait prendre le risque d'obtenir un modèle peu informatif et qui ne prendrait pas en compte toutes les subtilités réelles qui interviendraient dans le calcul. Il est aussi possible de calculer plusieurs résultats en faisant varier les facteurs choisis, mais cela multiplie le temps de calcul.

Une fois les facteurs choisis, chaque facteur est associé à une variable. La variable choisie doit refléter au mieux le facteur sur lequel elle est associée pour refléter son impact sur le processus évalué. Les variables peuvent prendre plusieurs formes (somme, présence ou absence...), et peuvent être variables selon les données utilisées, ou associées à une incertitude en leur assignant, par exemple, une loi de probabilité. Le choix de ces variables est donc crucial afin de représenter au mieux chaque facteur. Une fois les variables sélectionnées, il faut les assembler entre elles afin de calculer le score.

### **B. Pondération des facteurs de risque**

La deuxième étape consiste en une pondération des variables choisies qui permettra par la suite de les agréger afin de calculer le score. Le plus simple consiste à pondérer les variables en associant un coefficient à chaque variable. Chaque coefficient est compris entre zéro et un, et va refléter l'importance du facteur dans la décision. Plus il est proche de 1, plus le facteur a un impact élevé sur le calcul du score, et donc sur la décision, et inversement, plus il est proche de zéro, moins il aura d'importance dans

le calcul (et donc de la décision). Il est à noter que la somme des coefficients d'une même catégorie de facteurs est égale à un.

Deux choix sont possibles pour attribuer les coefficients pour chaque variable représentant les différents facteurs. Le premier choix est une attribution de coefficients égaux pour tous les facteurs, soit par manque de données soit s'il a été décidé que tous les facteurs avaient une importance similaire pour le calcul du score. Le deuxième choix est d'attribuer des coefficients différents, généralement par une méthode de calcul (Cinelli *et al.*, 2020). Il existe plusieurs méthodes pour pondérer les variables comme la Technique d'Évaluation Simple à Attributs Multiples (SMART) (Patel *et al.*, 2017), la méthode ELECTRE (Govindan et Jepsen, 2016) ou la méthode PROMETHEE (Behzadian *et al.*, 2010). La méthode la plus connue est l'Analyse Hiérarchique des Procédés (AHP) créée par Saaty (1980). Cette méthode permet de faire intervenir plusieurs avis d'experts afin de calculer des coefficients pour chaque facteur de risque. Elle repose sur une succession de comparaisons deux à deux des différents facteurs, qui aboutit au calcul des coefficients. Ces comparaisons sont usuellement classés selon l'échelle définie par Saaty (1994) en classant les facteurs entre paires de facteurs selon un degré d'importance d'impact sur la décision compris entre un et neuf. Plus le degré choisi est élevé plus la différence d'impact sur la décision entre les deux facteurs est élevée. D'autres moyens de comparaison entre les facteurs peuvent être utilisés comme, par exemple, la moyenne géométrique pondérée ou la moyenne arithmétique pondérée (Krejčí et Stoklasa, 2018).

La méthode AHP est donc simple d'utilisation et permet d'avoir une pondération des facteurs rapide à condition d'obtenir des avis d'experts. Cependant, son principal défaut par rapport aux autres méthodes de pondération est la subjectivité des réponses des experts sélectionnés qui peut influencer les coefficients de pondération. Cette méthode est aussi très sensible à l'ajout ou la suppression d'un facteur lors du calcul des coefficients. En effet, l'ajout ou la suppression d'un facteur peut totalement déséquilibrer les valeurs des coefficients, et donc la valeur du score calculé. Cet effet est appelé une « inversion de rang » (Kordi, 2012). Les choix des facteurs et les comparaisons effectuées par les experts sont donc des éléments clés pour la réussite de cette méthode.

### **C. Agrégation des facteurs de risque**

La troisième étape consiste en l'agrégation des facteurs pour calculer le score recherché. Le but est de calculer un score par unité spatiale ou temporelle par la combinaison tous les facteurs avec leur coefficient respectif. Les variables sont d'abord normalisées pour prendre des valeurs comprises entre zéro et un, en prenant en compte leur minimum et leur maximum. La normalisation permet d'obtenir finalement un score compris entre zéro et un et de hiérarchiser les facteurs uniquement selon leur coefficient attribué et non du fait d'une valeur d'un paramètre qui serait plus élevée qu'un autre. En général, les facteurs sont jugés indépendants entre eux et la méthode MCDA ne prend pas en compte les interactions entre les facteurs. Cette hypothèse ne correspond parfois pas à la réalité (Cinelli *et al.*, 2020). Pour terminer le calcul du score, une somme pondérée des variables de chaque facteur de risque avec

leur coefficient attribué est effectuée. Le score va donc être propre à chaque zone spatiale ou temporelle, et à chaque jeu de données utilisé. La comparaison des scores des différentes zones ou données va donc amener à juger les décisions selon les scores obtenus.

#### **D. Validation du modèle**

Enfin, la dernière étape est la vérification des valeurs de risque obtenues à partir d'un modèle ou à partir de données de terrain. Lorsque ces données sont accessibles, une analyse statistique, comme un test de comparaison des moyennes ou un test de corrélation, peut être utilisée pour évaluer la cohérence entre les scores prédits par le modèle et les données observées sur le terrain. Cette méthode permet de vérifier la vraisemblance du modèle utilisé avec la réalité et les hypothèses effectuées.

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 (Ijzerman *et al.*, 2011). En calculant à nouveau le score en modifiant certaines variables ou certains coefficients selon un certain pourcentage (usuellement 25 %), il est possible de comparer le risque obtenu et de déterminer les facteurs de risque avec le plus d'impact sur le risque calculé. Cette méthode est très efficace pour déterminer les limites d'un modèle MCDA, mais elle est très coûteuse en temps selon le nombre de paramètres modifiés car elle nécessite de calculer à nouveau le score pour chaque modification.

Selon le résultat obtenu à partir de ces méthodes de vérification, il peut être pertinent de revoir le modèle utilisé en modifiant des paramètres en ajoutant ou en supprimant des facteurs.

#### **E. Combinaison de la Méthode d'Analyse Décisionnelle Multicritères avec les Systèmes d'Information Géographique et ses précédentes utilisations pour étudier les populations de tiques**

La méthode MCDA peut s'utiliser en collaboration avec des outils de systèmes d'information géographique (SIG) grâce à l'outil MCDA-SIG (Greene *et al.*, 2011). Cet outil est très utile lorsque l'on veut projeter les scores sur une carte et les régionaliser selon des territoires donnés. Dans ce cas, un score est calculé pour chaque territoire en utilisant les valeurs des variables relatives aux territoires. Des logiciels SIG peuvent être utilisés comme les packages SIG du logiciel de programmation R ou des logiciels spécialisés SIG comme QGIS ou ArcGIS.

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 à 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 fondant sur la littérature et les bases de données) ;
- l'altitude, avec l'utilisation de la source de données BD ALTI de l'Institut National de l'information Géographique et forestière (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'Office Français de la Biodiversité (OFB).

Ainsi, l'utilisation de la méthode MCDA repose sur de nombreux choix réalisés par les expérimentateurs. Il est donc nécessaire de concevoir que le résultat de deux méthodes MCDA sur une même problématique mais réalisé par deux groupes d'expérimentateurs différents peuvent aboutir à des résultats radicalement différents.



# Deuxième partie : production des cartes de score d'exposition des équidés à l'infestation par les tiques *Ixodes ricinus*

---

## 1. Contexte et objectifs

Dans un contexte où les maladies infectieuses transmises par les tiques représentent un enjeu sanitaire et économique majeur pour la filière équine, il est essentiel de trouver le moyen de prévenir ces maladies et de trouver les zones les plus à risque concernant l'exposition des équidés à l'infestation par les tiques. Cette prévention est d'autant plus justifiée dans la situation où certaines maladies sont majoritairement asymptomatiques, comme l'encéphalite à tiques, ou que les signes cliniques ne permettent pas un diagnostic rapide sans une morsure de tique connue, comme pour la borréliose de Lyme. Les tiques *I. ricinus*, qui sont les tiques les plus abondantes en France contribuent de façon importante au risque associé à ces infections, surtout pendant leur période d'activité maximale, vers la fin du printemps et le début de l'été, où l'exposition à leur infestation est maximale.

Comme nous l'avons vu dans la première partie, de nombreux articles mentionnent les conditions environnementales qui permettent un développement et une activité des tiques *I. ricinus*. En effet, leur survie dépend à la fois de facteurs abiotiques, comme les conditions météorologiques et l'altitude, et de facteurs biotiques comme la présence de végétation et d'hôtes permettant de réaliser leur repas sanguin nécessaire aux mues et à l'oviposition pour les tiques femelles.

Alors que des cartes de présence favorables aux tiques en France ont déjà été effectuées (Lebert *et al.*, 2022), aucune carte prenant en compte la présence d'équidés n'a été produite à notre connaissance. Pourtant, les équidés sont des espèces sensibles aux maladies transmises par les tiques. De plus, les équidés vivent ou passent régulièrement à proximité de zones favorables à la présence de tiques comme les prairies ou les forêts mais ont cependant des expositions variables à l'infestation par les tiques selon leur usage et leur mode de vie. Ces éléments montrent que le risque pour les équidés, associé à ces maladies, est très certainement non-négligeable.

Dans ce contexte d'appréciation du risque, pour les équidés associés aux maladies infectieuses à transmission vectorielle des équidés, l'objectif de cette étude a donc été de cartographier l'exposition de ces espèces à l'infestation par les tiques *I. ricinus*. Cette cartographie a reposé sur la prise en compte des facteurs qui favorisent, la présence et l'activité des tiques d'une part, et la présence des équidés d'autre part. Pour cela, la méthode MCDA-SIG a été retenue puisqu'elle permet de calculer un

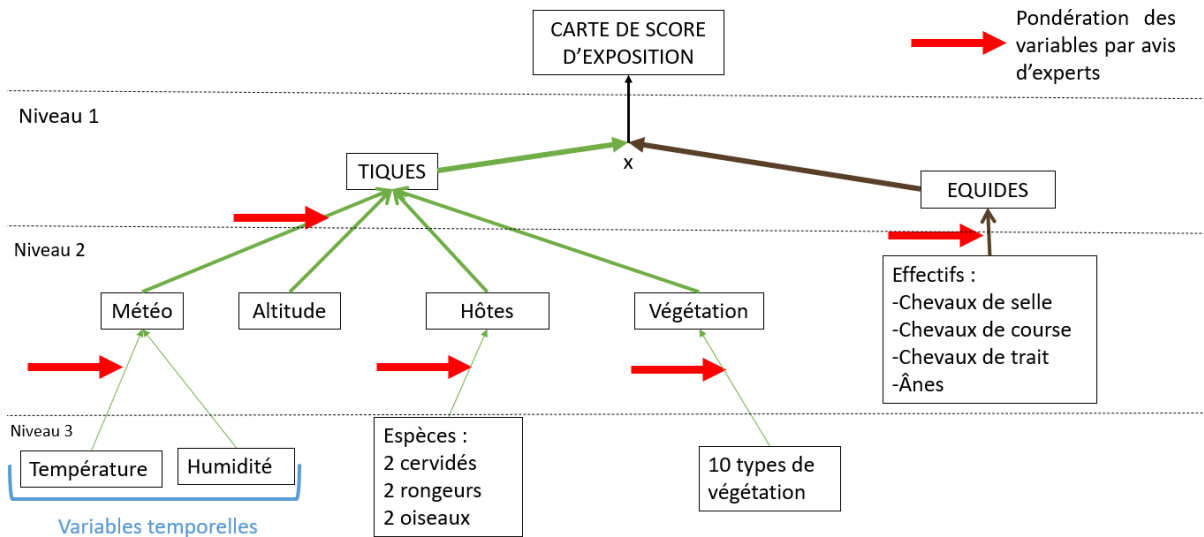
score d'exposition des équidés à l'infestation par les tiques, par territoire, en rassemblant des facteurs influençant cette exposition puis de représenter les scores obtenus sur des cartes grâce à un logiciel SIG. Cette méthode avait l'avantage d'être simple d'utilisation et était associée à des temps de calcul relativement courts, permettant ainsi de nous inscrire dans l'intervalle de temps qui nous était imparti. Les différents scores d'exposition associés à chaque territoire ont pu être comparés pour permettre de définir des zones où l'exposition était plus grande. Ces cartes se sont fondées sur l'étude de la période d'activité maximale des tiques *I. ricinus*. Ces cartes avaient aussi pour objectif de synthétiser un score d'exposition pour les différents types d'équidés, et d'ainsi prendre en compte l'hétérogénéité de leur mode de vie respectif qui peut influencer cette exposition à l'infestation par les tiques.

## 2. Matériel et méthodes

La méthode MCDA-SIG a été celle retenue afin de former les cartes de score d'exposition. Les facteurs choisis pour permettre le calcul du score d'exposition ont été les facteurs qui favorisaient la présence et l'activité des tiques. Ces facteurs de présence et d'activités des tiques ont été associés à un facteur qui représentait la présence d'équidés sur les milieux favorables aux tiques. Ces facteurs ont été déterminés à partir d'une revue bibliographique. Les facteurs favorisant la présence et l'activité des tiques choisis étaient : (1) les variables météorologiques (comprenant température et humidité relative), (2) l'altitude, (3) la végétation et (4) les animaux sauvages hôtes. Afin de refléter la présence des équidés, un facteur supplémentaire a été intégré, basé sur des données relatives à la densité des populations équines, et en tenant compte de la répartition géographique des zones favorables à la présence d'équidés. Une variable a ensuite été attribuée à chaque facteur. Le choix des facteurs et des variables associées ont été validés 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). Pour l'agrégation des variables, nous avons ensuite pris en compte des avis d'expertes en tiques et d'expertes en équidés grâce à la méthode de l'AHP pour pondérer ces variables. Les variables ont ensuite été normalisées de zéro à un 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 de présence des « tiques » et une carte de présence d'« équidés » pour les mois considérés. Les valeurs des communes de ces deux cartes ont été multipliées entre elles afin d'obtenir la carte de score d'exposition finale. Le détail du cheminement ayant conduit à la formation de la carte de score d'exposition ainsi que l'intervention des pondérations des différents facteurs par les expertes ont été détaillés sur la Figure 6. La France continentale a été choisie comme zone d'étude, soit la France métropolitaine sans la Corse, en considérant une échelle communale comme unité géographique la plus fine. Les mois où l'activité des tiques était maximale ont été choisis comme période d'étude, avec l'année la plus récente ayant des données disponibles, soit les mois d'avril, mai et juin de l'année 2022.

**Figure 6 : Processus de production de la carte de score d'exposition à partir des différentes variables.**

Les flèches rouges indiquent l'intervention des avis d'expertes. Les coefficients relatifs à chaque facteur ont été déterminés par les avis des expertes. Les cartes « tiques » et « équidés » ont été multipliées entre elles pour former la carte de score d'exposition finale (indiquée par « x »).



Les agrégations des facteurs ainsi que les cartes ont été réalisées à partir du logiciel de traitement statistique R (et son package sf (Pebesma, 2018)) et du logiciel de système d'information géographique QGIS.

