

Bulletin épidémiologique Santé animale - alimentation

Décembre 2018 / numéro 86

SOMMAIRE/CONTENTS

Article 1

Les outils connectés en apiculture : évaluation de leurs applications auprès des apiculteurs français

Article 2

Impact de la température sur la mortalité bovine : brève revue

Paper 1

Connected tools in precision beekeeping: a survey and preliminary assessment of usage by beekeepers in France

Paper 2

Effect of temperature on bovine mortality – short review



Le *Bulletin épidémiologique* est une publication conjointe de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail et de la direction générale de l'Alimentation du ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation.

Bulletin épidémiologique Santé animale - alimentation

Décembre 2018

Les outils connectés en apiculture : évaluation de leurs applications auprès des apiculteurs français

Mélodie Lettmann⁽¹⁾, Marie-Pierre Chauzat^(1,2)

Auteur correspondant : marie-pierre.chauzat@anses.fr

(1) Anses, Direction de la Stratégie et de la Programmation, Maisons-Alfort, France

(2) Anses, Unité de Pathologie de l'Abeille, Sophia-Antipolis, France

Résumé

L'effondrement des colonies d'abeilles et plus généralement des populations de pollinisateurs dans le monde, est un phénomène observé depuis de nombreuses années. De nos jours les causes de ce déclin sont connues, mais il est difficile de comprendre leurs dynamiques et par conséquent de prédire leurs impacts. Les apiculteurs et les chercheurs peinent à mettre en place des techniques préventives efficaces pour protéger les colonies et limiter les pertes hivernales. Les nouveaux outils technologiques apicoles pourraient être une aide précieuse pour permettre une surveillance continue et précise des colonies, et ainsi appréhender au mieux leurs besoins. Une meilleure gestion des ruchers grâce à ces nouvelles technologies serait une solution pertinente pour prévenir les mortalités et améliorer le rendement des ruchers. Ces outils semblent également faciliter la détection et prévenir l'apparition des parasites et maladies. Afin de démontrer leur intérêt sur le terrain nous avons interrogé les apiculteurs français qui nous ont transmis leurs expériences et avis sur les balances connectées, les capteurs de température et d'hygrométrie et les systèmes antivols, entre autres.

Mots-clés:

Apiculture, nouvelles technologies, abeille, questionnaire, ruche connectée

Abstract

Connected tools in precision beekeeping : a survey and preliminary assessment of usage by beekeepers in France

Since the end of the 20th century, bee colonies and wild pollinator populations have been collapsing. The reasons for this collapse are now known, but it is difficult to understand how the factors interact and to predict their impact. Researchers and beekeepers are facing a major challenge to reduce colony losses. In this situation, it appears crucial to accurately monitor bee colonies in order to prevent disease and limit the consequences of the various risks. In this regard, new technological tools for beekeeping could enhance colony monitoring and be an effective solution for estimating colony requirements, avoiding mortality, and improving apiary yields. They may also prove to be effective devices to prevent the occurrence of disease and parasites. To study the relevance of these tools, we carried out a survey among beekeepers in France using a questionnaire. Topics of interest included connected scales, temperature and hygrometry sensors, and anti-theft systems.

Keywords:

Beekeeping, new technologies, bee, survey, smart hive

Introduction

En 2012, Zacepins *et al.*, décrivent pour la première fois le terme d'apiculture de précision (Zacepins, Stalidzans, and Meitalovs 2012). C'est une stratégie de management des ruchers basée sur la surveillance individuelle et continue des colonies grâce aux outils technologiques. Son but premier est de minimiser la consommation des ressources afin de maximiser la productivité des abeilles, cela passe donc par une meilleure appréhension au quotidien des besoins des colonies. De la même façon que l'agriculture de précision, l'apiculture de précision repose sur un schéma décisionnel simple en trois phases: collecte des données, interprétation des données et intervention sur le rucher au besoin. Les nouveaux outils connectés apicoles sont des outils d'aide à la décision pour les apiculteurs. Ils se présentent sous la forme de capteurs thermiques, d'humidité, de poids, d'enregistreurs sonores ou de vibrations, mais aussi de compteurs d'abeilles, de systèmes de vidéo-surveillance (Decourtye *et al.* 2018). Leurs applications sont donc variées, et la transmission des informations peut maintenant se faire sans fil, permettant ainsi d'informer l'apiculteur en temps réel. Ces données serviront de support à l'apiculteur pour déterminer la force de ses colonies et les faiblesses à combler. Les différents capteurs à distance permettent par conséquent une surveillance active et non intrusive des colonies (Marković *et al.* 2016). Le traitement et l'interprétation des données représentent un enjeu majeur qui permettra à l'apiculteur de réagir de façon adéquate et rapide aux différentes situations. La pertinence de cette surveillance est fortement accrue en hiver où l'ouverture des ruches, représente un stress pour la colonie (Edwards-Murphy *et al.* 2016). Il est également important de remarquer que l'utilisation de ces outils est aussi prisée par la communauté scientifique. L'avancée des réseaux sans fil et la miniaturisation des capteurs sont les clés des nouvelles avancées scientifiques en matière de santé et de surveillance des abeilles (Fitzgerald, Murphy, *et al.* 2015). Ces nouveaux capteurs semblent être prometteurs pour la détection des parasites ou maladies, mais aussi pour leur prévention. Certains auteurs supposent que l'étude des variations des patterns thermiques au moyen de capteurs permettrait de détecter la présence de *Varroa destructor* et le niveau d'infestation de la colonie. De même, les colonies avec un taux d'infestation élevé par *V. destructor* régulent moins bien l'hygrométrie, celle-ci est souvent plus faible de quelques pourcents par rapport à une colonie saine (Hou *et al.* 2016). Les capteurs d'humidité rendent également possible la prévention des maladies puisqu'une humidité anormalement élevée est propice au développement des champignons et acariens (Altun 2012). Les balances de ruches quant à elles, sont souvent appelées balances de miellées car elles offrent la possibilité de suivre en temps réel la productivité d'une colonie (Fitzgerald, Edwards-Murphy, *et al.* 2015), les variations pondérales anormales sont par conséquent synonyme de modification dans le comportement des abeilles (Fitzgerald, Edwards-Murphy, *et al.* 2015, Zacepins *et al.* 2015). Une chute soudaine de plusieurs kilogramme indiquera le départ de nombreuses abeilles, suivant la saison, cela peut être interprété comme un essaimage (Evans 2015). Les balances permettent également de quantifier les réserves et donc d'estimer les besoins en nourrissage au cours de l'hiver (Evans 2015, Human *et al.* 2012, McLellan 1977, Lecocq *et al.* 2015).

Nous nous sommes posés la question de l'intérêt de ces outils pour les apiculteurs français, de leur ressenti, mais aussi de la démocratisation de leur utilisation. Afin d'évaluer la situation en France, nous avons lancé une enquête en ligne pendant deux mois. Grâce à notre enquête nous avons obtenu des données préliminaires sur le nombre d'apiculteurs en France utilisant ce type d'outils et évaluer l'efficacité des outils sur le terrain au travers du ressenti des apiculteurs utilisateurs.

Matériel et méthode

Rédaction de l'enquête et diffusion

Les questions de l'enquête ont été rédigées suite à la lecture de 56 publications scientifiques. Ces publications avaient toutes pour sujet l'apiculture de précision ou les nouveaux outils technologiques en apiculture. Par ailleurs, deux entretiens téléphoniques ont été réalisés, l'un avec un fabricant, le second avec un apiculteur utilisateur de ce type d'outils. Cela a permis de cibler les questions pertinentes à développer auprès des apiculteurs. Les questions ont été rédigées sous le logiciel Sphinx et publiées en ligne sur le serveur de l'ANSES du 6 mars 2018 au 17 mai 2018. Le questionnaire comportait 53 questions dont la plupart étaient déroulantes et s'affichaient conditionnellement en fonction des réponses données.

Pour permettre une diffusion large de l'enquête et toucher le plus d'apiculteurs possibles, le lien du questionnaire a été transmis à différents acteurs du monde apicole tels que la fédération française d'apiculture (ADA France), les syndicats apicoles (SNA et SPMF), des vétérinaires spécialisés (Dr Samuel Boucher, ONIRIS et la SNGTV), la revue La santé de l'abeille, la société Hostabee®, mais aussi d'autres groupements sanitaires en lien avec la santé des abeilles (OVS via Laurent Cloastre du GDS France). Tous ces acteurs pouvaient transmettre à leur réseau le questionnaire via différents supports (Site internet, réseaux sociaux, journaux apicoles, mailing liste, newsletter).

Analyse du questionnaire

La représentativité de l'enquête est déterminée par la taille de l'échantillon, c'est-à-dire le nombre de personnes à interroger en fonction de la marge d'erreur tolérée. La formule pour estimer la taille minimum pour que l'échantillon illustre la population est la suivante :

$$n = \frac{t^2 \times P(1 - P) \times N}{t^2 \times P(1 - P) + (N - 1) \times y^2}$$

$$n = \frac{1,96^2 \times 0,5(1 - 0,5) \times 53\,953}{1,96^2 \times 0,5(1 - 0,5) + (53\,953 - 1) \times 0,05^2} = 381,45$$

n = taille de l'échantillon; N = taille de la population cible = nombre d'apiculteurs en France = 53 953⁽¹⁾; P = proportion attendue d'une réponse, si inconnue = 0,5; t = intervalle de confiance selon la loi normale centrée réduite pour 95 % = 1,96; y = marge d'erreur

(1) D'après les chiffres 2017 de FranceAgriMer

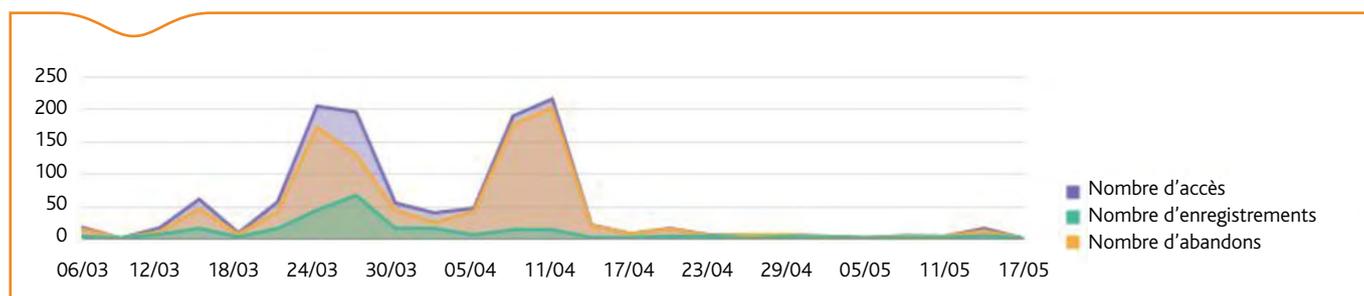


Figure 1. Analyse de la fréquentation totale du serveur de l'enquête (en violet), du nombre d'abandons (en jaune) et du nombre d'enregistrements de réponse au questionnaire (en vert) en fonction de la date

d'échantillonnage = 5 %. Ce calcul nous permet donc d'affirmer qu'avec un minimum de 381 réponses, notre enquête sera représentative de la population apicole française.

L'analyse descriptive des réponses a été réalisée en s'intéressant à l'équipement des apiculteurs en outils connectés. Certaines caractéristiques des apiculteurs ont été recueillies, telles que le statut professionnel des apiculteurs connectés⁽²⁾, ou le milieu d'installation des ruches (rural ou urbain).

L'ensemble des répondants étaient également invités à donner un avis sur ces nouvelles technologies sous la forme de commentaires libres. Les commentaires libres ne peuvent être traités en termes de pourcentage ou de statistiques mais ils apportent des informations et idées pertinentes sur le sujet.

Résultats et discussion

Fréquentation et réponses

Durant la période de mise en ligne du questionnaire, le serveur a reçu 2057 visites. Beaucoup d'abandons ont été enregistrés (n=1 672), la plupart de ces abandons ont eu lieu sur la première ou la deuxième page du questionnaire, cela correspondait à la présentation de l'enquête et aux questions généralistes. On peut donc considérer que ces abandons sont dus à des visites de curiosité et non le résultat de difficultés rencontrées pour remplir le questionnaire. En étudiant la fréquentation journalière du serveur (Figure 1), il est possible de constater l'efficacité des différents relais de transmission de l'enquête.

Trois-cent-quatre-vingt-six réponses complètes au questionnaire ont été enregistrées. Le temps de réponse moyen au questionnaire était de 6 minutes et 26 secondes, avec un minimum de 52 secondes et un maximum 56 minutes et 6 secondes. Avec 386 réponses au questionnaire, nous pouvons affirmer que notre échantillon est représentatif de la population apicole française avec une marge d'erreur de 5 % et un niveau de confiance de 95 %. Parmi les répondants, 73 % se sont déclarés être apiculteurs amateurs (leur production apicole est destinée au cadre familial), 14 % être apiculteurs semi-professionnels (l'apiculture n'est pas leur activité principale mais leur production est destinée en partie à la vente) et 13 % être apiculteurs professionnels. La répartition socio-professionnelle des apiculteurs ayant répondu au questionnaire est semblable aux proportions annoncées par FranceAgriMer. Les apiculteurs de loisir ou les apiculteurs pour lesquels l'apiculture représente une activité secondaire représentent 93 % de la population apicole, dans notre étude cette proportion est de 87 %. Cette observation confirme la représentativité de notre échantillon. Le biais envisageable de l'étude aurait pu être un nombre d'enregistrements plus élevé de la part des apiculteurs connectés, ce qui aurait pu fausser l'estimation de recensement. Il semblerait que cela ne soit pas le cas, seuls 13 % des apiculteurs répondants sont utilisateurs d'outils connectés.

Réponses de l'ensemble des apiculteurs

Au sein de tous les répondants, 27 % utilisent des cahiers de miellerie informatisés du type tableur Excel, logiciels spécialisés de gestion apicole, formulaires en ligne GoogleSheet®, ou encore applications pour Smartphone (Hive Tracks®, Hivekeepers®, Hive Tool Mobile®, Apiary book®, Beekeeper®, etc.). Parmi les réfractaires à l'utilisation de cahier de miellerie informatisé, 69,2 % considèrent que ces outils ne correspondent pas à leurs besoins, 8,6 % qu'ils ne sont pas efficaces et 11,1 % qu'ils sont trop compliqués à utiliser. En ce qui concerne les agendas numériques, 11,1 % déclarent s'en servir pour tenir un registre des visites au rucher et 13,7 % pour se rappeler d'effectuer des tâches précises sur les colonies.

Sur 386 réponses, 206 personnes ont souhaité laisser un commentaire à la fin de l'enquête. Parmi ceux-là, 45 personnes indiquent être défavorables à l'utilisation d'outils connectés en apiculture, contre 59 qui témoignent d'un ressenti favorable envers ces technologies, la différence entre les deux groupes n'est pas significative (Chi2, p = 0.17). Les personnes défavorables évoquent souvent avoir des inquiétudes quant à l'exposition des abeilles aux ondes, ou sont réfractaires à l'utilisation d'outils numériques. À l'heure actuelle les publications scientifiques sur le sujet ne sont pas assez nombreuses pour pouvoir affirmer avec certitude d'un effet néfaste ou non, et c'est un sujet controversé dans la communauté scientifique. Cependant certains auteurs démontrent que l'exposition des abeilles à des téléphones portables ou à des tours de relai mobile n'affectent pas la productivité des abeilles (Patel, Nordin, and Al-Haiqi 2014, Mall, Pramod, and Yogesh Kumar 2014). Il est cependant utile de notifier que les outils connectés apicoles existent plusieurs années et qu'à travers ce questionnaire, aucun des utilisateurs n'a fait état de comportement anormal de leurs colonies suite à leur installation.

En ce qui concerne le coût de ces outils, 17 personnes les considèrent comme trop chers par rapport à la valeur de leur production. De plus 34 personnes estiment que ces outils ne sont pas utiles pour un petit rucher et qu'ils sont probablement réservés aux professionnels. D'après les répondants, l'âge est également un frein à l'utilisation de ces technologies, 7 apiculteurs déclarent être trop âgés pour travailler avec des outils numériques. En revanche, 26 interrogés aimeraient en savoir plus sur les outils connectés, certains indiquent également leur désir d'être formés par les rucher-écoles à leur utilisation. Les nouveaux outils apicoles sont en effet utilisés à des fins d'enseignement pour quatre répondants, trois dans des rucher-écoles et un dans un lycée agricole, leur intérêt pédagogique semblant convaincre les utilisateurs.

Parmi les suggestions communiquées, on note que certains répondants (n=3) estiment que ces outils pourraient être utiles pour évaluer le rendement des ruches transhumantes et surveiller les ruches éloignées. Un apiculteur aimerait utiliser une application smartphone, libre de droits, pour géolocaliser les débuts et fins de floraisons en France afin d'améliorer la productivité des abeilles. Sur les champs cultivés, c'est un service qui peut être monnayé entre l'agriculteur et l'apiculteur et qui est organisé en fonction des besoins de l'agriculteur. La plateforme Beewapi (ANAMSO) par exemple, met en relation les apiculteurs avec les agriculteurs pour contractualiser une pollinisation. Les floraisons sauvages sont recensées sur certains sites internet avec des dates approximatives, mais aucune application ou site internet ne donnent en temps réel l'information des floraisons, alors que ces informations pourraient être mises à disposition des apiculteurs grâce aux images satellites ou par des actions de sciences participatives. Actuellement il existe des applications pour smartphone (Blooms for bees®, Bee smart®) permettant aux particuliers de prendre part à des projets de sciences participatives en recensant les pollinisateurs dans leur jardin. Ces informations sont utiles aux chercheurs, mais il pourrait être intéressant d'étendre cela aux floraisons en général en invitant les participants à signaler les arbres ou plantes en fleurs, dans le but d'aider les apiculteurs.