## A. Facteurs de présence et d'activité des tiques, et facteur relatif aux équidés : 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 Safran-Isba-Modcou (SIM) de Météo-France. Le modèle SIM est un modèle hydrométéorologique composé de trois 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 ont été répertoriées dans le Tableau 1 :. Concernant le calcul des variables de température et d'humidité relative, nous nous sommes fondés sur les données quotidiennes des mois d'avril, mai et juin 2022. Les données utilisées sont représentées pour le 1<sup>er</sup> avril 2022 dans l'Annexe n°1. Les valeurs de températures moyennes, maximales et minimales ainsi que les humidités relatives moyennes quotidiennes ont été cartographiées à l'aide de pixels, représentés par des carrés de

8 km de côté. Les deux variables de température et d'humidité ont été 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, 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 favorables 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, **le nombre mensuel de jours favorables à l'activité des tiques** pour un seuil d'humidité relative de 70 % a été calculé. Cependant, comme seule l'humidité relative moyenne quotidienne était disponible par pixel, un jour était considéré comme favorable lorsque l'humidité relative moyenne quotidienne dépassait 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 2 000 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 25 m de côté et partagées 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 attribuée 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 zéro et un a été calculée pour chaque commune de la même manière que Lebert *et al.* (2022) :

- pour les altitudes comprises entre 0 et 1 000 m, la valeur d'adéquation était égale à un ;

- pour les altitudes comprises entre 1 000 et 2 000 m, la valeur d'adéquation était calculée par la formule :  $\text{valeur d'adéquation} = \frac{2\,000 - \text{altitude}}{2\,000 - 1\,000} = \frac{2\,000 - \text{altitude}}{1\,000}$  ;
- pour les altitudes supérieures à 2 000 m, la valeur d'adéquation était égale à zéro.

### 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 est fondée sur les données internes de l'IGN ainsi que les données de partenaires, notamment le Muséum National d'Histoire Naturelle et l'Office National des Forêts (ONF) pour les parcs et les forêts domaniales respectivement. Les données utilisées correspondaient aux données disponibles les plus récentes (décembre 2023). Les différents types de végétation pris en compte sont représentés dans l'Annexe n°3 et leurs définitions attribuées par l'IGN sont détaillées dans l'Annexe n°4. Les types de végétation considérés comme favorables à la présence et à l'activité d'*I. ricinus* et pris en compte étaient les forêts ouvertes, les forêts fermées de feuillus, les forêts fermées de conifères, les haies, les bois, les forêts fermées mixtes, les landes ligneuses, les peupleraies, les vergers et les vignes. Les types de végétation n'étant pas pris en compte étaient les bananeraies, cannes à sucre, mangroves et zones arborées non-présentes en France continentale ainsi que les rizières, landes herbacées et houblonnières, peu présentes en France continentale (dans 2, 18 et 45 communes respectivement) en plus du fait que ces types de végétation n'étaient pas favorables à la présence d'*I. ricinus* (Lebert *et al.*, 2022). Les types de végétation sélectionnés pouvaient être classés en deux catégories. En premier lieu il y avait les forêts caractérisées par leur surface arboricole et qui différaient entre elles par leur surface, la proportion de la surface couverte par la végétation (le couvert absolu) et la proportion de la surface d'un type de végétation parmi la surface de l'ensemble de tous les types végétations présents (le couvert relatif). Dans un second lieu les autres types de végétation qui comprenaient 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 (L'Hostis *et al.*, 1996 ; Randolph, 2001 ; Marsot *et al.*, 2012 ; Mihalca et Sándor, 2013 ; Takumi *et al.*, 2021 ; Rataud *et al.*, 2022). 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 a été 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 sont fondés 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 ont été réalisées à partir de 5 335 points d'écoute répartis dans toutes la France aux abords des tronçons routiers non urbanisés avec une distance d'au moins 1 km entre chaque point d'écoute. Il y a un premier inventaire dans chaque point d'écoute entre le 1<sup>er</sup> et le 30 avril et un deuxième entre le 15 mai et le 15 juin. Chaque espèce est dénombrée dans un cercle de 500 m 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 3 km de côté avec des abondances catégorisées de un à neuf. Les données utilisées, visibles dans l'Annexe n°5, sont les données de présence/absence ou les classes d'abondance de la dernière année de collecte des données pour chaque espèce. Les données utilisées pour les rongeurs étaient issues de l'étude de Lumbierres *et al.* (2022). Pour chaque espèce d'oiseau et de mammifère terrestre (16 132 espèces), une zone d'habitat a été estimée. Cette estimation s'est fondée sur les données de la liste rouge de l'Union International pour la Conservation de la Nature (UICN) où étaient 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 glaeolus*). 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
<b>Température de l'air</b>	Module SAFRAN du modèle hydrométéorologique SIM	Moyenne, minimum, maximum	1981 à 2024	Jour	France métropolitaine	8x8 km <sup>2</sup>	<a href="https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/donnees-changement-climatique-sim-quotidienne/">https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/donnees-changement-climatique-sim-quotidienne/</a>
<b>Humidité relative de l'air</b>	Module SAFRAN du modèle hydrométéorologique SIM	Moyenne	1981 à 2024	Jour	France métropolitaine	8x8 km <sup>2</sup>	<a href="https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/donnees-changement-climatique-sim-quotidienne/">https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/donnees-changement-climatique-sim-quotidienne/</a>
<b>Altitude</b>	Base de données BD ALTI de l'IGN	Moyenne	1987 à 2011	/	France métropolitaine	25x25 m <sup>2</sup>	<a href="https://geoservices.ign.fr/bdalti">https://geoservices.ign.fr/bdalti</a>
<b>Végétation</b>	Section Occupation du sol de la base de données BD TOPO de l'IGN	Surface	2008 à 2023	Trimestre	France métropolitaine	28x28 m <sup>2</sup>	<a href="https://geoservices.ign.fr/bdtopo">https://geoservices.ign.fr/bdtopo</a>
<b>Animaux hôtes (Chevreuil, <i>Capreolus capreolus</i>)</b>	Cartes CARMEN de l'OFB	Présence /absence	1998-2018	5 ans	France métropolitaine	Commune	<a href="https://professionnels.ofb.fr/fr/node/1089">https://professionnels.ofb.fr/fr/node/1089</a>
<b>Animaux hôtes (Cerf élaphe, <i>Cervus elaphus</i>)</b>	Cartes CARMEN de l'OFB	Présence /absence	1983-2020	Année	France métropolitaine	Commune	<a href="https://professionnels.ofb.fr/fr/node/1089">https://professionnels.ofb.fr/fr/node/1089</a>
<b>Animaux hôtes (Merle noir, <i>Turdus merula</i>)</b>	Cartes CARMEN de l'OFB	Classe d'abondance	1996-2017	Année	France métropolitaine	3x3 km <sup>2</sup>	<a href="https://professionnels.ofb.fr/fr/node/1089">https://professionnels.ofb.fr/fr/node/1089</a>

<b>Animaux hôtes</b> (Grive musicienne, <i>Turdus philomelos</i> )	Cartes CARMEN de l'OFB	Classe d'abondance	1996-2017	Année	France métropolitaine	3x3 km <sup>2</sup>	<a href="https://professionnels.ofb.fr/fr/node/1089">https://professionnels.ofb.fr/fr/node/1089</a>
<b>Animaux hôtes</b> (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 <sup>2</sup>	<a href="https://www.nature.com/articles/s41597-022-01838-w">https://www.nature.com/articles/s41597-022-01838-w</a>
<b>Équidés</b>	Estimation des effectifs sur le site stats et cartes de l'IFCE	Effectifs	2019 à 2022	Année	France	Département	<a href="https://statscartes.ifce.fr/effectif-dquids/par-departements_d76">https://statscartes.ifce.fr/effectif-dquids/par-departements_d76</a>
	Corine land cover 2018 de l' <i>European Environment Agency</i>	Surface	1990 à 2018	6 ans	Europe	100x100 m <sup>2</sup>	<a href="https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover/clc2018">https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover/clc2018</a>

### e. *Équidés*

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 ont été 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). À 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 (ONC), traits et ânes). Les effectifs par zone ont été 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 ont été extrapolés à la région ou au département. Les nombre d'équidés estimé par type de race et par département ont été téléchargés directement sur le site de l'IFCE. Les données utilisées correspondaient 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 ont été 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 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 de manière similaire à l'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 choisies, car elles ont été jugées comme pouvant convenir pour 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
Équipement 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
Milieus 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'avis des expertes spécialisées dans les équidés (les mêmes expertes ont été sollicitées pour la partie pondération des facteurs). Enfin, chaque effectif de groupe d'équidés par département a été réparti dans les communes du même département selon la proportion de surface de sol favorable de la commune.

## **B. Pondération des facteurs**

Pour la formation de quatre des cinq catégories de facteurs (météorologique, végétation, hôtes, équidés), ainsi que pour l'étape d'agrégation des catégories de facteurs pour former la carte de présence et d'activités des tiques, un modèle d'Analyse Hiérarchique des Procédés (AHP) a été effectué pour pondérer chaque facteur par catégorie. Concernant la cinquième catégorie de facteur (l'altitude), l'utilisation de l'AHP n'était pas nécessaire car elle ne nécessitait pas de regroupement de plusieurs sous-variables. L'AHP a permis de prendre en compte les avis des expertes en comparant deux à deux chaque facteur, puis l'ensemble de ces comparaisons ont permis de calculer des coefficients de pondération pour chaque facteur (Saaty, 1980). Les expertes sollicitées sont des scientifiques travaillant sur la biologie de la tique *I. ricinus* ou sur les équidés en France. Ces expertes ont été

classées en deux groupes, les expertes « tiques » pouvant répondre aux catégories liées aux tiques et les expertes « équidés » pouvant répondre aux catégories liées aux équidés. Les choix des expertes ont été recueillis sous la forme d'un questionnaire individuel de jugement leur permettant de comparer les facteurs de présence et d'activité deux à deux. Aucune concertation n'a été effectuée entre les expertes pour répondre au questionnaire. L'agrégation des jugements des expertes et les calculs des coefficients ont été réalisés par l'intermédiaire de l'outil Excel développé par Goepel (version datant du 08/07/2022) (Goepel, 2013). L'utilisation de l'AHP dans la création des cartes de score d'exposition est présentée dans la Figure 6, sous la forme des « Pondération des variables par avis d'experts ». Les questionnaires, les catégories liées aux tiques et aux équidés utilisées ainsi que la sélection des expertes et leur répartition ont été détaillés dans l'Annexe n°8. La cohérence des réponses des experts a été évaluée par deux indices : le Ratio de Cohérence (RC) et l'Indice de Cohérence Géographique (ICG). Le RC permet de décrire si les réponses d'un même expert sont cohérentes entre elles, alors que l'ICG permet de vérifier la cohérence des réponses entre les différents experts. Les réponses sont jugées cohérentes lorsque le RC est inférieur à 10 % et que l'ICG est inférieur à 0,35 (Saaty, 1980 ; Aguarón et Moreno-Jiménez, 2003). Les détails de calcul sur la feuille Excel et de la méthode AHP ont été décrits dans l'Annexe n°9.

### **C. Formation de la carte de score d'exposition**

Pour chaque mois de la période d'activité maximale des tiques *I. ricinus* (avril, mai et juin), les variables relatives à chaque facteur de présence et d'activité ont été normalisées de zéro à un 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 score d'exposition des équidés à l'infestation par les tiques *I. ricinus* en France a été obtenue pour chaque commune et pour chaque mois de la période d'activité maximale d'*I. ricinus* en effectuant la multiplication des valeurs de la carte de score de présence et d'activité de tiques par les valeurs de la carte de score de présence d'équidés. L'agrégation des différentes variables a été faite selon le schéma présenté dans la Figure 6.

## **3. Résultats**

### **A. Variables relatives aux facteurs de présence et d'activité des tiques, et au facteur de présence des équidés**

Les cartes des variables représentant les différents facteurs (météorologique, altitude, végétation, hôtes, équidés) à l'échelle communale sont visibles dans l'Annexe n°10. Aucune valeur de score d'exposition des équidés à l'infestation par les tiques *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, des températures favorables à la présence et à l'activité d'*I. ricinus*, principalement au mois de mai, ont été observées, alors que l'humidité relative de l'air était particulièrement favorable durant le mois d'avril. Le nord et l'ouest de la France étaient des zones particulièrement favorables à la présence et à l'activité des tiques concernant la température et l'humidité, quel que soit le mois de la période d'activité maximale d'*I. ricinus*. Concernant les catégories d'altitudes, la plupart du territoire français était favorable à la présence et à l'activité d'*I. ricinus*. Seuls le Massif central, les Pyrénées et les Alpes avaient des altitudes supérieures à 1 000 m, ce qui diminuait 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 avaient 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 avaient 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 avaient des répartitions homogènes sur toute la France, c'est le cas pour le Chevreuil, et le Mulot sylvestre. Le Cerf élaphe avait des proportions proches de 100 % sur l'ensemble des massifs, et nulles sur le reste du territoire français. Concernant le campagnol roussâtre, des proportions de présence plus élevées au niveau du sud de la France ont été observées, avec des valeurs nulles sur le pourtour méditerranéen. Pour les classes d'abondance des oiseaux, les deux espèces présentaient des zones de classes d'abondance élevées sur toute la France. Cependant, des classes d'abondances faibles pour la Grive musicienne ont été observées au niveau du pourtour méditerranéen.

Enfin, concernant les effectifs des équidés, une prédominance de chevaux de selle a été remarquée, comparé 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. Une forte hétérogénéité sur le territoire français pour les chevaux de course a été observée, 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 présence et d'activité**

La hiérarchisation des facteurs de présence et d'activité obtenue après l'AHP est synthétisée dans le Tableau 3 :. Ici le RC et l'ICG étaient inférieurs à 10 % et 0,35, respectivement, pour toutes les catégories, attestant de la cohérence des réponses des expertes.

Au niveau des réponses d'experts, huit expertes 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 expertes 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 coefficients sont généralement plus élevés pour les forêts, avec des valeurs élevées pour les « catégories forêt fermée de feuillus » (25,1 %) et « forêt fermée mixte » (23,0 %). Concernant les quatre catégories de facteurs favorisant la présence et l'activité des tiques, les hôtes des tiques ont été jugés le facteur le plus important (33,2 %), suivi des facteurs météorologiques (30,2 %), de la végétation (22,7 %) et de l'altitude (13,9 %). Enfin, concernant les groupes d'équidés, les ânes (42,3 %) et les chevaux de trait (41,1 %) ont été jugés les plus favorables à être exposés à l'infestation par *I. ricinus* comparés 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 pour chaque groupe d'équidés, nous avons sélectionné uniquement celles jugées favorables par au moins quatre des six expertes ayant répondu. Les choix des expertes sont visibles sur le Tableau 4 : Le groupe des chevaux de trait était le groupe d'équidés avec le plus d'occupations de sol favorables (huit sur neuf occupations de sol favorables). Au contraire, le groupe des chevaux de course était le groupe avec le moins d'occupations de sol favorables (trois sur neuf occupations de sol favorables). Les chevaux de trait occupaient principalement des occupations de sol comportant de la végétation. Les chevaux de course occupaient principalement soit les lieux de compétition (comme les hippodromes compris dans l'occupation de sol « Équipements 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 occupaient tous les deux six occupations de sol sur neuf, avec un mélange entre les occupations de sols d'habitation (les écuries comprises dans l'occupation de sol « Équipements 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 présence et d'activité liés à la présence et l'activité des tiques *I. ricinus*, ainsi que le facteur relatif aux groupes d'équidés étant les plus exposés à l'infestation par *I. ricinus***

Catégorie	Facteurs de présence et d'activité	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 %		
	Vergers	5,0 %		
	Vigne	2,2 %		
Catégories	Météo	30,2 %	1,4 %	0,05
	Altitude	13,9 %		
	Végétation	22,7 %		
	Hôtes	33,2 %		
Équidés	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'expertes ayant choisis les occupations de sol favorables à la présence d'équidés pour chaque groupe d'équidés sur les six expertes interrogées**

En vert, les occupations de sol retenues, et en rouge les occupations de sol rejetées.