Un apiculteur souhaiterait également une application qui aurait pour but d'augmenter la communication entre les particuliers et les apiculteurs, afin de leur permettre le signalement d'un essaim ou encore de favoriser les circuits de vente directe. Une autre proposition est d'avoir à disposition une application smartphone avec géolocalisation, pour déclarer aux services vétérinaires les maladies à déclaration obligatoire et les mortalités anormales de façon simplifiée. Cette idée pourrait être un point intéressant à développer dans le cas des suivis épidémiologiques de colonies, cela pourrait éventuellement permettre l'amélioration de la communication entre les services vétérinaires et les apiculteurs. Un apiculteur déclare également utiliser l'application pour smartphone Beescanning® qui permet de partir de

(2) Apiculteurs utilisant des outils connectés apicoles sur leur rucher

photo smartphone des cadres de déterminer le niveau d'infection par *V. destructor*. D'autres répondants (n=2) aimeraient utiliser une application smartphone liée à des QR codes individualisés par ruche. Les QR codes sont des codes-barres matriciel de forme carrée, ils peuvent être scannés par un smartphone et permettent d'accéder à des informations propres à un seul QR code. Ces QR codes peuvent être installés individuellement sur des ruches pour faciliter l'enregistrement des tâches effectuées ou à effectuer par ruche et ainsi améliorer la gestion du rucher. Un apiculteur déclare utiliser cette technologie et en être satisfait. Ces trois suggestions de la part des apiculteurs sont déjà en cours de développement par le consortium BPRACTICES, lancé par l'Istituto Zooprofilattico Sperimentale del Lazio et della Toscana (IZSLT - Italie). Ce projet permettra l'installation de QR codes sur les ruches, l'enregistrement facilité de la présence des parasites et maladies, l'analyse qualitative du miel. Les apiculteurs auront également à disposition un guide des bonnes pratiques apicoles et recevront des conseils relatifs à l'état de santé de leur colonie et aux soins qu'ils doivent effectuer pour traiter leurs colonies. Le projet a aussi pour but de placer des QR codes sur les pots de miel afin que le consommateur puisse obtenir directement les informations relatives à la qualité du miel, sa provenance mais aussi donner un retour à l'apiculteur et noter le miel. Ce retour permettra de créer un lien entre l'apiculteur et le consommateur.

Utilisateurs des outils connectés en France

Parmi les apiculteurs connectés, nous avons estimé leur expérience apicole par leur catégorie socio-professionnelle (apiculteur professionnel ou non), 44 % sont apiculteurs professionnels contre 42 % pour les apiculteurs amateurs et 14 % pour les semi-professionnels (Figure 2). Le nombre d'années d'expérience en apiculture a également été rapporté : 52 % déclarent être apiculteurs depuis plus de 10 ans, 40 % depuis trois à 10 ans et 8 % ont moins de trois ans d'expérience. Ce haut niveau d'expérience apicole se confirme car près de la moitié des apiculteurs connectés possèdent plus de 100 colonies, le reste en possède moins de 50 (Figure 3). Sur ces colonies en moyenne 4,8 sont équipées d'outils connectés, l'intervalle allant d'une à 21 ruches connectées pour un apiculteur. Les apiculteurs connectés travaillent principalement en milieu rural (62 %), 18 % ont installé leurs ruches en milieu urbain ou semi-urbain, 20 % installent leurs ruches indifféremment dans l'un des deux milieux. Les apiculteurs connectés sont par conséquent, des apiculteurs expérimentés et principalement installés en milieu rural, loin de l'image du « geek urbain » néophyte en apiculture, que l'on aurait pu imaginer pour l'utilisation de ce genre d'outils. Cette information est pertinente dans le sens où elle permet d'attester que

ces outils représentent un intérêt réel pour améliorer la gestion du rucher, faciliter le suivi de la production, mieux préparer ses visites au rucher et limiter les déplacements, tout cela dans le but d'augmenter le rendement de l'exploitation.

Les apiculteurs se sont équipés de ces outils majoritairement au cours des trois dernières années, seuls 20 % ont déclaré être équipés depuis plus de trois ans (Figure 4). L'utilisation de ces outils auprès des apiculteurs semble donc se démocratiser. De nombreuses start-ups ont été créées autour des outils connectés apicoles, l'offre du marché est actuellement florissante et les prix d'entrée de gamme sont de plus en plus attractifs.

Certains répondants (n=2) aimeraient toutefois que leurs outils comprennent une station météo ou un pluviomètre connecté. Pour 52 %, les outils connectés sont fortement utiles aux pratiques apicoles, 40 % considèrent qu'elles le sont un peu, et 8 % les considèrent comme totalement inutiles. Deux personnes signalent être déçues de leur investissement. Toutefois, la plupart des utilisateurs indiquent dans la partie commentaire libre être satisfaits de leur investissement. La majorité des apiculteurs reconnaissent donc l'intérêt des outils connectés.

Les outils les plus utilisés sont la balance de miellée (45 %), suivis des systèmes GPS-Antivol (16 %), puis des capteurs de températures (15 %) (Figure 5). Les apiculteurs déclarent avoir fait le choix d'investir dans ce type d'outil principalement pour améliorer la gestion du rucher (n=23), mais aussi pour limiter les déplacements (n=14), pour lutter activement contre le vol (n=5), pour des raisons pédagogiques (n=5) ou par simple curiosité (n=4). Les balances de miellées sont utiles pour quantifier les miellées et évaluer les capacités de rendement des colonies dans leur environnement, mais aussi pour suivre la quantité de réserve disponible en période hivernale (Zacepins, Stalidzans, and Meitalovs 2012). Parmi les apiculteurs connectés les professionnels sont majoritaires, le suivi des miellées représente donc un enjeu économique fort mais les amateurs sont aussi curieux de cette information. Couplée à un monitoring des floraisons, des activités agricoles et autres données environnementales, la mesure du poids permet une gestion optimale des ruchers et des périodes de floraisons (Gil-Lebrero *et al.* 2016). On comprend alors que les outils de suivi des données extérieures telles que les conditions météo représentent 7 % des investissements des apiculteurs (Figure 5). Déterminer la qualité de la miellée et le potentiel mellifère d'un site est d'autant plus important dans le cas des transhumances. Un apiculteur nous a également indiqué avoir fait le choix d'investir dans un drone pour pouvoir surveiller ses ruches sans avoir à s'équiper de protection. Les seconds outils auxquels les apiculteurs portent un intérêt non

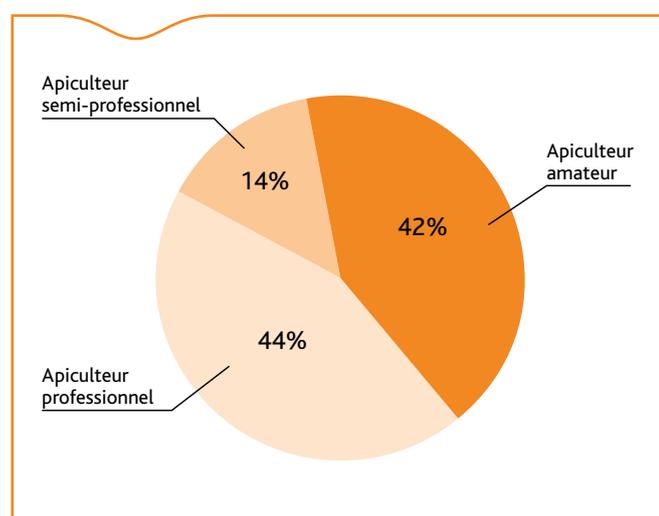


Figure 2. Répartition des apiculteurs connectés en fonction de leur catégorie socioprofessionnelle

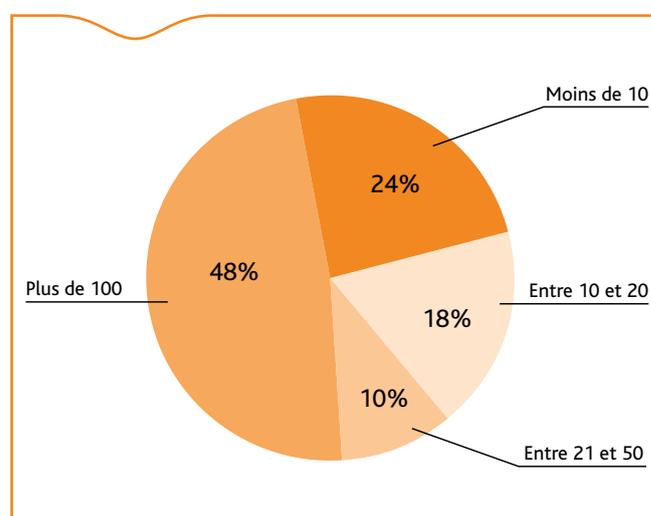


Figure 3. Répartition en pourcentage du nombre de colonies possédées par les apiculteurs connectés

négligeable (Figure 5) sont les systèmes GPS et anti-vol. Ceci est un reflet direct de leurs craintes et de leur désarroi face aux vols dont ils sont parfois victimes (31 plaintes pour vol de ruche recensés en 2017 en France, source BFMTV, citant le ministère de l'intérieur). Le suivi des températures permet principalement de monitorer à distance la santé générale de la colonie (Figure 8). Les températures à proximité du couvain varient indépendamment des températures extérieures (Chen *et al.* 2015, Harun *et al.* 2015, Kim 2015). Elles sont cependant très légèrement variables au cours de la journée (Dunham 1931), cela en fonction de l'activité des butineuses et du rythme des miellées (Bayir and Albayrak 2016). Couplé à d'autres types de mesures (poids, humidité, son), les capteurs thermiques sont également prisés des apiculteurs et des chercheurs car ils donnent une estimation fiable de la santé d'une colonie (Zacepins *et al.* 2016). En cas de variations thermiques anormales et non corrélées à la saison, ils permettent d'alerter l'apiculteur qui pourra agir en conséquence. Les capteurs thermiques sont peu coûteux et leur installation est aisée. De plus, dans le contexte actuel de changement climatique, comprendre les patterns thermiques et hydriques internes à la ruche permet une gestion adaptée du rucher et optimisera la production apicole (Dogan *et al.* 2017, Kress 2017, Dogan *et al.*). D'autres outils plus marginaux tels que les accéléromètres ou capteurs de vibration sont également installés par les apiculteurs semi-professionnels (n=5). Ces apiculteurs indiquent utiliser cet outil par curiosité et par passion pour l'ingénierie informatique. Les vibrations sont représentatives de l'activité journalière des abeilles (Bencsik *et al.* 2011). Par conséquent certains auteurs estiment que les patterns de vibration sont représentatifs de l'état de santé de la colonie et de son développement : plus le couvain est fort, plus les vibrations sont importantes (Bencsik *et al.* 2015). Des caméras de surveillance ont été installées par un apiculteur à l'intérieur de ses ruches. Les systèmes vidéos permettent d'estimer le nombre d'abeilles au sein de la colonie ainsi que sa force (Campbell, Mummert, and Sukthankar 2008) ou une mortalité (Poirot *et al.* 2012). Un apiculteur a indiqué avoir installé un compteur optique. Les compteurs d'entrée-sortie enregistrent l'activité des butineuses (Burrill and A. 1981, Pežović, Ranđić, and Zoran 2017). Ils ont permis de démontrer la corrélation entre l'activité des butineuses et la productivité d'une colonie (Marceau, Boily, and Perron 1990).