Terrains	Groupes d'équidés			
	Trait	Course	Selle	Anes
Espaces verts urbains	4	2	5	5
Équipements 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 score de présence et d'activité des tiques *Ixodes ricinus*, de score de présence d'équidés sur les milieux favorables aux tiques et du score d'exposition des équidés à l'infestation par les tiques *Ixodes ricinus***

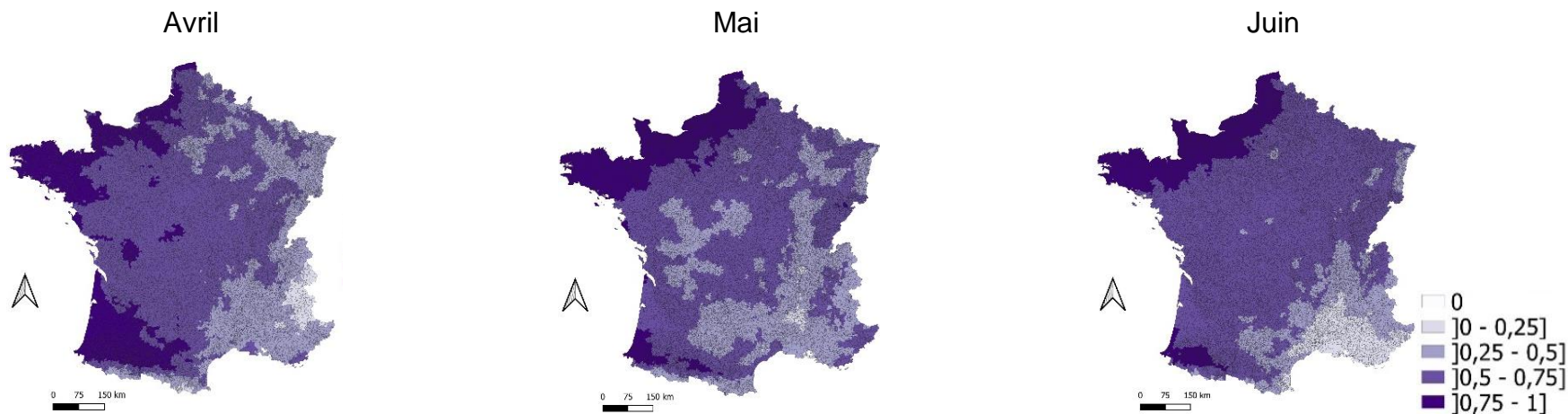
Les cartes pour chaque catégorie de facteurs de présence et d'activité des tiques *I. ricinus* obtenues par la méthode AHP et l'agrégation des avis d'expertes ont été représentées sur la Figure 7. Parmi les variables associées aux facteurs de présence et d'activité liées aux tiques, seules les variables météorologiques variaient selon le mois, les autres restaient fixes au cours du temps, du fait des données utilisées. Concernant la variable météorologique agrégée, des zones favorables constantes sur les trois mois ont été observées au nord-ouest de la France ainsi que vers la Nouvelle-Aquitaine et les Pyrénées. Les Alpes ainsi que le pourtour méditerranéen étaient, au contraire, les zones avec les valeurs de score de présence et d'activités des tiques les plus basses. Pour l'altitude, la plupart du territoire français était 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 1 000 m, ce qui diminuait la probabilité d'observer des tiques à l'affût. Pour les hôtes, la répartition des valeurs de score de présence et d'activités des tiques formaient des zones hétérogènes avec des valeurs moins importantes sur le pourtour méditerranéen. Enfin, la carte de végétation montrait des valeurs de score de présence et d'activité des tiques moins importantes que celles des autres cartes (avec un maximum à 0,242). Certaines zones hétérogènes, avec notamment des valeurs plus basses vers les régions de Normandie, Bretagne, et des Hauts-de-France ont été remarquées.

Les variables normalisées associées à chaque facteur de présence et d'activité ont été regroupées en une carte avec un score de présence et d'activité des tiques par commune. Ces cartes ont été regroupées par mois, et les scores ont été calculés par la somme pondérée des coefficients calculés grâce à la méthode AHP et aux avis d'expertes. Les cartes de score de présence et d'activité des tiques *I. ricinus* et de scores de présence d'équidés sur les milieux favorables aux tiques sont visibles sur la

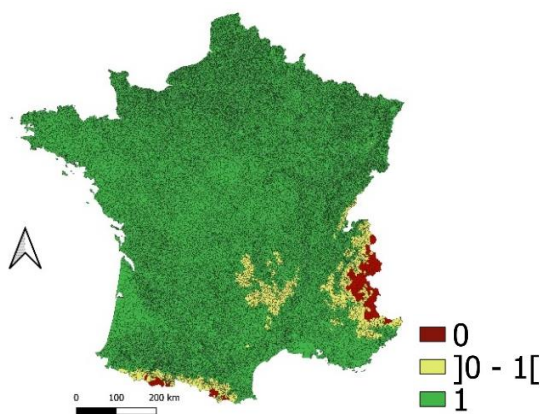
Figure 8. Concernant les cartes de score de présence et à l'activité d'*I. ricinus*, aucun territoire avec un score nul en France n'a été observé. Des zones favorables ont pu être observées sur le nord-ouest et le sud-ouest de la France, et des zones moins favorables au niveau des côtes méditerranéennes. Ces zones étaient réparties de la même manière sur les trois mois d'avril, mai et juin 2022, cependant des différences de valeurs de scores plus marquées au mois de mai ont pu être remarquées, avec une diminution des scores dans le centre de la France comparé aux autres mois. Concernant la carte des scores de présence d'équidés sur les milieux favorables aux tiques, la répartition des valeurs les plus élevées était similaire à la répartition des chevaux de selles visible dans l'annexe n°10. Les cartes de score d'exposition des équidés à l'infestation par les tiques *I. ricinus* par mois formées à partir des cartes de score de présence et d'activité des tiques ainsi que de la carte de score de présence des équidés sur les milieux favorables aux tiques sont représentées sur la Figure 8. Les valeurs de score d'exposition étaient comprises entre 0 et 5,6 %. Très peu d'évolution entre les cartes des différents mois ont été observés, avec tout de même de légères modifications au niveau des communes avec les valeurs de score les plus faibles. De plus, la répartition des valeurs de score les plus élevées était très similaire à la répartition des valeurs de la carte de score de présence d'équidés sur les milieux favorables aux tiques *I. ricinus*. Les valeurs les plus élevées étaient surtout condensées au nord-ouest, sur le pourtour méditerranéen ainsi qu'au centre de la France.

**Figure 7 : Cartes des variables normalisées associées à chaque catégorie de facteurs de présence et d'activité des tiques *Ixodes ricinus* pour les mois d'avril, mai et juin 2022**

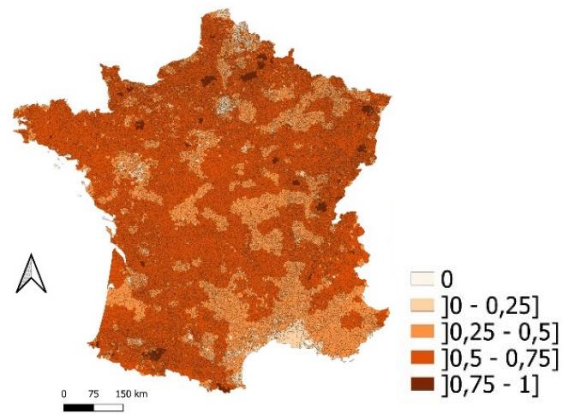
a. Météorologie



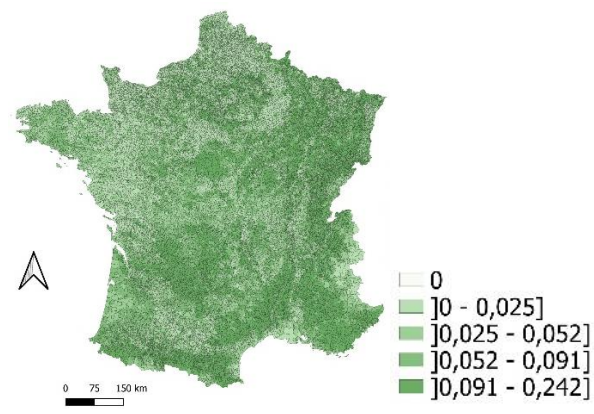
b. Altitude



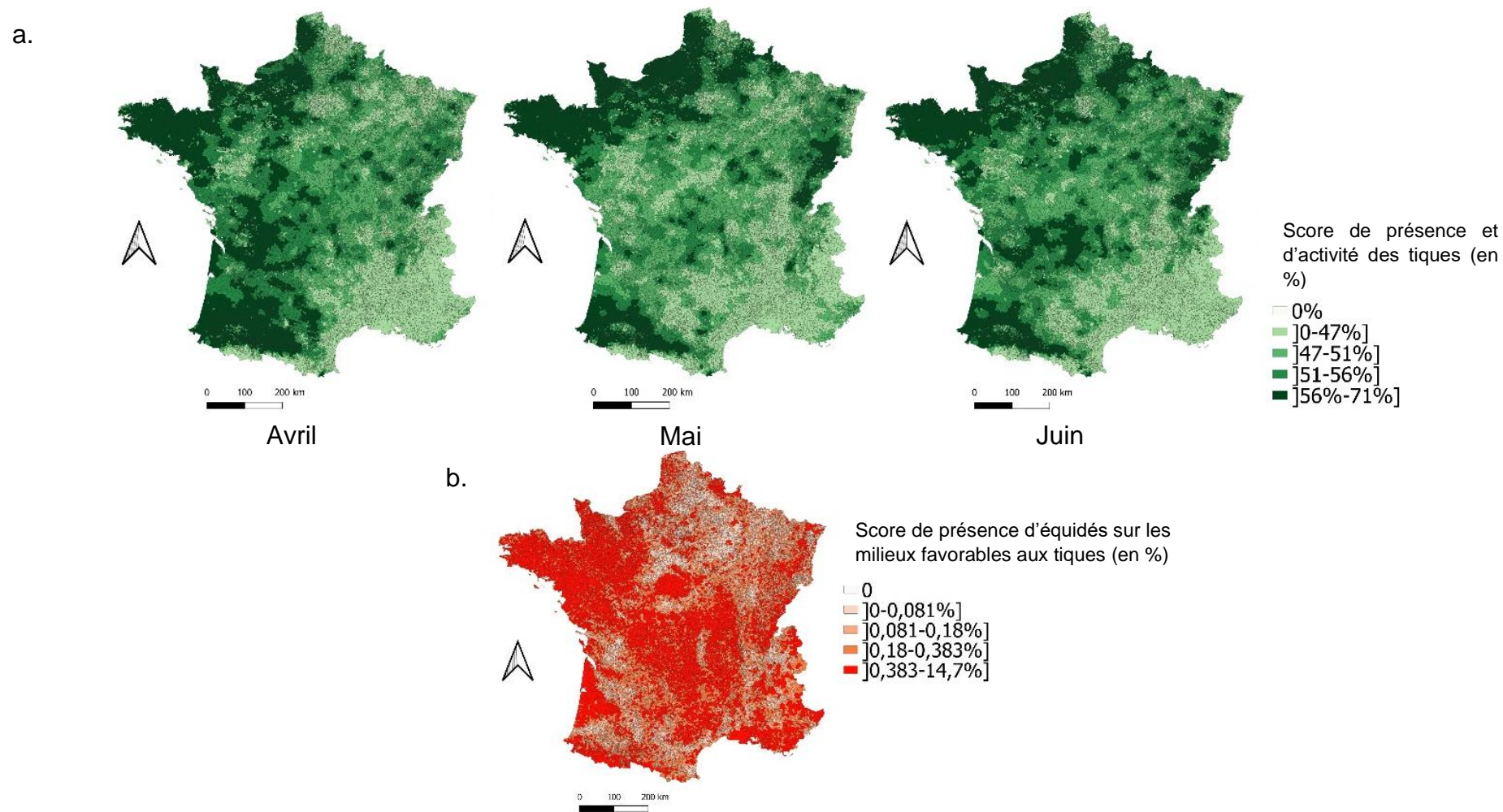
c. Hôtes



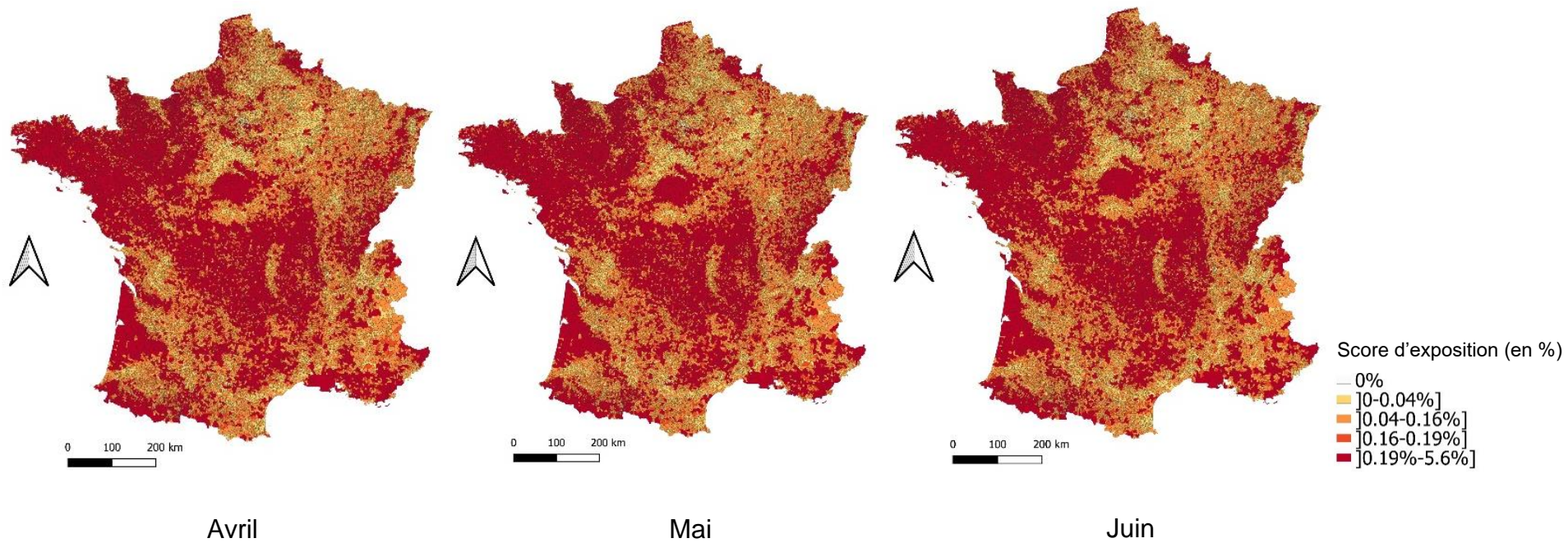
d. Végétation



**Figure 8 : Cartes de score de présence et d'activité des tiques *Ixodes ricinus* (a), de score de présence d'équidés sur les milieux favorables aux tiques *Ixodes ricinus* (b), ainsi que de score d'exposition des équidés à l'infestation par les tiques *Ixodes ricinus* (c) pour les mois d'avril, mai et juin 2022**



C.



## 4. Discussion

### A. Résultats obtenus

L'objectif de cette étude était de quantifier et de cartographier l'exposition des équidés à l'infestation par les tiques *I. ricinus* sur la France continentale. Les cartes mensuelles obtenues étaient relativement similaires, avec des valeurs de score élevées condensées au nord-ouest, sur le pourtour méditerranéen ainsi qu'au centre de la France. Toutefois, les valeurs obtenues étaient globalement plutôt faibles, comprises entre 0 % et 5,6 %. Il semblerait que la répartition spatiale du score d'exposition soit très proche de celle obtenue pour les populations d'équidés, notamment des effectifs des chevaux de selle. Ces résultats ont pu remettre en question l'importance des autres facteurs dans le calcul du score. Les scores de présence des équidés étaient très faibles comparés aux scores de présence et d'activité 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 au niveau des zones avec un score de présence d'équidés faible, ce qui aura pour conséquence une répartition similaire entre le score de présence d'équidés et le score d'exposition final obtenu. Nous avons choisi la formule multiplicative pour la formation des cartes de score d'exposition finales plutôt que la formule additive. En effet, la formule multiplicative semblait plus réaliste, car, dans l'hypothèse où le score de présence et d'activité des tiques, ou celui de présence des équidés, serait nul dans une commune donnée, elle conduit à un score d'exposition nul pour cette même commune. À l'inverse, la formule additive aurait entraîné une compensation, générant un score d'exposition non nul même dans des zones dépourvues de tiques ou d'équidés.

Nous avons représenté les cartes pour les mois d'avril, mai et juin, car ces mois correspondaient à la saison où la tique était la plus active (Boulanger *et al.*, 2019 ; Kahl et Gray, 2023). Bien que l'activité des tiques soit aussi remarquable en automne et à la fin de l'été, le pic d'activité se situe surtout en fin de printemps et début de l'été. Ces mois sont aussi propices à une sortie plus fréquente des équidés en milieu naturel, ce qui augmente leur exposition à l'infestation par les tiques. 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 score d'exposition d'avril jusqu'à juin. Concernant l'année, nous avons choisi de représenter les cartes de score d'exposition pour l'année 2022 puisque c'était l'année où les données les plus récentes correspondant aux équidés étaient disponibles. Certaines données étaient plus anciennes (comme les hôtes par exemple), mais comme l'évolution de ces données a été supposée minime, nous les avons considérées utilisables pour représenter la situation en 2022. Une autre façon de représenter les cartes de score d'exposition aurait pu être de les représenter pour chaque groupe d'équidés, en obtenant quatre cartes (une pour chaque groupe) pour chaque mois d'avril mai et juin. Cependant, représenter le score d'exposition 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 l'exposition des équidés à l'infestation par les tiques en France *via* la méthode MCDA. Cependant, d'autres études ont essayé d'établir des cartes de présence des tiques *I. ricinus* en France (Lebert *et al.*, 2022). Nous n'avons pas souhaité utiliser ces cartes dans le cadre de notre étude car nous souhaitions utiliser des variables plus spécifiques aux tiques (avec par exemple des variables météorologiques à la place des variables de climat), et mobiliser 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 et des seuils considérés**

Les facteurs pris en compte pour générer les cartes 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 pour laquelle l'activité des tiques est reconnue comme diminuée, contrairement à l'humidité relative de l'air. Ainsi, l'utilisation de l'humidité relative de l'air permettait de placer aisément une valeur seuil et de déterminer 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 observée à partir de 80 % (Macleod, 1935 ; Gray, 1998 ; 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, ce qui semblait cohérent par rapport à la variation de la moyenne d'humidité relative d'une journée à une autre. Une autre solution aurait pu être d'utiliser une méthode de logique floue linéaire (Vitez *et al.*, 1996) en attribuant une probabilité comprise entre zéro et un pour un jour donné en fonction de la moyenne de température ou d'humidité relative de l'air. La probabilité atteindrait une valeur de un lorsque la température ou l'humidité moyenne sont optimales, et diminuerait progressivement à mesure que ces paramètres s'éloignent de ces valeurs, jusqu'à devenir nulle pour des conditions météorologiques incompatibles avec l'activité des tiques. Cette approche offrirait une plus grande flexibilité pour intégrer les imprécisions ou les incertitudes liées aux seuils d'activité des tiques.

Aucune concertation entre les expertes n'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 expertes. Il est cependant à noter que, dans notre étude, il n'y avait que peu de variabilité entre les réponses des expertes ; 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 score, dans ce cas un score d'exposition, à partir de valeurs de variables basés sur des facteurs identifiés comme étant des facteurs connus pour la survenue du danger étudié, et de combiner des SIG couplés à des avis d'experts. L'avantage de l'analyse MCDA est qu'elle est simple d'utilisation, rapide, et nécessite uniquement de collecter des données sur les facteurs 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'AHP a été utilisée pour hiérarchiser et pondérer les facteurs. 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 expertes, avec quatre réponses au questionnaire portant sur la présence et l'activité des tiques et six réponses au questionnaire portant sur la présence d'équidés sur les milieux favorables aux tiques. Il n'y a à notre connaissance pas de nombre d'experts minimum pour que les résultats soient considérés comme fiables. 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 », fondée sur les définitions de l'IFCE, ne permettait pas de différencier les chevaux de course à l'entraînement de ceux d'élevage 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 différente. En effet, les chevaux d'élevage vivent dans des pâtures alors que les chevaux à l'entraînement sont plus souvent hébergés au box.

### **D. Interprétation du score d'exposition obtenu**

Les cartes réalisées sont incluses dans un travail de préparation à une thèse d'Université dont l'objectif est de représenter une carte de risque des équidés vis-à-vis de l'infection à *B. burgdorferi s.l.* Dans ce contexte, un calcul d'une probabilité d'exposition aurait été pertinent pour ensuite permettre le calcul d'un risque (qui correspond à la multiplication de la probabilité d'exposition au danger, de la probabilité

d'émission du danger et des conséquences). Cependant, grâce à la méthode MCDA, nous sommes parvenus à calculer un score d'exposition pour chaque commune et chaque mois considéré. Ce score d'exposition obtenu ne peut pas être directement considéré comme une probabilité d'exposition. En effet, le résultat de la méthode MCDA est un score compris entre zéro et un qui n'a de sens que lorsqu'il est comparé avec les autres valeurs de score obtenus. Pour arriver à une valeur de probabilité, il aurait été nécessaire de prendre en considération d'autres composantes dans le calcul. Des variables relatives à certains aspects de l'environnement auraient pu être pris en compte pour consolider le calcul de la probabilité d'exposition comme la présence de certains types de végétation. Des variables relatives à l'utilisation de substances efficaces contre les tiques comme la doramectine (Davey *et al.*, 2012 ; Nadal, 2023) ou l'utilisation d'antiparasitaires contenant de la phoxime comme le Sebacil® aurait également pu être intégrées au calcul du score pour affiner cette appréciation de l'exposition. Cependant, dans le temps qui était imparti et des données disponibles, il était difficile d'appliquer des facteurs plus précis sachant qu'il n'existe que très peu d'études ayant mis en évidence des facteurs d'exposition des équidés à l'infestation par les tiques *I. ricinus* (Nadal, 2023).

## **E. 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). Des sources françaises ont été privilégiées, 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, de par l'échelle plus restreinte et l'utilisation de source de données propres à la France, que les modèles internationaux (par exemple les modèles Copernicus pour les variables météorologiques disponibles à l'échelle mondiale). Pour les données relatives à la végétation, nous avons choisi les données de la base de données BD TOPO qui possédait des types de végétation permettant de comparer les densités d'*I. ricinus* selon le type de végétation. Les types de végétation contenues dans d'autres sources de données comme la BD FORET de l'IGN ou le Corine Land Cover ne permettaient pas de faire facilement ces comparaisons. En effet, la base de données BD TOPO répertorie différents types de végétation, notamment les forêts de conifères, de feuillus, les forêts ouvertes, ainsi que d'autres formations arbustives, comme les landes ligneuses. Il est avéré que ces variations influent 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 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 sont relativement imprécises dans leur définition lors de leur utilisation pour déterminer la présence d'équidés. En effet, nous avons considéré l'occupation « équipements 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.

## F. Perspectives

L'objectif des cartes que nous avons réalisées était d'observer ce qu'il était possible de concevoir dans un temps relativement court, pour ensuite perfectionner les futures cartes de risque établies dans le cadre de la thèse d'Université précédemment décrite. 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 obtenues sur les cartes finales avec des valeurs de charge en tiques 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 scores d'exposition calculés pour les 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 de Spearman. Concernant la deuxième étape, l'objectif d'une analyse de sensibilité consiste à faire varier les valeurs des variables contribuant à la formation de la carte de score d'exposition 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 score 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 ayant le plus d'impact sur les résultats, car les cartes montrent une répartition des scores très semblable à la répartition des scores de présence d'équidés. Les autres variables qu'il aurait pu être intéressant d'étudier au travers d'une analyse de sensibilité sont les coefficients relatifs à chaque facteur, obtenus par la méthode AHP. En effet, on a pu observer que la répartition des scores de présence de tiques était similaire 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 scores de présence de tiques en France, et *in fine*, sur les valeurs de score d'exposition des équidés à l'infestation par les tiques.

# Conclusion

---

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

Les résultats obtenus présentent des valeurs de score faibles, avec un maximum à 5,6 %. Des zones avec des scores élevés en Bretagne, en Normandie ainsi qu'au centre de la France ont été observées. Cette répartition était constante sur les trois mois de la période d'activité d'*I. ricinus* avec peu de variations temporelles. La répartition du score d'exposition visible sur les trois cartes était très similaire à la répartition des scores de présence des équidés sur les milieux favorables aux tiques et plus particulièrement, à la répartition des effectifs des chevaux de selle. Une validation des résultats obtenus dans le cadre de cette étude par une comparaison avec des données de collectes de tiques sur des équidés pourrait être effectuée, afin de vérifier si les résultats concordent avec 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 des valeurs obtenues.



# 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>]
- AGOULON, A., MALANDRIN, L., LEPIGEON, F., *et al.* (2012) A Vegetation Index qualifying pasture edges is related to *Ixodes ricinus* density and to *Babesia divergens* seroprevalence in dairy cattle herds. *Veterinary Parasitology* vol. 185, n° 2, p. 101-109. [<https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2011.10.022>]
- 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](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>]
- BEHZADIAN, M., KAZEMZADEH, R.B., ALBADVI, A., *et al.* (2010) PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research* vol. 200, n° 1, p. 198-215. [<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.01.021>]
- 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>]
- BETTINELLI, L. (2022) Les questionnements éthiques rencontrés par les vétérinaires équins en France : étude qualitative. Thèse de médecine vétérinaire, VetAgro Sup, n°070
- 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>]
- BONNET, S., BOULANGER, N. (2019) Tiques, lyme & cie. Paris, SCITEP.
- BOULANGER, N., ARAN, D., MAUL, A., *et al.* (2024) Multiple factors affecting *Ixodes ricinus* ticks and associated pathogens in European temperate ecosystems (northeastern France). *Scientific Reports* vol. 14, n° 1, p. 9391. [<https://doi.org/10.1038/s41598-024-59867-x>]
- 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>]
- CARR, A.L., SONENSHINE, D.E., STRIDER, J.B., *et al.* (2016) Evidence of female sex pheromones and characterization of the cuticular lipids of unfed, adult male versus female blacklegged ticks, *Ixodes scapularis*. *Experimental & Applied Acarology* vol. 68, n° 4, p. 519-538. [<https://doi.org/10.1007/s10493-015-0009-y>]
- 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>]
- CINELLI, M., KADZIŃSKI, M., GONZALEZ, M., *et al.* (2020) How to support the application of multiple criteria decision analysis? Let us start with a comprehensive taxonomy. *Omega* vol. 96, p. 102261. [<https://doi.org/10.1016/j.omega.2020.102261>]
- 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>]
- DAVEY, R.B., POUND, J.M., KLAVONS, J.A., *et al.* (2012) Analysis of doramectin in the serum of repeatedly treated pastured cattle used to predict the probability of cattle fever ticks (Acari: Ixodidae) feeding to repletion. *Experimental & Applied Acarology* vol. 56, n° 4, p. 365-374. [<https://doi.org/10.1007/s10493-012-9525-1>]
- 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.
- DELAUNAY, C. (2023) Séroprévalence et prévalence de *Babesia caballi* et *Theileria equi* chez les chevaux de trait en France: étude d'une zone pilote en région

- Auvergne-Rhône-Alpes. Thèse de médecine vétérinaire, École nationale vétérinaire d'Alfort
- 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>]
- DIVERS, T.J. (2013) Equine Lyme Disease. *Journal of Equine Veterinary Science* vol. 33, n° 7, p. 488-492. [<https://doi.org/10.1016/j.jevs.2013.03.187>]
- DIVERS, T.J., MONGODIN, E.F., MILLER, C.B., *et al.* (2022) Genomic hybrid capture assay to detect *Borrelia burgdorferi*: an application to diagnose neuroborreliosis in horses. *Journal of Veterinary Diagnostic Investigation* vol. 34, n° 5, p. 909-912. [<https://doi.org/10.1177/10406387221112617>]
- 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>]
- DZIĘGIEL, B., ADASZEK, Ł., KALINOWSKI, M., *et al.* (2013) Equine granulocytic anaplasmosis. *Research in Veterinary Science* vol. 95, n° 2, p. 316-320. [<https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2013.05.010>]
- 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>]
- FARGE, C. (2012) Etude de l'anatomie interne des femelles *Ixodes ricinus*. Thèse de médecine vétérinaire, École nationale vétérinaire de Lyon
- GABRIELE-RIVET, V., ARSENAULT, J., BADCOCK, J., *et al.* (2015) Different Ecological Niches for Ticks of Public Health Significance in Canada. *PLOS ONE* vol. 10, n° 7, p. e0131282. [<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0131282>]
- GEBREMEDHIN, M.B., XU, Z., KUANG, C., *et al.* (2023) Current Knowledge on Chemosensory-Related Candidate Molecules Potentially Involved in Tick Olfaction via Haller's Organ. *Insects* vol. 14, n° 3, p. 294. [<https://doi.org/10.3390/insects14030294>]
- 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>]
- GHERMAN, C.M., MIHALCA, A.D., DUMITRACHE, M.O., *et al.* (2012) CO2 flagging - an improved method for the collection of questing ticks. *Parasites & Vectors* vol. 5, n° 1, p. 125. [<https://doi.org/10.1186/1756-3305-5-125>]
- 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. *In International Symposium on the Analytic Hierarchy Process, Kuala Lumpur, 23-26 juin*. Singapour, Hansapoint, p 1-10. [<https://doi.org/10.13033/isahp.y2013.047>]

- GOVINDAN, K., JEPSEN, M.B. (2016) ELECTRE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research* vol. 250, n° 1, p. 1-29. [<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.07.019>]
- GOWRISHANKAR, RAVI LATHA, B., C, S., *et al.* (2021) Solar tick trap with a pheromone lure - A stand-in approach for off-host control of *Rhipicephalus sanguineus sensu lato* ticks. *Ticks and Tick-Borne Diseases* vol. 12, n° 3, p. 101656. [<https://doi.org/10.1016/j.ttbdis.2021.101656>]
- 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. *Rev. Med. Veterinary Entomol* vol. 79, p. 323-333.
- GRAY, J.S., DAUTEL, H., ESTRADA-PENÑA, 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>]
- GREENE, R., DEVILLERS, R., LUTHER, J., *et al.* (2011) GIS-Based Multiple-Criteria Decision Analysis. *Geography Compass* vol. 5, p. 412-432. [<https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2011.00431.x>]
- 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>]
- GRENACHER, S., KRÖBER, T., GUERIN, P.M., *et al.* (2001) Behavioural and chemoreceptor cell responses of the tick, *Ixodes ricinus*, to its own faeces and faecal constituents. *Experimental & Applied Acarology* vol. 25, n° 8, p. 641-660. [<https://doi.org/10.1023/a:1016145805759>]
- HOFMEESTER, T.R. (2016) 12. The role of host diversity in *Borrelia burgdorferi* s.l. dynamics. In Braks, M.A.H., Van Wieren, S.E., Takken, W., *et al.* (Éd.), *Ecology and prevention of Lyme borreliosis*. Brill | Wageningen Academic, p. 173-186. [[https://doi.org/10.3920/978-90-8686-838-4\\_12](https://doi.org/10.3920/978-90-8686-838-4_12)]
- HOFMEESTER, T.R., KRAWCZYK, A., VAN LEEUWEN, A.D., *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., WIJEREN, 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>]
- IJZERMAN, M., GROOTHUIS-OUDSHOORN, C., HUMMEL, M. (2011) Sensitivity analysis in multi-criteria decision (MCDA) models for benefit-risk assessment. *In ISPOR 14th Annual European Congress, Madrid, 5-8 novembre*. Enschede, University of Twente, p 1-1.