Les systèmes de fabrication personnelle occupent la part importante de 29 %, tandis que 71 % des répondants ont fait le choix d'investir auprès d'une marque. Deux apiculteurs indiquent avoir fabriqué leur propre système, par passion pour l'informatique et les outils connectés. Cette particularité met en avant la capacité des apiculteurs à redoubler d'ingéniosité pour développer leur propre système de

surveillance, à moindre coût, ce qui confirme les constatations des scientifiques (Bromenshenk *et al.* 2015).

Parmi les données reçues, 94 % des apiculteurs considèrent que celles-ci sont fiables, toutefois 16 % déclarent avoir observé une dérive dans des outils tels que les balances et les capteurs de température. Cette dérive se caractérise par une variation anormale des données et est non corrélée à des changements biologiques. Toutefois elle ne semble pas poser de problème particulier car négligeable ou corrigible principalement grâce à l'expérience de l'apiculteur.

Les outils connectés ont permis de sauver une colonie pour 32 % des répondants, principalement grâce aux balances qui informent l'apiculteur qu'une colonie a besoin d'être nourrie pendant l'hiver ou plus simplement si les variations pondérales, thermiques ou hydriques ne sont pas en adéquation avec la saison, une action est alors requise de la part de l'apiculteur. Pour 40 % des répondants, le système permet de détecter un essaimage en cours, la courbe de poids variant brutalement de plusieurs kilogrammes en quelques minutes. Cela peut alors être confirmé par vidéosurveillance pour les ruches équipées. En revanche seulement 12 % des apiculteurs estiment pouvoir détecter la présence de parasites. Les apiculteurs considèrent majoritairement qu'une ruche dont les données témoignent d'un mauvais développement est signe d'une infection potentielle, le diagnostic sera confirmé par un examen visuel réalisé par l'apiculteur.

Conclusion de l'enquête

Les outils connectés utilisés en apiculture, bien que récents sur le marché, ne semblent pas pouvoir être considérés comme des gadgets ou phénomènes de mode, car leurs applications et l'intérêt qu'ils suscitent auprès des apiculteurs ont été démontrés tout au long de cette étude. Leur utilisation semble se développer au cours des années : de plus en plus d'apiculteurs font le choix d'investir ou du moins se sont intéressés au sujet. Les nombreuses demandes de renseignement qui nous ont été adressées devraient inciter les ruchers-écoles à proposer des formations autour de l'utilisation de ces nouvelles technologies. Ces outils autrefois réservés aux chercheurs ont su trouver leur place dans le quotidien des apiculteurs. L'importance de la recherche sur le sujet représente un enjeu majeur pour les équipes. L'augmentation des publications sur le sujet au cours des dernières années atteste d'un potentiel encore à démontrer. À une époque où les pressions parasitaires et environnementales sont de plus en plus fortes sur les abeilles, les nouveaux outils technologiques apicoles semblent en premier lieu permettre aux chercheurs qu'explorer de nouvelles méthodologies prometteuses pour comprendre les mécanismes du

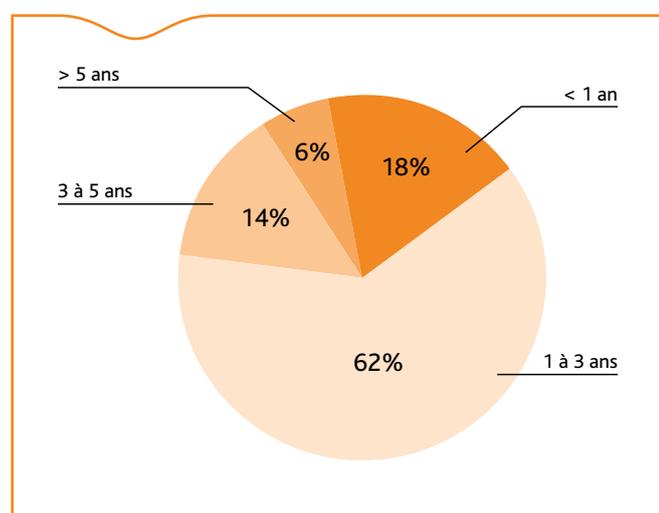


Figure 4. Répartition en pourcentage du nombre d'années d'utilisation d'outils connectés apicoles

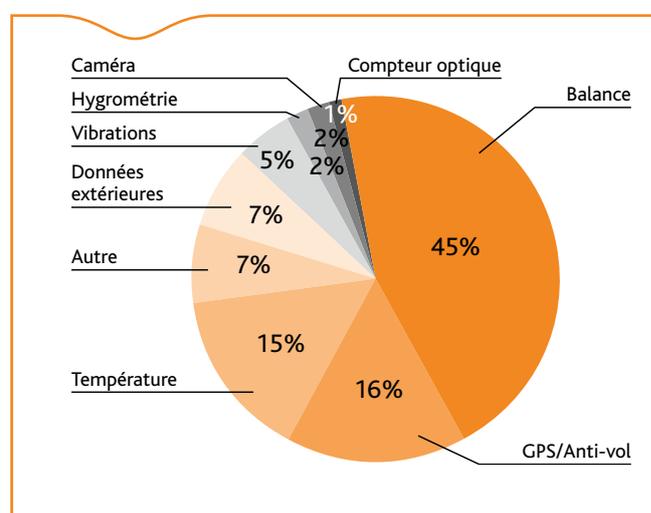


Figure 5. Répartition en pourcentage des outils utilisés par les apiculteurs connectés

déclin des colonies. Notre étude nous a permis d'attester de leur utilité quotidienne auprès des apiculteurs, leur permettant ainsi d'aborder la question des pratiques apicoles sous un nouveau jour.

Toutes les applications smartphones citées dans le texte sont pour la plupart disponibles sur Android et iOS et disponible au téléchargement sur les plateformes habituelles.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier Véronique Da-Riz pour son aide dans l'utilisation du logiciel Sphinx.