- JAENSON, T.G.T., 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]
- JOHNSON, A.L., JOHNSTONE, L.K., STEFANOVSKI, D. (2018) Cerebrospinal fluid Lyme multiplex assay results are not diagnostic in horses with neuroborreliosis. *Journal of Veterinary Internal Medicine* vol. 32, n° 2, p. 832-838. [https://doi.org/10.1111/jvim.15067]
- JOHNSTONE, L.K., ENIGLES, J.B., ACETO, H., *et al.* (2016) Retrospective Evaluation of Horses Diagnosed with Neuroborreliosis on Postmortem Examination: 16 Cases (2004–2015). *Journal of Veterinary Internal Medicine* vol. 30, n° 4, p. 1305-1312. [https://doi.org/10.1111/jvim.14369]
- 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]
- JORE, 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]

- KLAUS, C., HÖRÜGEL, U., HOFFMANN, B., *et al.* (2013) Tick-borne encephalitis virus (TBEV) infection in horses: Clinical and laboratory findings and epidemiological investigations. *Veterinary Microbiology* vol. 163, n° 3, p. 368-372. [<https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2012.12.041>]
- KLAUS, C., ZIEGLER, U., KALTHOFF, D., *et al.* (2014) Tick-borne encephalitis virus (TBEV) - findings on cross reactivity and longevity of TBEV antibodies in animal sera. *BMC veterinary research* vol. 10, p. 78. [<https://doi.org/10.1186/1746-6148-10-78>]
- KORDI, M. (2012) Effects of increasing fuzziness on analytic hierarchy process for spatial multicriteria decision analysis. *Computers, Environment and Urban Systems* vol. 36, n° 1, p. 43-53. [<https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2011.07.004>]
- KREJČÍ, J., STOKLASA, J. (2018) Aggregation in the analytic hierarchy process: Why weighted geometric mean should be used instead of weighted arithmetic mean. *Expert Systems with Applications* vol. 114, p. 97-106. [<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.06.060>]
- 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>]
- KUROKAWA, C., LYNN, G.E., PEDRA, J.H.F., *et al.* (2020) Interactions between *Borrelia burgdorferi* and ticks. *Nature Reviews. Microbiology* vol. 18, n° 10, p. 587-600. [<https://doi.org/10.1038/s41579-020-0400-5>]
- KWASNIK, M., ROLA, J., ROZEK, W. (2023) Tick-Borne Encephalitis—Review of the Current Status. *Journal of Clinical Medicine* vol. 12, n° 20, p. 6603. [<https://doi.org/10.3390/jcm12206603>]
- 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. Mémoire d'épidémiologie, 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>]
- LOGAN, J.J., KNUDBY, A., LEIGHTON, P.A., *et al.* (2024) Ixodes scapularis density and Borrelia burgdorferi prevalence along a residential-woodland gradient in a region of emerging Lyme disease risk. *Scientific Reports* vol. 14, n° 1, p. 13107. [<https://doi.org/10.1038/s41598-024-64085-6>]
- LOU, Y., WU, J. (2017) Modeling Lyme disease transmission. *Infectious Disease Modelling* vol. 2, n° 2, p. 229-243. [<https://doi.org/10.1016/j.idm.2017.05.002>]
- 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>]
- MADISON-ANTENUCCI, S., KRAMER, L.D., GEBHARDT, L.L., *et al.* (2020) Emerging Tick-Borne Diseases. *Clinical Microbiology Reviews* vol. 33, n° 2, p. 10.1128/cmr.00083-18. [<https://doi.org/10.1128/cmr.00083-18>]
- MARSH, K., GOETGHEBEUR, M., THOKALA, P., *et al.* (Éd.) (2017) Multi-Criteria Decision Analysis to Support Healthcare Decisions. Cham, Springer International Publishing. [<https://doi.org/10.1007/978-3-319-47540-0>]
- MARSOT, M., HENRY, P.-Y., VOURECH, 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 d'épidémiologie, Paris 12
- NADAL, C., BONNET, S.I., MARSOT, M. (2022) Eco-epidemiology of equine piroplasmosis and its associated tick vectors in Europe: A systematic literature review and a meta-analysis of prevalence. *Transboundary and Emerging Diseases* vol. 69, n° 5, p. 2474-2498. [<https://doi.org/10.1111/tbed.14261>]

- NEELY, M., ARROYO, L., JARDINE, C., *et al.* (2021) Evaluation of 2 ELISAs to determine *Borrelia burgdorferi* seropositivity in horses over a 12-month period. *Journal of Veterinary Diagnostic Investigation: Official Publication of the American Association of Veterinary Laboratory Diagnosticians, Inc* vol. 33, n° 4, p. 736-739. [<https://doi.org/10.1177/10406387211016103>]
- 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>]
- NUTT, D.J., KING, L.A., PHILLIPS, L.D., *et al.* (2010) Drug harms in the UK: a multicriteria decision analysis. *Lancet (London, England)* vol. 376, n° 9752, p. 1558-1565. [[https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(10\)61462-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(10)61462-6)]
- PATEL, M., BHATT, B., VASHI, M. (2017) SMART-Multi-criteria decision-making technique for use in planning activities. In *New Horizons in Civil Engineering, Surat, mars*. Surat, Sarvajanik College of Engineering and Technology, p. 1-6.
- PAUTIENIUS, A., ARMONAITE, A., SIMKUTE, E., *et al.* (2021) Cross-Sectional Study on the Prevalence and Factors Influencing Occurrence of Tick-Borne Encephalitis in Horses in Lithuania. *Pathogens* vol. 10, n° 2, p. 140. [<https://doi.org/10.3390/pathogens10020140>]
- PEBESMA, E. (2018) Simple Features for R: Standardized Support for Spatial Vector Data. *The R Journal* vol. 10, n° 1, p. 439-446.
- 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>]
- RAMSAY, J.D., UETI, M.W., JOHNSON, W.C., *et al.* (2013) Lymphocytes and macrophages are infected by *Theileria equi*, but T cells and B cells are not required to establish infection in vivo. *PloS One* vol. 8, n° 10, p. e76996. [<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0076996>]
- 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>]
- RICHTER, D., MATUSCHKA, F.-R., SPIELMAN, A., *et al.* (2013) How ticks get under your skin: insertion mechanics of the feeding apparatus of *Ixodes ricinus* ticks.

- Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*.  
[<https://doi.org/10.1098/rspb.2013.1758>]
- 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>]
- RUSHTON, J.O., LECOLLINET, S., HUBÁLEK, Z., *et al.* (2013) Tick-borne encephalitis virus in horses, Austria, 2011. *Emerging Infectious Diseases* vol. 19, n° 4, p. 635-637. [<https://doi.org/10.3201/eid1904.121450>]
- RUSSELL, A., SHOST, N., BURCH, M., *et al.* (2021) Serological and Molecular Detection of Anaplasma spp. in Blood From Healthy Horses: A Preliminary Study of Horses in East Texas. *Journal of Equine Veterinary Science* vol. 106, p. 103757. [<https://doi.org/10.1016/j.jevs.2021.103757>]
- 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, T.L. (1994) How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process. *Aestimum* vol. 24. [<https://doi.org/10.13128/Aestimum-7138>]
- SAATY TL (1980) Saaty Multicriteria Decision Making: The Analytic Hierarchy Process, McGraw-Hill. New York.
- SALAT, J., RUZEK, D. (2020) Tick-borne encephalitis in domestic animals. *Acta Virologica* vol. 64, n° 2, p. 226-232. [[https://doi.org/10.4149/av\\_2020\\_212](https://doi.org/10.4149/av_2020_212)]
- SALEEM, S., IJAZ, M., FAROOQI, S.H., *et al.* (2018a) Equine Granulocytic Anaplasmosis 28 years later. *Microbial Pathogenesis* vol. 119, p. 1-8. [<https://doi.org/10.1016/j.micpath.2018.04.001>]
- SALEEM, S., IJAZ, M., FAROOQI, S.H., *et al.* (2018b) Equine Granulocytic Anaplasmosis 28 years later. *Microbial Pathogenesis* vol. 119, p. 1-8. [<https://doi.org/10.1016/j.micpath.2018.04.001>]
- SANCHEZ, E., VANNIER, E., WORMSER, G.P., *et al.* (2016) Diagnosis, Treatment, and Prevention of Lyme Disease, Human Granulocytic Anaplasmosis, and Babesiosis: A Review. *JAMA* vol. 315, n° 16, p. 1767-1777. [<https://doi.org/10.1001/jama.2016.2884>]
- SANDERSEN C., PITEL P.H., AMORY H (2007) Diagnostic différentiel du syndrome "Piro-Like" chez les équidés. *In Proceedings of the Annual Meeting of the Belgian Equine Practitioners Society, Leuven, 10 novembre*. Liège, Université de Liège.
- SANOGO, I.N., FUSADE-BOYER, M., MOLIA, S., *et al.* (2024) Identification of risk areas for avian influenza outbreaks in domestic poultry in Mali using the GIS-MCDA approach. *Epidemiology and Infection* vol. 152, p. e152. [<https://doi.org/10.1017/S0950268824001390>]
- 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>]
- SOCOLOVSCHI, C., REYNAUD, P., KERNIF, T., *et al.* (2012) Rickettsiae of spotted fever group, Borrelia valaisiana, and Coxiella burnetii in ticks on passerine birds

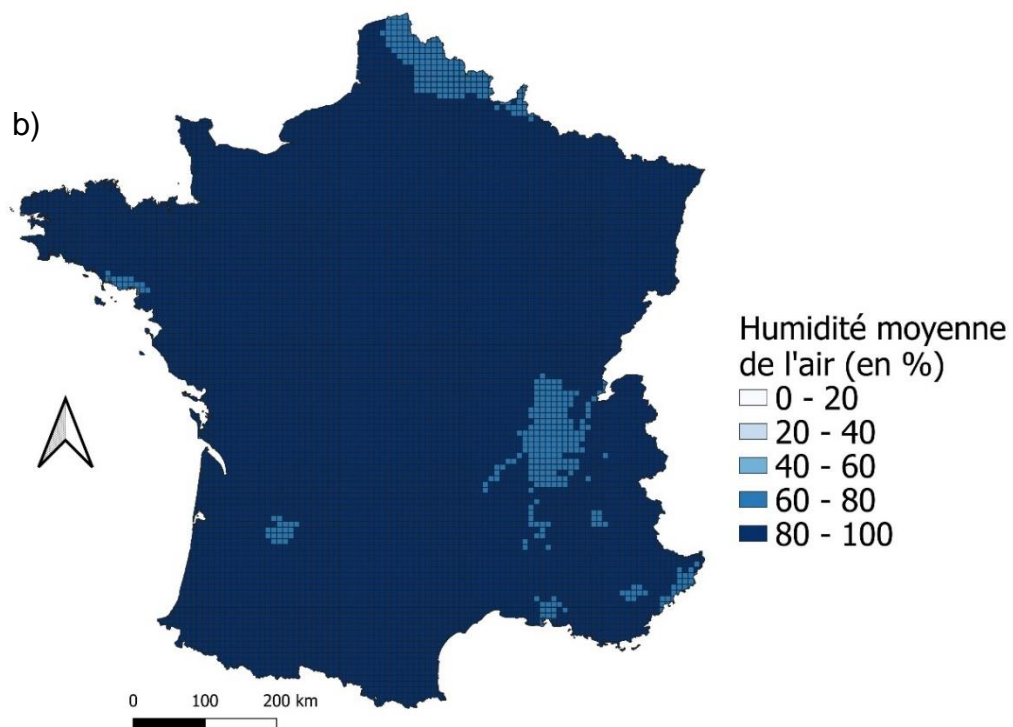
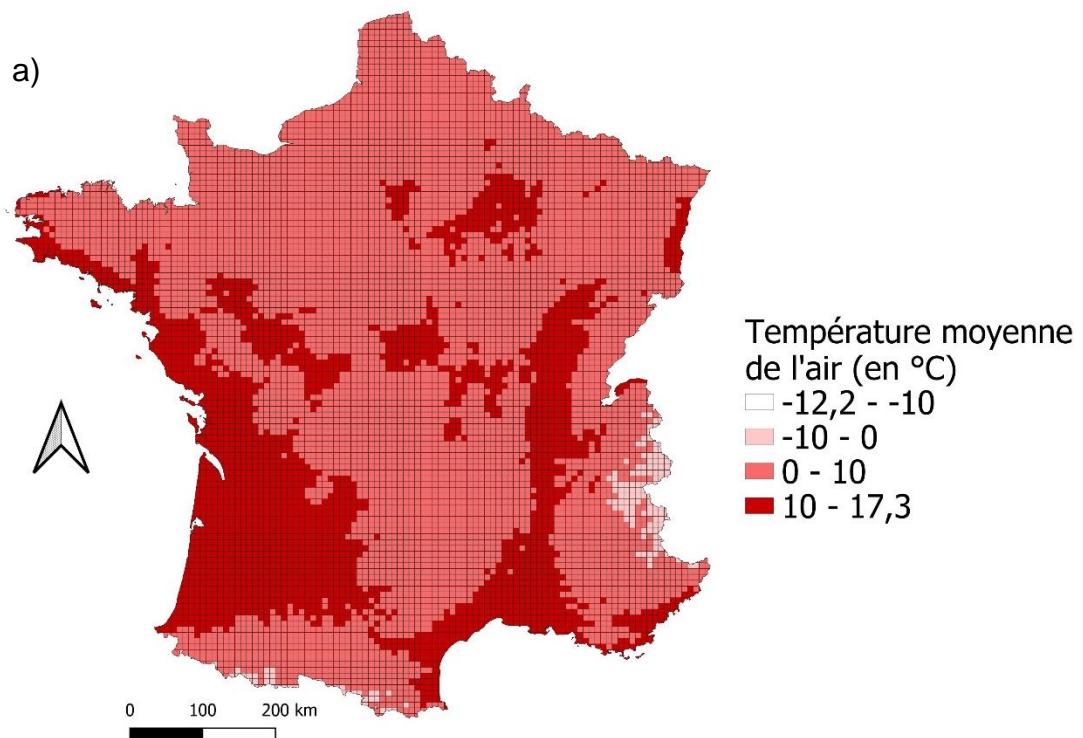
- and mammals from the Camargue in the south of France. *Ticks and Tick-borne Diseases* vol. 3, n° 5, p. 355-360. [<https://doi.org/10.1016/j.ttbdis.2012.10.019>]
- SONENSHINE, D.E. (2004) Pheromones and other semiochemicals of ticks and their use in tick control. *Parasitology* vol. 129, n° S1, p. S405-S425. [<https://doi.org/10.1017/S003118200400486X>]
- 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>]
- SPRONG, H., MOONEN, S., VAN WIJEREN, S.E., *et al.* (2020) Effects of cattle grazing on Ixodes ricinus-borne disease risk in forest areas of the Netherlands. *Ticks and Tick-borne Diseases* vol. 11, n° 2, p. 101355. [<https://doi.org/10.1016/j.ttbdis.2019.101355>]
- STÄDELE, C. (2024) The black-legged tick Ixodes scapularis detects CO<sub>2</sub> without the Haller's organ. *Journal of Experimental Biology* vol. 227, n° 6, p. jeb246874. [<https://doi.org/10.1242/jeb.246874>]
- STRLE, F., WORMSER, G.P. (2022) Early Lyme Disease (Erythema Migrans) and Its Mimics (Southern Tick-Associated Rash Illness and Tick-Associated Rash Illness). *Infectious Disease Clinics of North America* vol. 36, n° 3, p. 523-539. [<https://doi.org/10.1016/j.idc.2022.03.005>]
- SWINEBROAD, E.L. (2018a) 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>]
- SWINEBROAD, E.L. (2018b) Borreliosis in Sport Horse Practice. *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice, Equine Sports Medicine* 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>]
- TILLIETTE B. (2008) Anaplasmosse granulocytaire équine: enquête séro-épidémiologique dans le sud-est de la France en 2007. Thèse de médecine vétérinaire, École nationale vétérinaire d'Alfort
- 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>]
- WISE, L.N., KAPPMAYER, L.S., MEALEY, R.H., *et al.* (2013) Review of equine piroplasmiasis. *Journal of Veterinary Internal Medicine* vol. 27, n° 6, p. 1334-1346. [<https://doi.org/10.1111/jvim.12168>]
- WISE, L.N., PELZEL-MCCLUSKEY, A.M., MEALEY, R.H., *et al.* (2014) Equine piroplasmiasis. *The Veterinary Clinics of North America. Equine Practice* vol. 30, n° 3, p. 677-693. [<https://doi.org/10.1016/j.cveq.2014.08.008>]
- 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>]

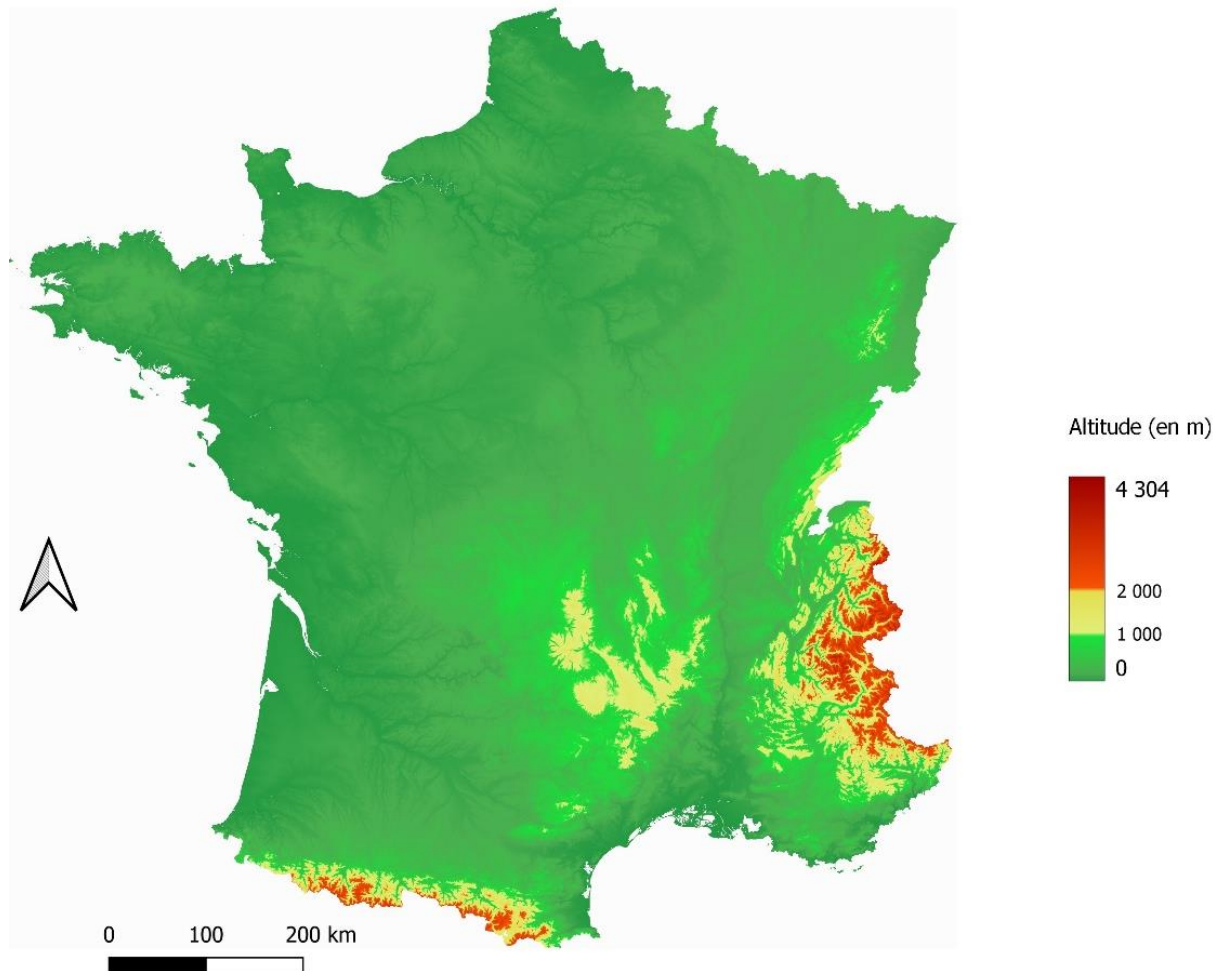


# Annexes

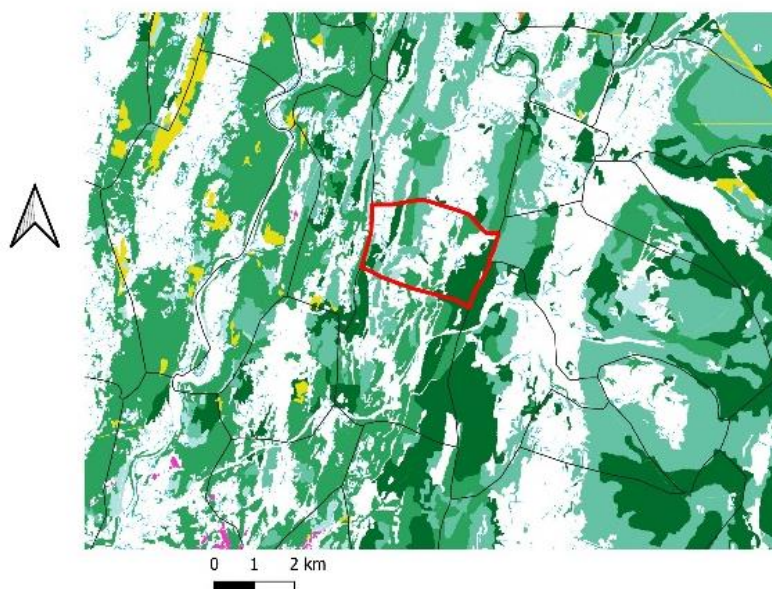
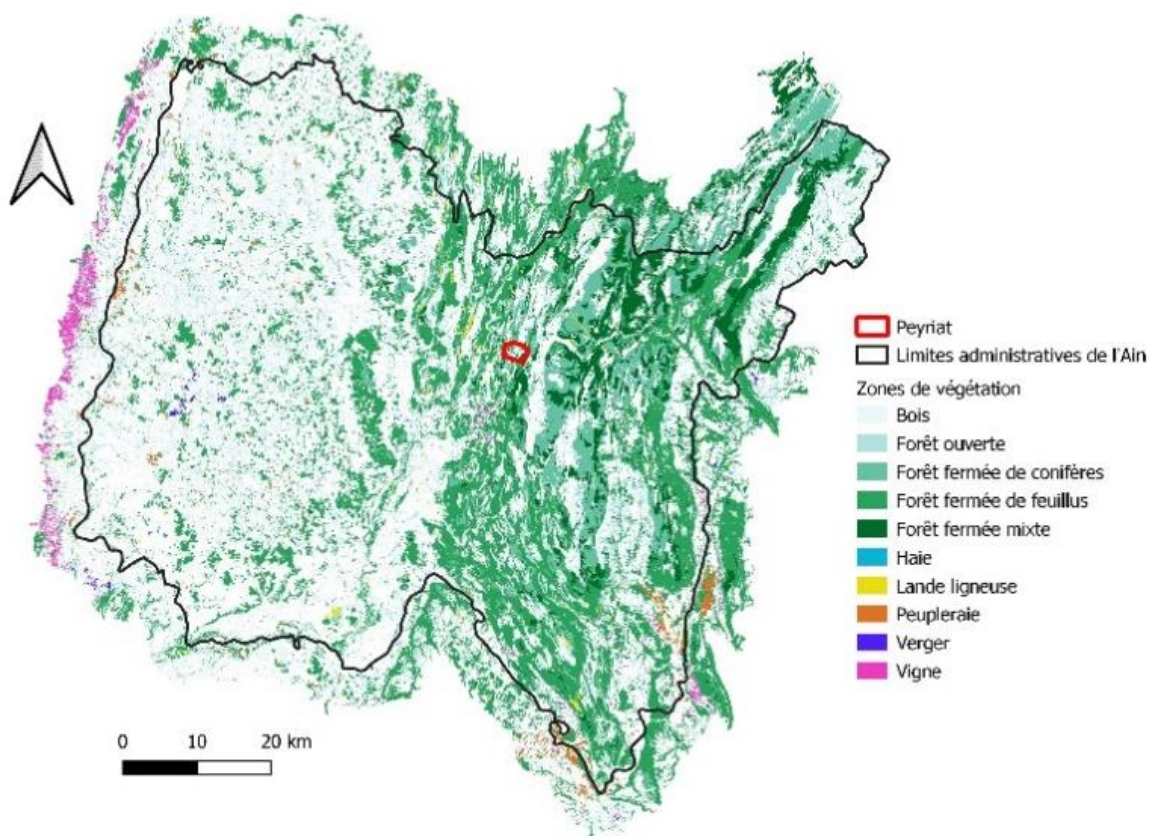
Annexe n°1 : Carte des températures (a) et d'humidité relative (b) moyennes de l'air en France sur la journée du 1<sup>er</sup> avril 2022 d'après les données SIM de météo-France.



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) en haut et sur la commune de Peyriat (01430) en bas



Annexe n°4 : Types de végétation de la catégorie « Zone de végétation » de la base de données BD TOPO de l'IGN ainsi que leurs définitions

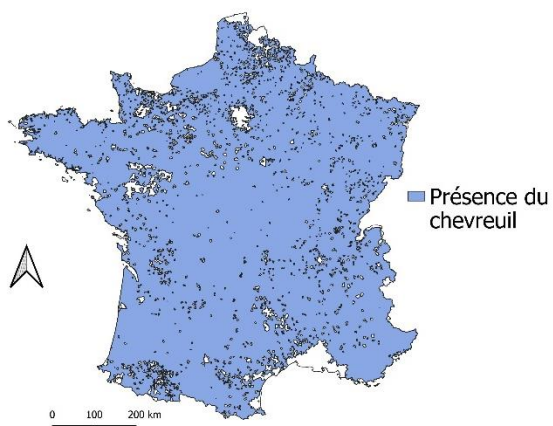
Les types de végétation utilisés sont en vert et ceux non utilisés en rouge.

Type de végétation	Définition	Superficie
Forêt ouverte	Arbres forestiers dont le couvert absolu est compris entre 10 % et 40 %.	>5 000m <sup>2</sup>
Forêt fermée de feuillus	Arbres forestiers couvrant au moins 40 % du sol, et composée de plus de 75 % de feuillus.	>5 000m <sup>2</sup>
Forêt fermée de conifères	Arbres forestiers couvrant au moins 40 % du sol et composée de plus de 75 % de conifères.	>5 000m <sup>2</sup>
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 <sup>2</sup> et <5 000m <sup>2</sup>
Forêt fermée mixte	Arbres forestiers couvrant au moins 40 % du sol, et composée entre 25% et 75 % de feuillus.	>5 000m <sup>2</sup>
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 %.	>5 000m <sup>2</sup>
Peupleraie	Zone de culture de peuplier avec un couvert supérieur à 10 %.	>5 000m <sup>2</sup>
Verger	Zone de plantation d'arbres hors peuplement forestier.	>5 000m <sup>2</sup>
Vigne	Zone de vigne.	>2 000m <sup>2</sup>
Bananeraie	Plantation de bananiers dans les Collectivités et Départements d'Outre-Mer.	>30 000m <sup>2</sup>
Canne à sucre	Plantation de canne à sucre d'une superficie supérieure à 30 000m <sup>2</sup> dans les Collectivités et Départements d'Outre-Mer.	>30 000m <sup>2</sup>
Houblonnière	Champ planté de houblon.	>5 000m <sup>2</sup>
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 <sup>2</sup>
Zone arborée	Terme utilisé pour identifier différents types de végétation dans les Collectivités et Départements d'Outre-Mer.	>500m <sup>2</sup>

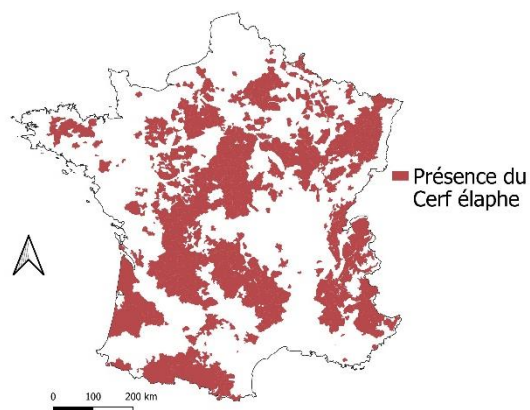
Annexe n°5 : Carte de présence/absence et de classe d'abondance des hôtes sauvages les plus important vis-à-vis d'Ixodes ricinus, à partir des données CARMEN et issues de Lumbierres et al. (2022)

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)

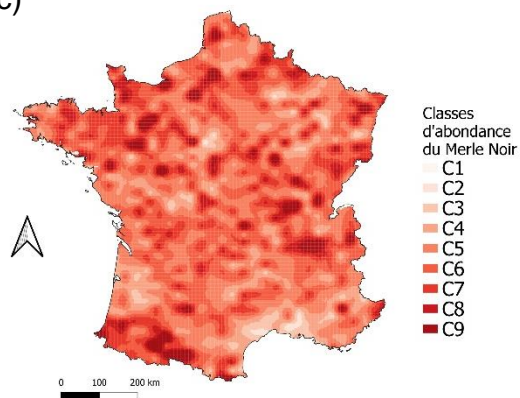
a)



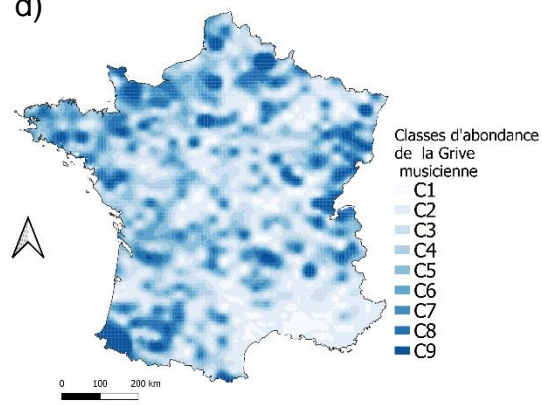
b)



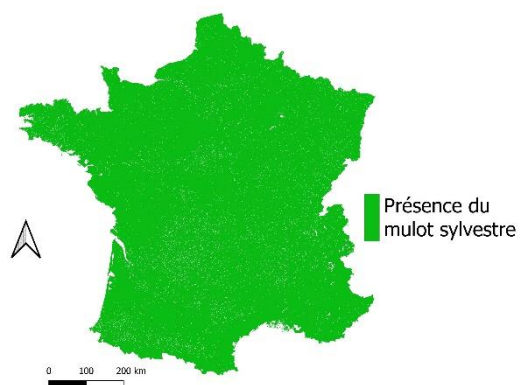
c)