Références bibliographiques

- Altun, A. A. 2012. "Remote control of the temperature-humidity and climate in the beehives with solar-powered thermoelectric system." *Control Engineering and Applied Informatics* 14 (1):93-99.
- Bayir, R., and A. Albayrak. 2016. "The monitoring of nectar flow period of honey bees using wireless sensor networks." *International Journal of Distributed Sensor Networks* 12 (11). doi: 10.1177/1550147716678003.
- Bencsik, Martin, Joseph Bencsik, Michael Baxter, Andrei Lucian, Julien Romieu, and Mathias Millet. 2011. "Identification of the honey bee swarming process by analysing the time course of hive vibrations." *Computers and Electronics in Agriculture* 76 (1):44-50. doi: 10.1016/j.compag.2011.01.004.
- Bencsik, Martin, Yves Le Conte, Maritza Reyes, Maryline Pioz, David Whittaker, Didier Crauser, Noa Simon Delso, and Michael I Newton. 2015. "Honeybee colony vibrational measurements to highlight the brood cycle." *PLoS one* 10 (11):e0141926.
- Bromenshenk, Jerry J, Colin B Henderson, Robert A Seccomb, Phillip M Welch, Scott E Debnam, and David R Firth. 2015. "Bees as biosensors: chemosensory ability, honey bee monitoring systems, and emergent sensor technologies derived from the pollinator syndrome." *Biosensors* 5 (4):678-711.
- Burrill, R.M., and Dietz. A. 1981. "The response of honey bees to variations in solar radiation and temperature." *Apidologie* 12 (4):319-328.
- Campbell, J., L. Mummert, and R. Sukthankar. 2008. "Video Monitoring of Honey Bee Colonies at the Hive Entrance." *Visual observation & analysis of animal & insect behavior* 8 (14).
- Chen, H., J. Zhao, T. Hu, X. Zhao, and D. Liu. 2015. "A comparison of several organosolv pretreatments for improving the enzymatic hydrolysis of wheat straw: Substrate digestibility, fermentability and structural features." *Applied Energy* 150:224-232. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.04.030.
- Decourtye, A., A. Dangleant, F. Allier, and C. Alaux. 2018. « La ruche connectée: objet de surveillance environnementale, de zootechnie ou de découverte récréative. » *Innovations Agronomiques* 67:77-87.
- Dogan, S, E Akbal, G Ozmen Koca, and A Balta. "Design of a Remote Controlled Beehive for Improving Efficiency of Beekeeping Activities."
- Dogan, S, E Akbal, G Ozmen Koca, and A Balta. 2017. "Design of a Remote Controlled Beehive for Improving Efficiency of Beekeeping Activities." 8th International advanced technologies symposium
- Dunham, W. E. 1931. "Hive Temperatures for Each Hour of a Day." *Ohio Journal of Science* 31 (3).
- Edwards-Murphy, F., M. Magno, P. M. Whelan, J. O'Halloran, and E. M. Popovici. 2016. "B+WSN: Smart beehive with preliminary decision tree analysis for agriculture and honey bee health monitoring." *Computers and Electronics in Agriculture* 124:211-219. doi: 10.1016/j.compag.2016.04.008.
- Evans, S. K. 2015. "Electronic beehive monitoring - applications to research." Quedlinburg.
- Fitzgerald, D. W., F. Edwards-Murphy, W. M. D. Wright, P. M. Whelan, and E. M. Popovici. 2015. "Design and development of a smart weighing scale for beehive monitoring."
- Fitzgerald, D. W., F. E. Murphy, W. M. Wright, P. M. Whelan, and E. M. Popovici. 2015. "Design and Development of a Smart Weighing Scale for Beehive Monitoring." Systems Conference (ISSC), 2015 26th Irish.
- Gil-Lebrero, Sergio, Francisco Javier Quiles-Latorre, Manuel Ortiz-López, Víctor Sánchez-Ruiz, Victoria Gámez-López, and Juan Jesús Luna-Rodríguez. 2016. "Honey bee colonies remote monitoring system." *Sensors* 17 (1):55.
- Harun, A., S. K. Zaaba, L. M. Kamarudin, A. Zakaria, R. S. Mohamed Farook, D. L. Ndzi, and A. Y. M. Shakaff. 2015. "Stingless bee colony health sensing through integrated wireless system." *Jurnal Teknologi* 77 (28):85-90. doi: 10.11113/jt.v77.6798.
- Hou, C. S., B. B. Li, S. Deng, and Q. Y. Diao. 2016. "Effects of *Varroa* destructor on temperature and humidity conditions and expression of energy metabolism genes in infested honeybee colonies." *Genet Mol Res* 15 (3). doi: 10.4238/gmr.15038997.
- Human, Hannelie, Robert Brodschneider, Vincent Diemann, Galen Dively, James D Ellis, Eva Forsgren, Ingemar Fries, Fani Hatjina, Fu-Liang Hu, Rodolf Jaffé, Annette Bruun Jensen, Angela Köhler, Josef P Magyar, Asli Özkýrým, Christian W W Pirk, Robyn Rose, Ursula Strauss, Gina Tanner, David R Tarpay, Jozef J M van der Steen, Anthony Vaudo, Fleming Vejsnæs, Jerzy Wilde, Geoffrey R Williams, and Huo-Qing Zheng. 2012. "Miscellaneous standard methods for *Apis mellifera* research." *Journal of Apicultural Research*. doi: 10.3896/IBRA.1.52.4.10.
- Kim, BS. 2015. "Design and Implementation of Adaptive Temperature Data Logger for Honey Bee Hive." *Korean Journal of Apiculture*.
- Kress, A. 2017. "Using Technology to Monitor Honey Bee (*Apis mellifera*) Winter Clusters: A Study in Comparative Advantages of Thermal Imaging and Temperature/ Humidity Sensing Technologies." Undergraduates, Grand Valley State University.
- Lecocq, A., P. Kryger, F. Vejsnaes, and A. Bruun Jensen. 2015. "Weight Watching and the Effect of Landscape on Honeybee Colony Productivity: Investigating the Value of Colony Weight Monitoring for the Beekeeping Industry." *PLoS One* 10 (7):e0132473. doi: 10.1371/journal.pone.0132473.
- Mall, Pramod, and Yogesh Kumar. 2014. "Effect of electromagnetic radiations on brooding, honey production and foraging behavior of European honeybees (*Apis mellifera* L.)." *African Journal of Agricultural Research* 9 (13):1078-1085.
- Marceau, J., R. Boily, and J. M. Perron. 1990. "The relationship between hive productivity and honeybee flight activity." *Journal of Apicultural Research* 29 (1):28-34. doi: 0.1080/00218839.1990.11101194.
- Marković, D., U. Pešović, S. Đurašević, and S. Randić. 2016. "Decision support system for temperature monitoring in beehives." *Acta Agriculturae Serbica* 21 (42):135-144. doi: 10.5937/AASer1642135M.
- McLellan, AR. 1977. "Honeybee colony weight as an index of honey production and nectar flow: a critical evaluation." *Journal of Applied Ecology*:401-408.
- Patel, A., R. Nordin, and A. Al-Haiqi. 2014. "Beyond ubiquitous computing: The Malaysian HoneyBee project for Innovative Digital Economy." *Computer Standards and Interfaces* 36 (5):844-854. doi: 10.1016/j.csi.2014.01.003.
- Pešović, Uroš, Siniša Randić, and Stamenković Zoran. 2017. "Design and Implementation of Hardware Platform for Monitoring Honeybee Activity." *Proceedings of 4th International Conference on Electrical, Electronics and Computing Engineering - Serbia*.
- Poirot, B., V. Nevers, P. Gomez-Krämer, M. Ménard, D. Crauser, and Y. Le Conte. 2012. « Utilisation d'un compteur d'abeilles par vidéo surveillance pour le suivi à distance et en temps réel de la mortalité au sein des colonies. » *Journée Scientifique Apicole (JSA), France*.
- Zacpins, A, E Stalidzans, and J Meitalovs. 2012. "Application of information technologies in precision apiculture." Proceedings of the 13th International Conference on Precision Agriculture (ICPA 2012).
- Zacpins, Aleksejs, Valters Brusbardis, Jurijs Meitalovs, and Egils Stalidzans. 2015. "Challenges in the development of Precision Beekeeping." *Biosystems Engineering* 130:60-71.
- Zacpins, Aleksejs, Armands Kviesis, Egils Stalidzans, Marta Liepniece, and Jurijs Meitalovs. 2016. "Remote detection of the swarming of honey bee colonies by single-point temperature monitoring." *Biosystems Engineering* 148:76-80. doi: https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.05.012.

Bulletin épidémiologique Santé animale - alimentation

Juillet 2019

Impact de la température sur la mortalité bovine : brève revue

Eric Morignat^{(1)*}, Emilie Gay⁽¹⁾, Jean-Luc Vinard⁽¹⁾, Carole Sala⁽¹⁾, Didier Calavas⁽²⁾, Viviane Hénaux⁽¹⁾

Auteur correspondant : eric.morignat@anses.fr

(1) Université de Lyon, Anses, Laboratoire de Lyon, Unité EAS, Lyon, France

(2) Université de Lyon, Anses, Laboratoire de Lyon, Coordinateur Plateforme ESA, Lyon, France

Résumé

Le changement climatique affecte à la fois la santé humaine et animale. L'augmentation de la fréquence et de l'intensité des épisodes climatiques exceptionnels entraîne un intérêt accru sur l'effet de la température sur la mortalité. Le sujet a été étudié de façon intensive chez l'Homme et les effets associés à différentes expositions à des températures stressantes ont été analysés, que ce soit l'effet de la chaleur, du froid, du très grand froid ou encore des canicules et des vagues de froid. En revanche, la question a été assez peu explorée chez les animaux d'élevage. Cet article présente une synthèse des travaux réalisés ces dernières années sur le sujet dans l'espèce bovine.

Mots-clés:

Température, mortalité, bovins, canicule, vague de froid

Abstract

Effect of temperature on bovine mortality – short review

Climate change affects both human and animal health. The increase of the frequency and intensity of exceptional weather events leads to a growing interest in the effect of temperature on mortality. The subject has been studied intensively in humans and the effects associated with different thermal exposures have been analyzed, specifically the effect of heat, cold, very cold weather, heat and cold waves. On the other hand, the issue has been poorly studied in farm animals. This article presents a summary of the recent studies in cattle.

Keywords:

Temperature, mortality, cattle, heat wave, cold wave

Le « changement climatique » se traduit par une hausse globale des températures, mais également par une augmentation de la fréquence, de l'intensité, de la durée et de l'étendue spatiale de certains phénomènes météorologiques extrêmes (canicules, vagues de froid, tempêtes, périodes de sécheresse, etc.) (IPCC, 2012). Ces modifications climatiques peuvent avoir des conséquences socio-économiques importantes, du fait des impacts négatifs sur la santé humaine, l'agriculture et l'environnement.

Les épisodes de canicule récents en France ont provoqué une forte augmentation de la mortalité humaine (Daniel *et al.*, 2016) mais ont également affecté les populations animales. Ainsi, suite à l'épisode de canicule de 2003 en France métropolitaine, les sociétés d'équarrissage ont rapporté une hausse des tonnages collectés pour toutes les espèces

animales, et plus particulièrement pour l'espèce bovine. L'effet de la température sur la physiologie et la santé dans cette espèce est en effet accentué lors d'expositions prolongées à des conditions extrêmes, du fait de la capacité de thermorégulation limitée des bovins selon leur âge (Hahn, 1999; Silanikove, 2000).

Ces dernières années, des travaux menés dans différents pays ont permis d'améliorer les connaissances sur l'effet de la température sur la mortalité bovine. Cet article propose une synthèse de l'ensemble des travaux récents menés sur ce sujet en s'intéressant : i) aux objectifs et aux méthodes mises en œuvre dans ces études, ii) aux résultats obtenus sur la relation générale température-mortalité, et iii) aux effets associés à des expositions prolongées à des températures extrêmes.

Objectifs et méthodes des études

Au cours de la dernière décennie, plusieurs études ont évalué et quantifié l'effet de la température sur la mortalité bovine. Malgré un objectif en apparence commun, ces travaux sont difficilement comparables car ils sont basés sur des indicateurs variables de la température mesurée et ressentie, concernent des populations différentes (pays, types de production, classes d'âge...) et utilisent des designs ainsi que des modèles statistiques différents (Tableau 1).