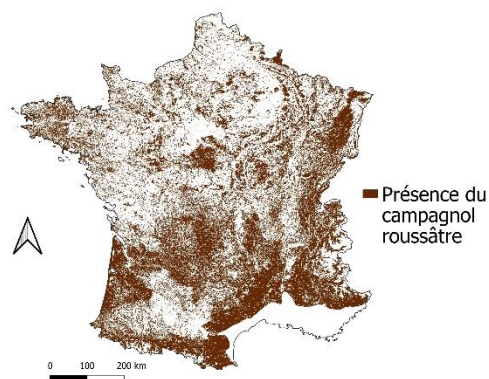
d)



e)

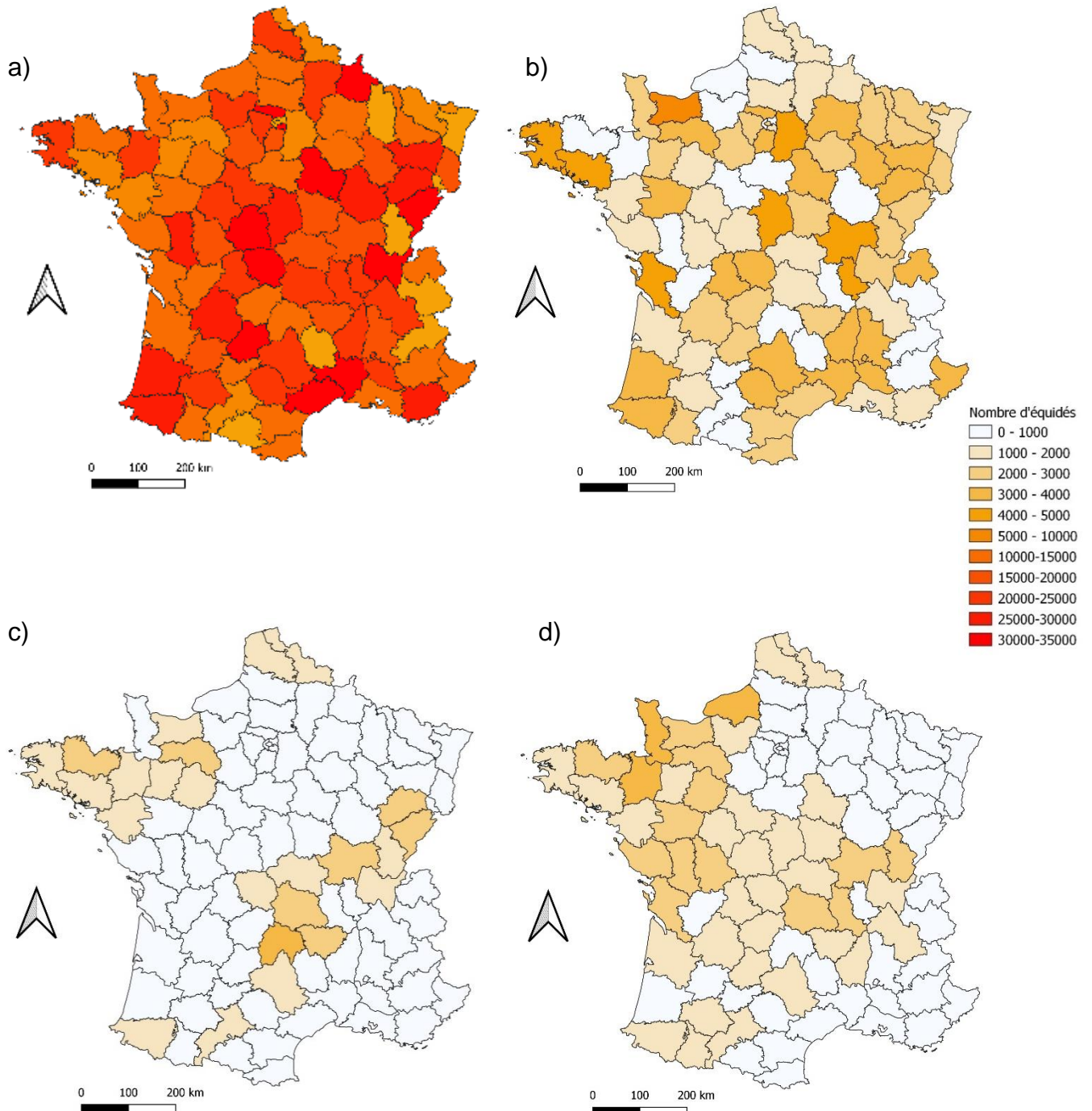


f)

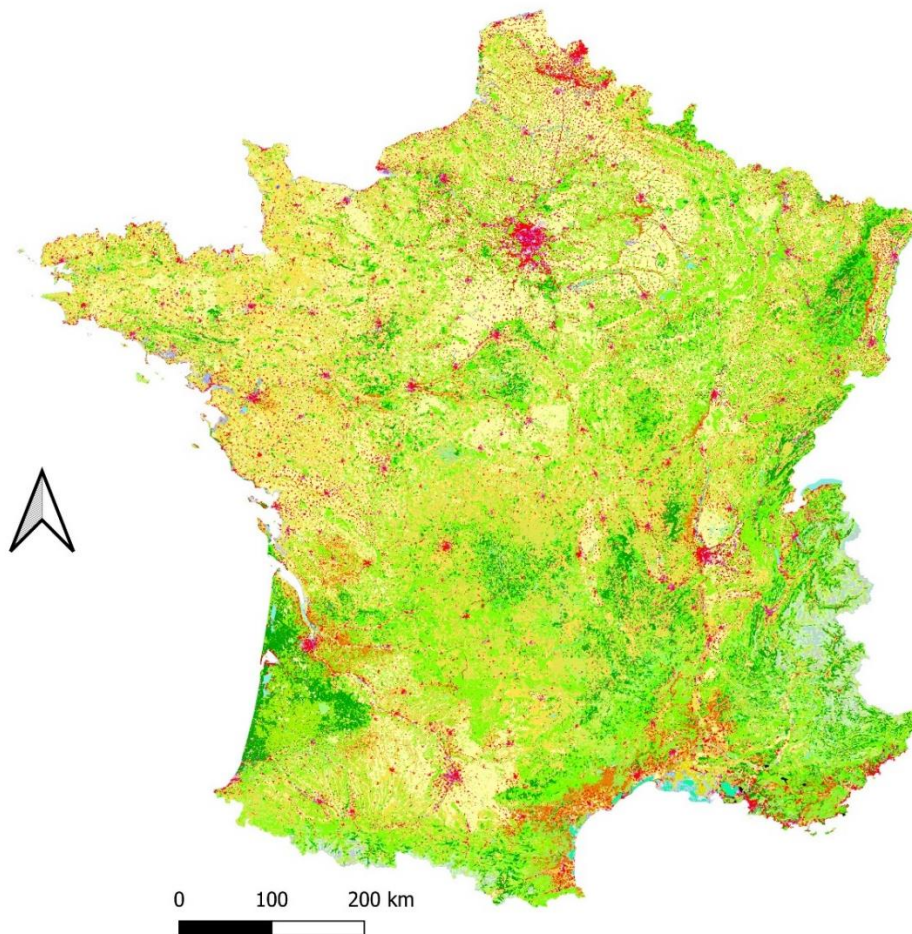


Annexe n°6 : Carte des effectifs d'équidés en France par département et selon le groupe de race

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

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

Annexe n°8 : Questionnaire administré aux 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 <b>légèrement</b> un facteur par rapport à un autre
...fortement...	l'expérience et le jugement favorisent <b>fortement</b> un facteur par rapport à un autre
...considérablement...	un facteur est fortement favorisé et sa prédominance est <b>démontrée dans la pratique</b>
...extrêmement...	les éléments de preuve favorisant un facteur par rapport à un autre sont du <b>plus haut niveau de preuve possible</b>

8.2 : Noms des feuilles Excel (en italique) avec chaque facteur de présence et d'activité 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

*Equidés 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 : Détail du calcul de la méthode AHP (utilisé dans le tableur d'aide au calcul de la méthode AHP développé par Goepel (2013))

Les comparaisons de paires de critères sont d'abord classées de un à neuf dans une grille de comparaisons selon leur intensité (pour la description des intensités, voir l'annexe 8.1) :

9.1 : Exemple d'une grille de comparaisons

		Criteria		more important ?	Scale
i	j	A	B	A or B	(1-9)
1	2	Criterion 1	Criterion 2	A	5
1	3		Criterion 3	B	3
1	4				
1	5				
1	6				
1	7				
1	8				
2	3		Criterion 2	Criterion 3	B
2	4				

Une grille de comparaisons est complétée par chaque expert ayant répondu au questionnaire.

Une fois les grilles de comparaisons remplies, une matrice de comparaison est calculée par expert. Dans cet exemple, nous obtiendrions la matrice visible au 9.2.

La matrice de comparaison individuelle est appelée la matrice  $A_k$ , ses coefficients  $a_{ij}$ , et sa taille  $N$ ,  $k$  correspondant au numéro de l'expert,  $i$  correspondant à la ligne et  $j$  à la colonne du coefficient de la matrice.

9.2 : Exemple de matrice de comparaison individuelle  $A_k$

Matrix	Criteria		
	Criterion 1	Criterion 2	Criterion 3
Criterion 1	1	5	1/3
Criterion 2	1/5	1	1/7
Criterion 3	3	7	1

Ensuite, une matrice de comparaison consolidée C en prenant en compte les avis de tous les experts est calculée à partir de toutes les matrices  $A_k$  grâce à une moyenne géométrique :

$$c_{ij} = \left( \prod_{k=1}^N a_{ij}^{(k)} \right)^{1/N}$$

Avec  $c_{ij}$  le coefficient de la matrice C et  $a_{ij}^{(k)}$ , le coefficient  $a_{ij}$  de la matrice de comparaison  $A_k$ .

Une fois la matrice de comparaison consolidée créée, les moyennes géométriques des lignes ( $r_i$ ) sont calculées pour chaque ligne de la matrice C grâce à la formule :

$$r_i = \left( \prod_{j=1}^N c_{ij} \right)^{1/N}$$

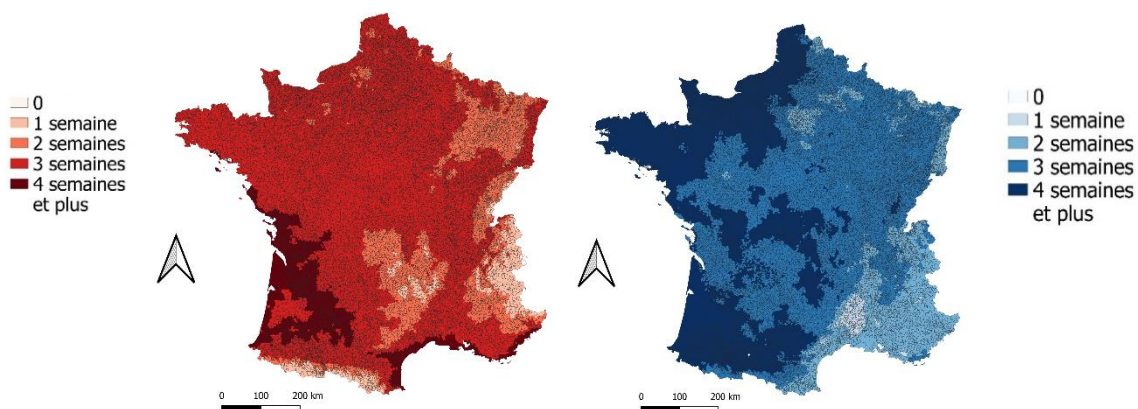
Une fois les  $r_i$  calculés pour chaque ligne, on calcule les priorités  $p_i$  qui sont les coefficients attribués à chaque variable de facteur et qui sont utilisés pour le calcul du risque recherché. Les priorités correspondent à la normalisation des moyennes géométriques, on a donc :

$$p_i = r_i / \sum_{i=1}^N r_i$$

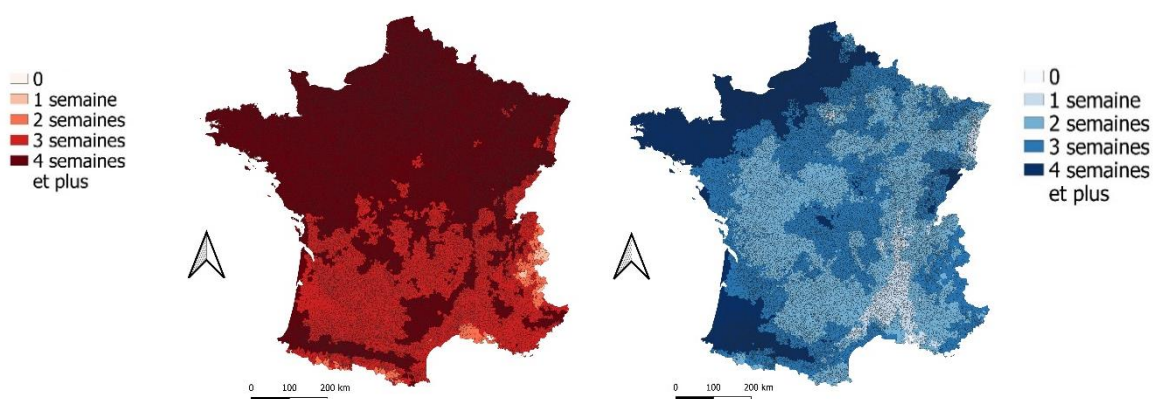
## Annexe n°10 : Carte des variables par communes

10.1 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 %.

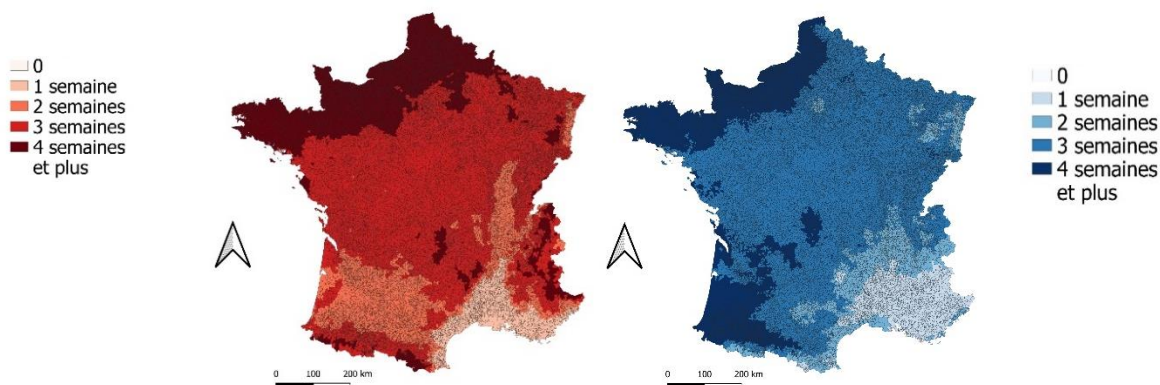
Avril 2022 :