Nature de l'effet température et indicateurs étudiés

L'évaluation de la relation température-mortalité repose directement sur des données de température ambiante ou sur des index composés de la température ambiante combinée avec d'autres variables météorologiques (humidité, vent, pluie, etc.). La variable température utilisée est généralement la température journalière moyenne, même si dans certains cas la température journalière maximale ou minimale est préférée. L'indice de température et d'humidité (ITH) s'appuie principalement sur la température mais intègre aussi le taux d'humidité. Cet indice reflète, mieux que la température seule, le niveau de stress physique découlant de conditions météorologiques extrêmes et il est donc très majoritairement utilisé dans les études ciblant des populations bovines. Dans une perspective de simplification, nous parlons dans la suite de l'article de l'effet de la température, même si c'est l'effet de l'ITH qui est utilisé.

La nature de l'effet de la température étudié est très variable entre études. Certains travaux s'intéressent à l'effet relatif à une exposition ponctuelle, généralement à l'échelle d'une journée, à des températures élevées ou basses. Une approche consiste à se focaliser spécifiquement sur l'effet de la chaleur ou du froid en définissant, respectivement, un seuil de température au-delà ou en-deçà duquel le risque de mortalité est modélisé, le plus souvent avec une contrainte de linéarité (relation linéaire entre température et mortalité). Une autre approche repose sur l'évaluation de l'effet sur toute la plage possible des températures. Dans ce cas, deux seuils de températures sont généralement estimés,

entre lesquels le risque de mortalité est minimal et au-delà desquels l'augmentation du risque est estimée. La zone de température qui présente le niveau de risque minimal de mortalité s'appelle la zone de thermo-neutralité.

D'autres travaux s'intéressent aux effets associés à des expositions à des phénomènes météorologiques exceptionnels, caractérisés par des températures d'intensité remarquable et persistant plusieurs jours consécutifs: les canicules et les vagues de froid. En effet, l'exposition prolongée à des températures extrêmes nuit aux capacités à récupérer de la chaleur ou du froid, et peut induire un stress physiologique intense pouvant entraîner la mort des animaux par effet direct ou indirect (sensibilité aux maladies) (Hahn, 1999; Silanikove, 2000). Bien qu'il n'existe pas de définition unique et universelle de la canicule, il y a un consensus pour dire que les canicules correspondent à des périodes de températures anormalement élevées, concernant plusieurs jours consécutifs. Ces événements sont donc généralement caractérisés par deux paramètres: un seuil de température qui caractérise l'intensité et une durée qui est le nombre de jours consécutifs au-dessus de ce seuil.

L'effet de la température pendant un épisode de canicule peut être décrit comme la somme de deux contributions: un risque accru dû aux effets des niveaux de températures journalières élevées, et un risque additionnel dû à une exposition prolongée à ces températures élevées. Certaines études considèrent l'effet de la canicule comme la somme de ces deux contributions, référé dans cet article comme un effet global, alors que d'autres considèrent que l'effet de la canicule est spécifiquement la part de risque additionnel. Le même raisonnement s'applique aux vagues de froid.

Les modèles utilisés

Les études s'appuient sur des modèles de régression de type modèle linéaire généralisé ou modèle additif généralisé dont la famille de distribution (Poisson ou binomiale) dépend du design de l'étude, majoritairement des séries temporelles ou des études croisées (« case-crossover »). Lors de l'étude de séries temporelles, le modèle

Tableau 1. Caractéristiques des études portant sur la relation entre la température et la mortalité dans la filière bovine

Effet étudié ¹	Population	Design	Modèle	Echelle spatiale (surface quand disponible) - Pays	Référence
Chaleur	Laitiers (> 2 ans)	Crossover	Régression linéaire + ANOVA	2 régions - Italie	(Vitali <i>et al.</i> , 2009)
Chaleur	Laitiers (> 2 ans)	Case-crossover	GLM ² (Binomiale)	3 districts - Italie	(Crescio <i>et al.</i> , 2010)
Canicule – effet global	Laitiers et allaitants	Séries temporelles	GLM (Poisson)	Départements (5 880 km ² en moyenne) - France	(Morignat <i>et al.</i> , 2014)
Température	Laitiers et allaitants	Séries temporelles	GLM (Poisson)	Cercles de 40 km de rayon (5 027 km ²) - France	(Morignat <i>et al.</i> , 2015)
Canicule – effet global	Laitiers	Design hybride basé sur le risque	GLM (Poisson)	Sud de l'Ontario - Canada	(Bishop-Williams <i>et al.</i> , 2015)
Canicule (effet global + effet durée)	Laitiers (> 2 ans)	Case-crossover	GLM (binomiale)	12 provinces - Italie	(Vitali <i>et al.</i> , 2015)
Température	Laitiers (> 2 ans)	Case-crossover	GLM (binomiale) + méta-analyse	9 Cantons - Belgique	(Cox <i>et al.</i> , 2016)
Température	Laitiers	Séries temporelles	GLM (Poisson) + méta-analyse	Zones iso-hygro-thermales (5 516 km ² en moyenne) - France	(Morignat <i>et al.</i> , 2017)
Température + durée et intensité pendant les canicules et vague de froid	Laitiers et allaitants femelles	Séries temporelles	GLM (Poisson) + méta-analyse	Zones iso-hygro-thermales (5 516 km ² en moyenne) - France	(Morignat <i>et al.</i> , 2018)

1. température: évaluation de l'effet sur toute la plage des températures possible; chaleur: évaluation de l'effet au-delà d'un seuil de température; canicule/vague de froid – effet global: estimation conjointe de l'effet de la température et l'exposition prolongée

2. GLM: modèle linéaire généralisé

tente d'expliquer le taux de mortalité journalière par la température journalière. Les données sont modélisées à partir d'une régression de Poisson et les résultats sont exprimés en risques relatifs (RR). Pour quantifier l'effet de la température en limitant les biais, des facteurs de confusion doivent être pris en compte, notamment ceux qui sont associés au temps. Ainsi, dans ce type d'étude, la saisonnalité et la tendance à long terme de la mortalité sont prises en compte généralement avec des splines (c'est-à-dire des fonctions mathématiques souples permettant d'ajuster au mieux les données d'observation).

Les études de type « case-crossover » permettent d'évaluer l'effet de la température sur la mortalité, en utilisant uniquement les données concernant les bovins morts (les « cas ») et comparent l'exposition de chaque cas le jour de la mort (jour à risque) avec l'exposition de ces mêmes cas pendant d'autres jours (jours de contrôle). Chaque sujet étant son propre témoin, les facteurs de confusion sont contrôlés par le design de l'étude et ce plan permet ainsi d'éviter les biais résultant des tendances temporelles. Un modèle de régression logistique conditionnel est alors ajusté pour estimer l'effet de la température et les résultats sont exprimés en Odds-ratios (OR). Qu'ils soient exprimés en RR ou en OR dans les différentes études, les résultats expriment un niveau de risque à une température donnée par rapport à une température de référence.

Des études s'intéressant à l'effet de la chaleur sur la mortalité bovine contraignent la relation entre mortalité et température à être linéaire en deux parties: une partie où la relation entre la température et la mortalité est nulle et une partie au-delà d'une température seuil où le risque augmente de façon linéaire. Ce concept peut être étendu en intégrant une troisième partie linéaire pour modéliser l'effet des températures froides en dessous d'un deuxième seuil de température (Morignat *et al.*, 2015). La partie centrale de la relation délimitée par les deux seuils de températures représente la zone de thermo-neutralité, cf. supra. Ces modèles présentent un avantage en termes d'interprétation et de présentation des résultats, l'effet de la température étant résumé par les pentes des droites (une augmentation d'une unité de température étant associée à une augmentation du risque) et les températures seuil renseignant sur l'adaptation des populations aux différents climats. Cependant, cette approche se base sur une hypothèse forte: la forme linéaire de la relation entre température et mortalité, ce qui, si elle est fautive, peut engendrer des biais importants dans l'estimation des risques.

Plus récemment, le développement d'une nouvelle classe de modèles, les « distributed lag non-linear models » (Encadré 1), a permis d'affiner l'estimation de la relation entre température journalière et mortalité, avec deux améliorations importantes. D'une part, la relation est modélisée de manière non-linéaire sur toute la plage des températures et, d'autre part, elle prend en compte un effet 'lag', c'est-à-dire l'effet décalé dans le temps de l'exposition aux températures. En effet, typiquement, l'exposition à des facteurs environnementaux stressants engendre des effets qui durent bien au-delà de la période d'exposition. Ces modèles permettent donc d'attribuer la part d'augmentation du risque pour le jour de l'exposition et pour chaque jour suivant l'exposition. En cumulant la contribution relative du jour de l'exposition avec les contributions des jours suivants, il est possible de calculer le risque global associé à cette exposition. Les résultats de ces modèles montrent une relation non-linéaire entre la température journalière (en abscisses) et le risque relatif de mortalité (en ordonnées) en forme de V ou de U. La température correspondant au niveau de risque le plus faible est généralement fixée comme température de référence. Dans le cas d'une relation en V, le niveau de risque est minimal pour une seule valeur de température, alors que pour une relation en U le niveau de risque est minimal sur une plage de températures, la zone de thermo-neutralité. Ces résultats mettent donc en évidence, comme cela avait été montré avec les modèles à relation linéaires, une augmentation de la température associée à une augmentation

du risque de mortalité au-delà de la zone de thermo-neutralité. De la même façon, une diminution de la température en deçà de la zone de thermo-neutralité est associée à une augmentation du risque.

Echelle spatiale

Différentes échelles géographiques ont été utilisées dans ces études: des régions administratives (Cox *et al.*, 2016), des zones circulaires (de 40 km de rayon) autour de stations de relevés météorologiques (Morignat *et al.*, 2015), ou un partitionnement en zones de température et d'humidité homogènes (réalisé à partir d'une analyse factorielle multiple et d'une classification ascendante hiérarchique) (Encadré 2) (Morignat *et al.*, 2017). Le choix de la taille de la zone ou du nombre de zones dans le cas d'un partitionnement résulte d'un compromis entre une taille de zone suffisamment grande pour contenir un nombre d'animaux suffisant pour assurer une puissance nécessaire à l'analyse et, en même temps, une taille raisonnable de sorte que l'exposition des animaux soit homogène au sein de chaque zone pour assurer une estimation précise de la relation. Quelle que soit l'échelle géographique utilisée, une méta-analyse (Dominici *et al.*, 2000; Gasparrini and Armstrong, 2013) peut ensuite être réalisée pour combiner les estimations locales et en déduire une estimation moyenne de la relation à un niveau régional (Morignat *et al.*, 2017) ou national (Cox *et al.*, 2016; Morignat *et al.*, 2018). Cette approche d'analyse hiérarchique à deux niveaux permet de présenter une estimation nationale de l'effet au-delà de l'estimation d'une ou de quelques zones qui peuvent s'avérer non représentatives. La modélisation de la relation à l'échelle d'un pays sans passer par une échelle inférieure n'aurait pas de sens, compte tenu de l'hétérogénéité spatiale des conditions météorologiques.

Effet de la température sur la mortalité

Les premières études relatives à l'effet de la température sur la mortalité bovine étaient focalisées sur l'effet de la chaleur. Ces études, qui portaient sur les bovins laitiers adultes en Italie, ont mis en évidence un effet significatif de la chaleur sur la mortalité, avec une augmentation linéaire du risque associée à l'élévation de la température. Plus précisément, l'étude conduite dans les régions du Nord de l'Italie (Lombardie et Emilie-Romagne) a montré que la température n'avait pas d'effet sur la mortalité des bovins laitiers adultes jusqu'à des seuils d'ITH maximal⁽¹⁾ de 26°C_{ITH} et d'ITH minimal⁽²⁾ de 21°C_{ITH} (Vitali *et al.*, 2009). Au-delà de ces seuils, les auteurs ont mis en évidence des augmentations linéaires significatives de la mortalité. La seconde étude menée dans trois districts du Nord (Brescia et Cuneo) et du centre (Rome) de l'Italie a estimé, quant à elle, une augmentation globale de la mortalité de 4 % pour chaque augmentation d'une unité d'ITH au-delà du seuil spécifique de chaque district compris entre 17 et 21 °C_{ITH} (Crescio *et al.*, 2010).

D'autres travaux ont été réalisés sur la population bovine française, en prenant en compte les effets décalés dans le temps et en modélisant la relation sans contrainte de linéarité sur toute la plage des températures. Les analyses ont été réalisées à l'échelle de zones iso-hygro-thermiques et les résultats ont été combinés à l'échelle régionale (Morignat *et al.*, 2017) ou nationale (Morignat *et al.*, 2018). Les analyses ont été stratifiées par type de production (laitier et allaitant) et par classe d'âge des animaux (≤7 jours; 8 jours-3 mois; 3 mois-2 ans; > 2 ans). Les relations température-mortalité estimées sont des courbes en U qui expriment l'augmentation du risque associée à l'augmentation ou à la diminution des températures en dehors de la zone de thermo-neutralité. Cette zone de thermo-neutralité est située globalement

(1) ITH calculé à partir de la température maximale et de l'humidité relative minimale.

(2) ITH calculé à partir de la température minimale et de l'humidité relative maximale.

entre 15 et 20°C_{ITH} sauf pour les bovins laitiers de huit jours à trois mois qui ont une zone de thermo-neutralité plus large, entre 10 et 17°C_{ITH} et pour les bovins laitiers de plus de deux ans entre 5 et 17°C_{ITH}. Ces travaux ont montré une relation très similaire chez les bovins allaitants et laitiers (Figure 1) (Morignat *et al.*, 2018). Quelle que soit la classe d'âge des animaux, le niveau de risque était plus élevé pour des températures froides que pour des températures chaudes, à part chez les bovins adultes (pour lesquels les risques relatifs étaient estimés autour de 1,3 à -7°C_{ITH} (la moyenne nationale des températures minimales) et à 25°C_{ITH} (la moyenne nationale des températures maximales)). Globalement, l'augmentation du risque est symétrique de part et d'autre de la zone de thermo-neutralité (Figure 1). Une étude antérieure (Morignat *et al.*, 2015), avait d'ailleurs déjà montré que les pentes des droites représentant le risque pour les températures en dehors de la zone de thermo-neutralité n'étaient pas significativement différentes. L'observation d'un risque plus élevé pour les températures les plus froides que pour les températures les plus chaudes s'explique par une étendue des températures froides observées plus grande que celle des températures chaudes en dehors de cette zone de thermonutralité.

Le niveau de risque à une température donnée est très variable en fonction des catégories d'âge. Les très jeunes bovins ont une zone de thermo-neutralité restreinte, comprise entre 15 et 20°C. Ils sont peu sensibles au froid (RR=1,53 chez les laitiers et 1,59 chez les allaitants) et encore moins à la chaleur (RR=1,15 pour les allaitants et 1,22 pour les laitiers), ce qui est surprenant puisqu'il s'agit de la catégorie la

plus fragile. Ce résultat peut s'expliquer par une attention plus accrue des éleveurs envers cette catégorie d'âge. Passé les sept premiers jours de vie, les veaux ont survécu à la période la plus critique mais restent néanmoins fragiles et très largement sensibles aux diarrhées qui affaiblissent les animaux, aggravées lors de fortes chaleurs (déshydratation) ou de grands froids (hypothermie). Ces éléments peuvent expliquer en partie la plus grande sensibilité des bovins de huit jours à trois mois à la chaleur (RR > 1,4 à 25°C) et au froid (RR > 2,2 à -7°C). Chez les bovins adultes, la physiologie des vaches laitières, dont la fonction de production laitière se traduit par une augmentation de la température corporelle, leur permet en théorie de mieux supporter les températures hivernales et moins bien les températures estivales. Cette hypothèse semble être confirmée par la zone de thermo-neutralité beaucoup plus large pour les femelles laitières que pour les allaitantes bien que le RR soit identique à -7°C (Figure 1). D'autres hypothèses que la physiologie des bovins peuvent être avancées pour expliquer les différences d'effet de la température, notamment les modalités de logement en période de grand froid qui sont variables en fonction de la région, du type de production et du stade physiologique. Par exemple, dans les zones de montagnes où le froid est plus fréquent qu'en plaine, les bovins sont en général logés dans des étables adaptées à ces conditions, ce qui pourrait modifier la forme de la relation entre températures et mortalité. Les bovins laitiers sont plus fréquemment en bâtiment et pour des périodes plus longues que les bovins allaitants. Il est probable que les vaches soient souvent rentrées pour vèler, puis les veaux abrités pendant les premiers jours de vie.