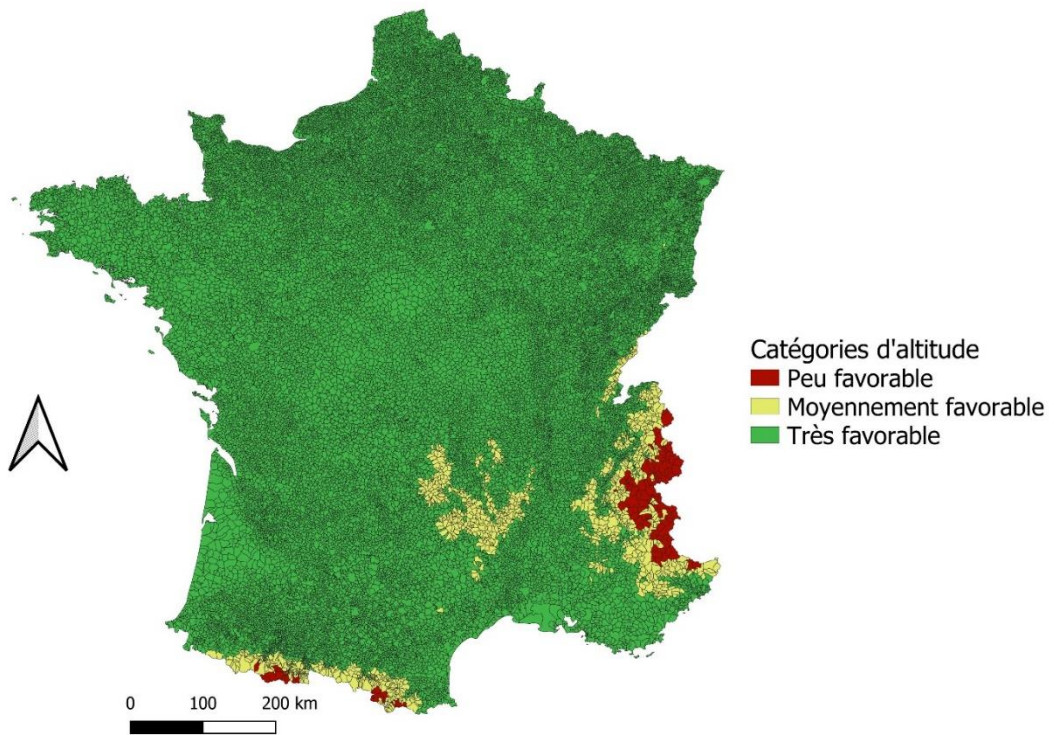
Mai 2022 :



Juin 2022 :

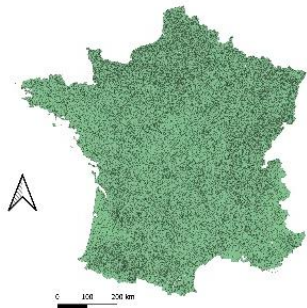


10.2 Altitude : Catégories d'altitude favorables à la présence et à l'activité de Ixodes ricinus

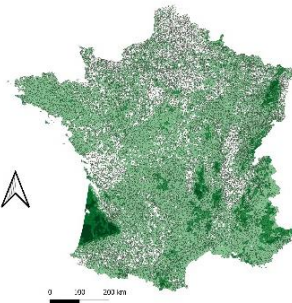


10.3 Végétation : Proportion de surface occupée par les différents types de végétation favorables choisies par commune

a) Bois



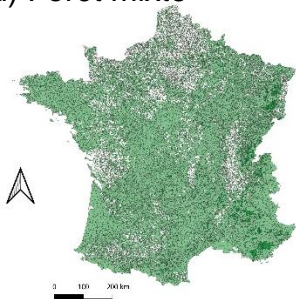
b) Forêt de conifères



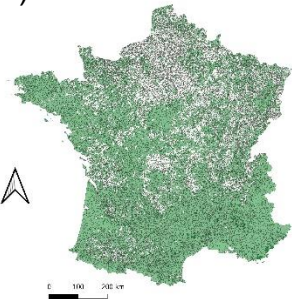
c) Forêt de feuillus



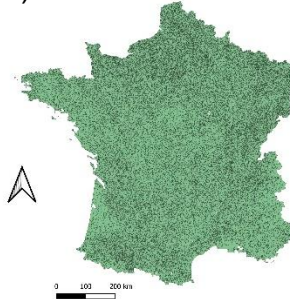
d) Forêt mixte



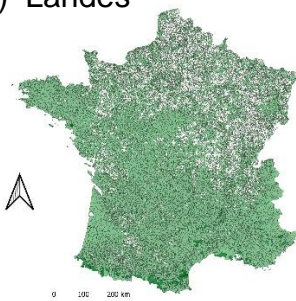
e) Forêt ouverte



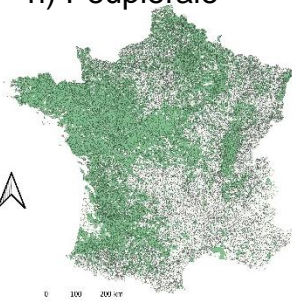
f) Haie



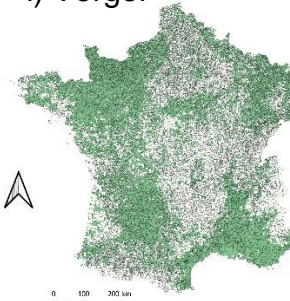
g) Landes



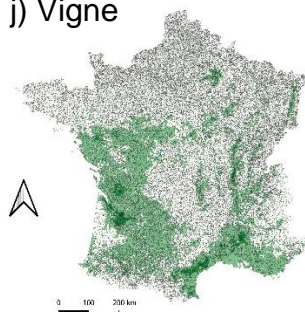
h) Peupleraie



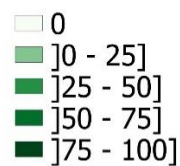
i) Verger



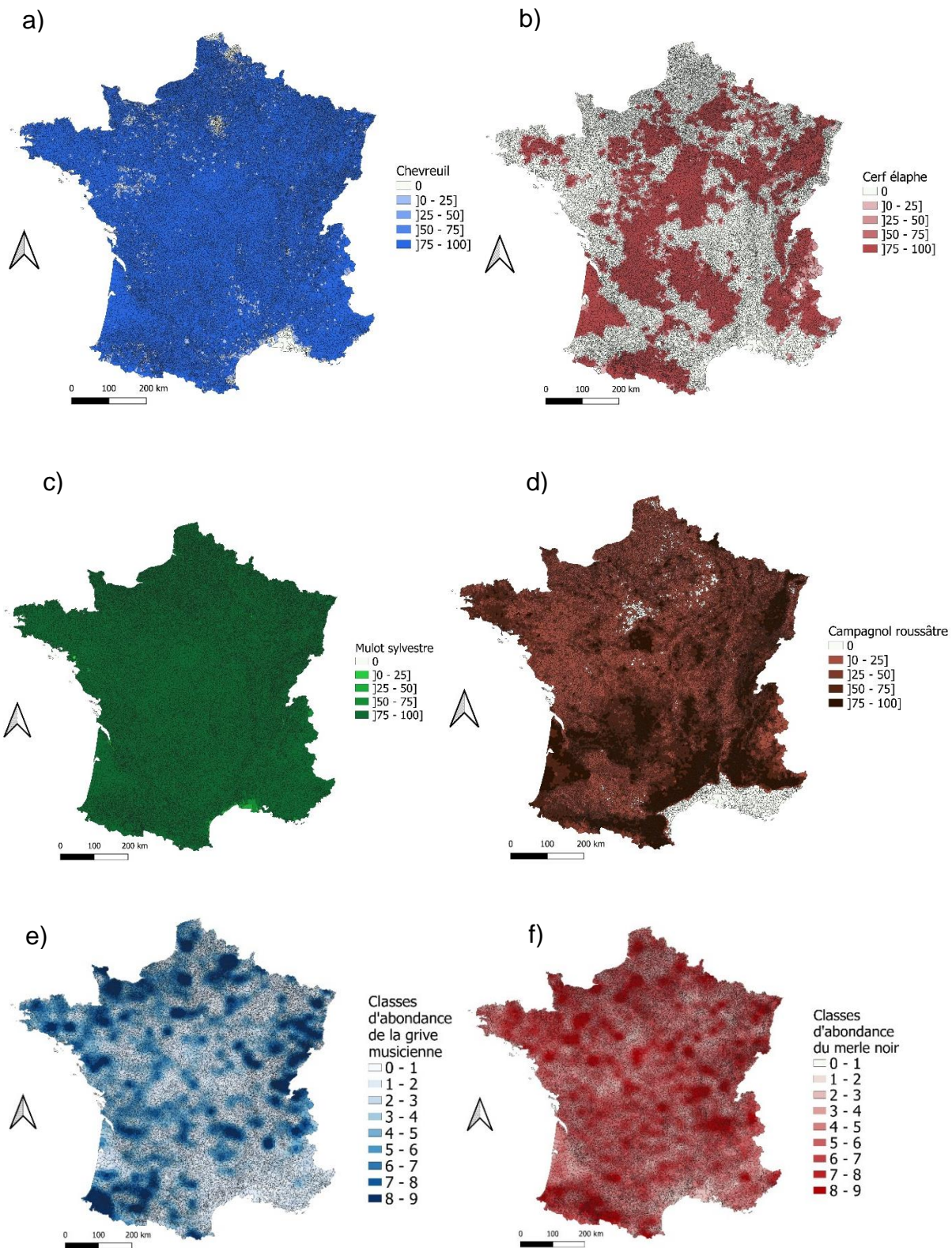
j) Vigne



Proportion des surfaces de végétation par commune (en %)



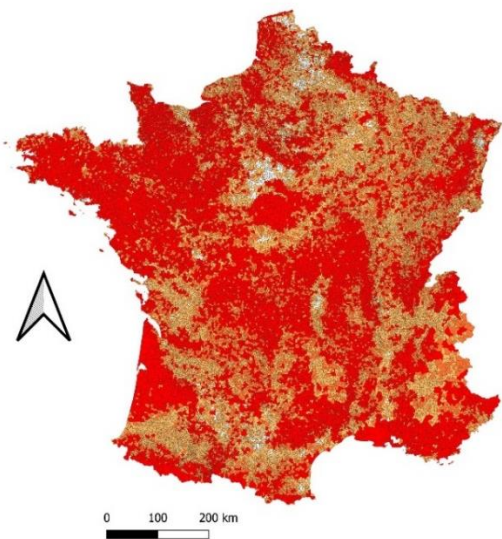
**10.4 Hôtes :** Proportion de présence pour les cervidés (a et b) et pour les rongeurs (c et d), et classes d'abondance pour les oiseaux (e et f) par commune



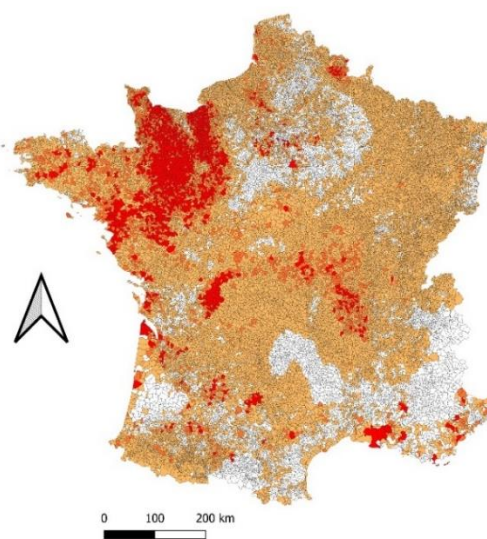
10.5 Equidés : Effectifs d'équidés par surface favorable, par commune et par groupe d'équidés

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

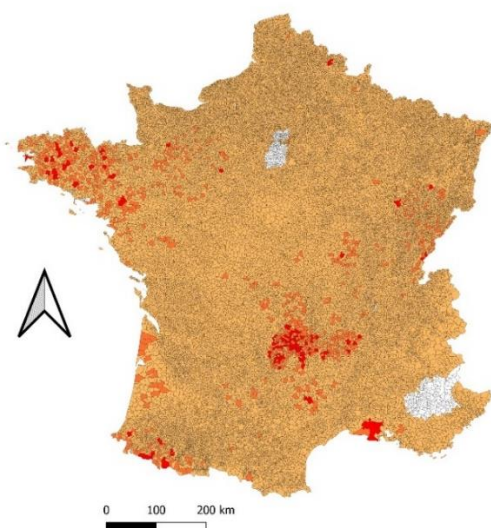
a)



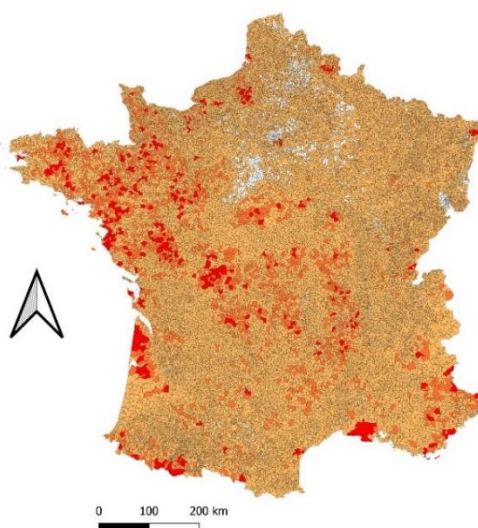
b)



c)



d)





# 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 sensu lato*, responsable de la maladie de Lyme pouvant engendrer des signes cliniques sévères et des conséquences importantes dans les filières équines sportives. Dans ce contexte, l'objectif de cette étude était d'évaluer et de cartographier l'exposition des équidés en France métropolitaine à l'infestation par les tiques *I. ricinus*.

Pour représenter l'exposition, nous avons choisi de la quantifier grâce à un score calculé à partir de la méthode d'analyse multicritères associée à des systèmes d'information géographique (MCDA-SIG). Cette méthode est fondée sur la sélection de variables appartenant à quatre catégories de facteurs de présence et d'activité associés aux tiques (météorologique, altitude, végétation et hôtes), déterminées d'après une revue bibliographique. Nous avons ensuite assemblé les variables associées à chaque catégorie de facteur de présence et d'activité entre elles. En associant cette variable ainsi construite une variable représentant la présence d'équidés sur les milieux favorables aux tiques, des cartes de score d'exposition des équidés à l'infestation par les tiques en France métropolitaine durant la période d'activité maximale de la tique, soit le printemps 2022, à l'échelle communale ont été obtenues.

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

## **MOTS CLÉS :**

Tiques ; *Ixodes ricinus* ; Equidés ; France ; Analyse Multicritères

## **JURY :**

Président : Pr Radu BLAGA

Directeur de thèse : Dr Guillaume CROZET

Examinatrice : Dr Estelle MANGUIN

Invitée : Dr Maud MARSOT

Invitée : Dr Coralie LUPO

# Geographical exposure of the French equine population to the *Ixodes ricinus* tick

---

**AUTHOR:** Antoine RIGAL

## **SUMMARY:**

*Ixodes ricinus* ticks represent a major health risk in France. Equidae are susceptible to numerous pathogens carried by these ticks, such as *Borrelia burgdorferi sensu lato*, responsible for Lyme disease, which can lead to severe clinical signs and significant consequences in the equine sports industry. Against this backdrop, the aim of this study was to assess and map the probability of exposure of Equidae in mainland France to infestation by *I. ricinus* ticks.

We have chosen to quantify this exposition using a score calculated based on the multicriteria analysis method associated with geographic information systems (MCDA-GIS). This method relied on the selection of variables from four categories of tick-related presence and activity factors (meteorological, altitude, vegetation and hosts), determined from a literature review. We then assembled the variables associated with each category of presence and activity factors together. By associating this variable with a variable representing the presence of equidae in environments favourable to ticks, we obtained exposure score maps of equine exposure to tick infestation for metropolitan France during the period of maximum tick activity, spring 2022, on a communal scale.

The results show a relatively low exposure score across the whole of France (with an estimated maximum of 5.4%), and a heterogeneous distribution of values, with areas having a higher score in north-western and central France. It seems that the spatial distribution of the score is very similar to that of the distribution of the equine presence score, and more particularly to the distribution of saddle horse numbers. One step in the MCDA-GIS method that could have been carried out in addition was a sensitivity analysis. In particular, this would have enabled us to assess the impact of the number of saddle horses on the results. Another step that could have been carried out was the validation of the results using field observations based on tick load measurements taken from Equidae.

## **KEYWORDS:**

Ticks; *Ixodes ricinus*; Equids; France; Multicriteria analysis

## **JURY :**

Chairperson: Pr Radu BLAGA

Thesis Director: Dr Guillaume CROZET

Reviewer: Dr Estelle MANGUIN

Guest: Dr Maud MARSOT

Guest: Dr Coralie LUPO