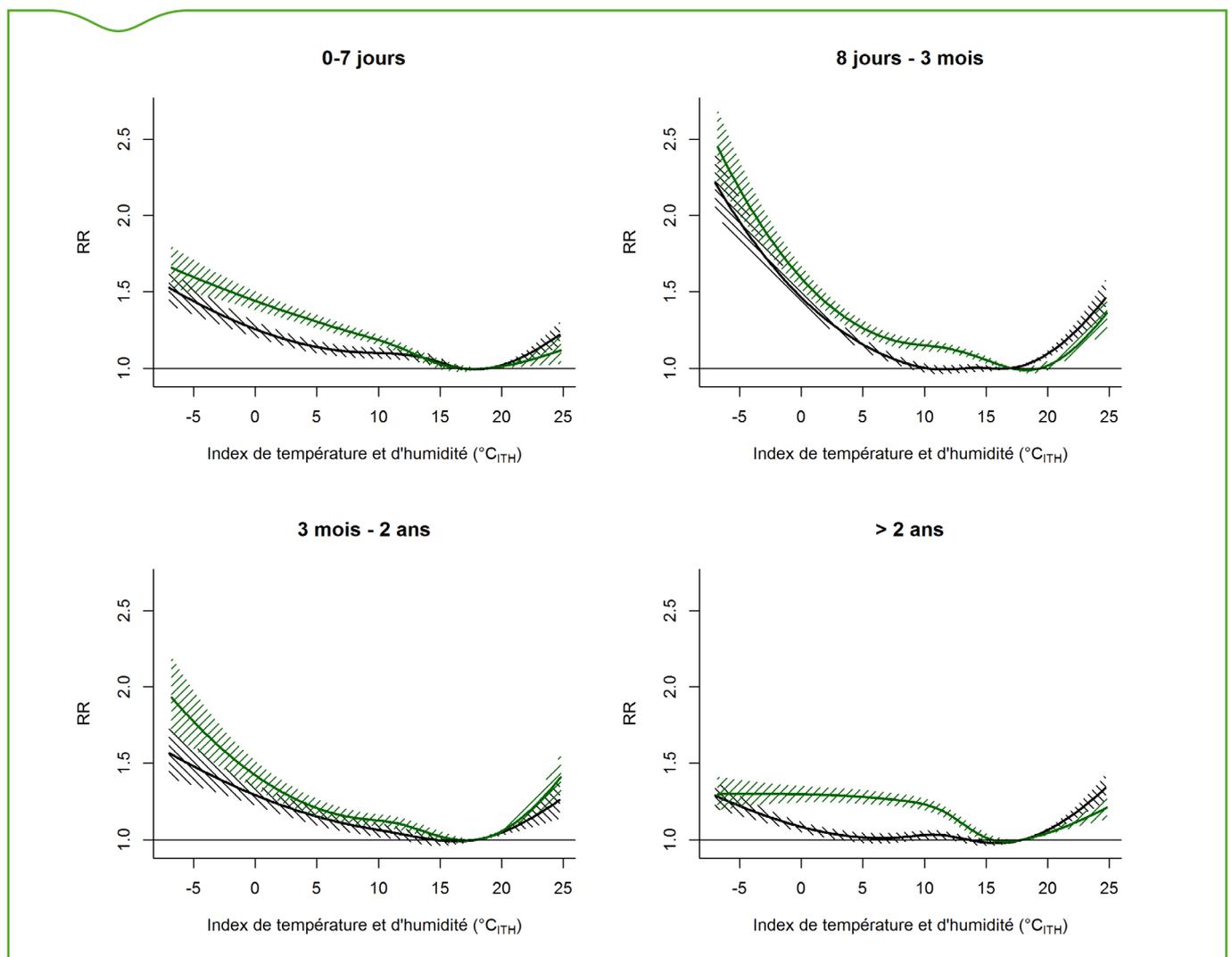


Figure 1. Relation température-mortalité par classe d'âge chez les bovins laitiers (en noir) et les bovins allaitants (en vert) (Morignat *et al.*, 2018) – RR = risque relatif

Une étude au design assez proche centrée sur les bovins laitiers adultes en Belgique (Cox *et al.*, 2016) a mis en évidence une courbe de température-mortalité en N, c'est-à-dire que le risque de mortalité est minimal dans la zone de thermo-neutralité et pour les températures extrêmement froides et maximal pour des températures moyennement froides et des températures chaudes. Cette différence demande à être investiguée au regard des pratiques d'élevage et des races bovines dans ce pays.

Effets des épisodes climatiques exceptionnels

L'impact des épisodes de canicule sur la mortalité bovine a été évalué de différentes manières. Une première étude s'est focalisée sur l'analyse d'épisodes de canicules spécifiques en France métropolitaine. Ainsi, en prenant la période 2004-2005 comme référence (pour estimer le niveau de mortalité de base pendant des années sans canicule), l'excès de mortalité pendant les épisodes de canicule de 2003 et 2006, exceptionnels par leur intensité et leur durée, a été quantifié (Morignat *et al.*, 2014). La canicule de 2003 qui a touché la France métropolitaine pendant les deux premières semaines d'août se caractérisait par des records de températures non enregistrés depuis 1950. Celle de juillet 2006 s'est caractérisée par des températures un peu moins soutenues, mais a duré une semaine de plus. L'étude a mis en évidence un excès de mortalité chez les bovins de 24 % pendant la canicule de 2003 et de 12 % pendant celle de 2006. Toutes les classes d'âge chez les bovins laitiers et allaitants ont été concernées. En 2003, 60 % des départements ont eu un excès significatif de mortalité pendant la première semaine de canicule et 51 % pendant la seconde semaine. L'impact a été moindre en juillet 2006 puisqu'aucun département n'a été en excès de mortalité la première semaine et seulement 4,5 et 40 % des départements étaient en excès, respectivement la deuxième et troisième semaine.

Classiquement, l'impact des canicules n'est pas estimé à partir d'épisodes spécifiques mais en incluant dans des modèles de régression de séries temporelles une variable indicatrice, marquant les jours de canicule. Ces jours sont caractérisés par une température au-delà d'un seuil et font suite à un nombre minimum de jours avec une température au-delà de ce seuil. Deux études ont ainsi investigué l'effet global de la canicule (sans distinguer les risques liés à l'intensité et la durée de la canicule) sur la mortalité des bovins laitiers, en considérant deux définitions distinctes de cet événement. La première étude, conduite au Canada (Bishop-Williams *et al.*, 2015), s'est appuyée sur la définition de l'Office environnemental du Canada, soit au moins trois jours consécutifs avec des températures journalières maximales supérieures à 32°C. Elle a conclu à une augmentation du taux de mortalité de 27 % en période de canicule par rapport à une période hors canicule. Dans la seconde étude (Vitali *et al.*, 2015), la canicule a été définie comme une période d'au moins trois jours pendant lesquels la température journalière maximale dépassait le 90^{ème} percentile de la distribution de référence. Les résultats de cette étude ont montré que la mortalité était plus élevée en période de canicule que pendant des jours sans canicule (OR=1,19 ; intervalle de confiance à 95 % : 1,16-1,23) et que le risque de mortalité continuait à être plus élevé durant les trois jours suivant la fin de la vague de chaleur. Les auteurs ont également mis en évidence une augmentation du risque proportionnelle à la durée de la canicule.

Suite à la quantification des effets de la canicule de 2003 et 2006 en France, le rôle respectif de la durée et de l'intensité des phénomènes de canicule sur la mortalité des bovins a été évalué (Morignat *et al.*, 2018). L'effet propre de la canicule a été estimé de sorte à exclure celui de la température journalière. Deux définitions de la canicule, considérant des seuils différents, ont été investiguées : d'une part, des canicules qualifiées « d'intensité moyenne » définies par des périodes d'au moins deux jours consécutifs (soit un jour de canicule)

avec des températures supérieures à un seuil correspondant au 95^{ème} percentile de la distribution des températures et, d'autre part, des canicules « d'intensité forte » définies par des périodes d'au moins deux jours consécutifs avec un seuil correspondant au 99^{ème} percentile de la distribution. La variable utilisée pour modéliser l'effet de la canicule était une variable continue prenant les modalités 1,2,3,... pour respectivement les 2^{ème}, 3^{ème}, 4^{ème} jour consécutifs au-dessus du seuil. Cette variable était intégrée dans le modèle à travers un polynôme cubique et permettait ainsi de représenter l'évolution du risque de mortalité dans le temps pendant un épisode de canicule. La modélisation de la canicule « d'intensité moyenne » a mis en évidence une augmentation linéaire du risque dans toutes les classes d'âge. Cette augmentation du risque n'était cependant pas significative, sauf chez les bovins laitiers âgés de moins de sept jours et chez ceux de plus de deux ans, au-delà de six jours de canicule (Figure 2) (Morignat *et al.*, 2018). Pour une canicule « de forte intensité », une augmentation rapide du risque pendant les cinq à sept premiers jours de canicule a été constatée pour la plupart des catégories d'animaux, suivie par une diminution du risque. Cette diminution du risque après plusieurs jours de canicule peut être expliquée soit par la mise en place par les éleveurs de mesures adaptées à la situation en réaction aux premiers effets du phénomène, soit par un excès de mortalité chez les animaux les plus faibles pendant les premiers jours, suivie d'une diminution de la mortalité, la population restante étant constituée d'animaux plus résistants. Ce phénomène appelé effet « moisson » avait également été mis en évidence chez l'Homme suite à l'épisode de canicule de 2003 en France (Le Tertre *et al.*, 2006) et en Allemagne (Hertel *et al.*, 2009), ainsi qu'à la suite de l'épisode de canicule de 1995 à Chicago (Kaiser *et al.*, 2007). Le profil de risque est globalement semblable pour l'ensemble des catégories d'animaux mais présente des niveaux de risque différents entre catégories. Les bovins allaitants de zéro à sept jours sont les moins impactés avec un risque relatif de 1,1 après cinq jours de canicule alors que les bovins allaitants de huit jours à trois mois sont les plus impactés (RR=1,4 après six jours de canicule). Ces différences dans les niveaux de risque peuvent trouver des explications dans les différences de gestion des catégories d'animaux, en particulier, pour les nouveau-nés, laitiers comme allaitants, qui sont les plus fragiles mais en même temps les mieux suivis.

Dans cette même étude, les mêmes hypothèses et la même stratégie ont été utilisées pour évaluer l'effet des vagues de froid sur la mortalité bovine. Concernant les vagues de froid définies avec un seuil de température correspondant au premier percentile de la distribution des températures, le profil de risque est très différent de celui de la canicule puisque le risque augmente encore après neuf jours consécutifs pour six catégories d'animaux sur huit, avec des risques relatifs compris entre 1,1 et 1,3 à neuf jours. Pour certaines catégories d'animaux, le risque commence à augmenter de façon significative dès les premiers jours, notamment chez les nouveau-nés allaitants et laitiers, alors que pour d'autres catégories le risque ne commence à être significatif qu'après huit jours. Les vagues de froid moins intenses, définies avec un seuil de température correspondant au 5^{ème} percentile, n'étaient pas associées à une augmentation du risque dans le temps et, pour certaines catégories, ont même entraîné une diminution, parfois significative, du risque. C'est notamment le cas pour une exposition supérieure à neuf jours de froid consécutifs pour les bovins allaitants âgés de huit jours à deux ans et pour les bovins allaitants adultes avec une durée d'exposition de plus de six jours consécutifs. Les RR à neuf jours dans ces catégories sont situés entre 0,2 et 0,5. Une explication possible à cette absence d'effet, voire à cet effet protecteur, des vagues de froid d'intensité moyenne serait un assainissement des conditions dans les bâtiments, induit par le cumul de jours froids qui limite le développement de bactéries et de virus. Il s'agit de la première étude sur l'effet des vagues de froid sur la mortalité bovine, ces résultats méritent donc d'être confirmés par d'autres études.

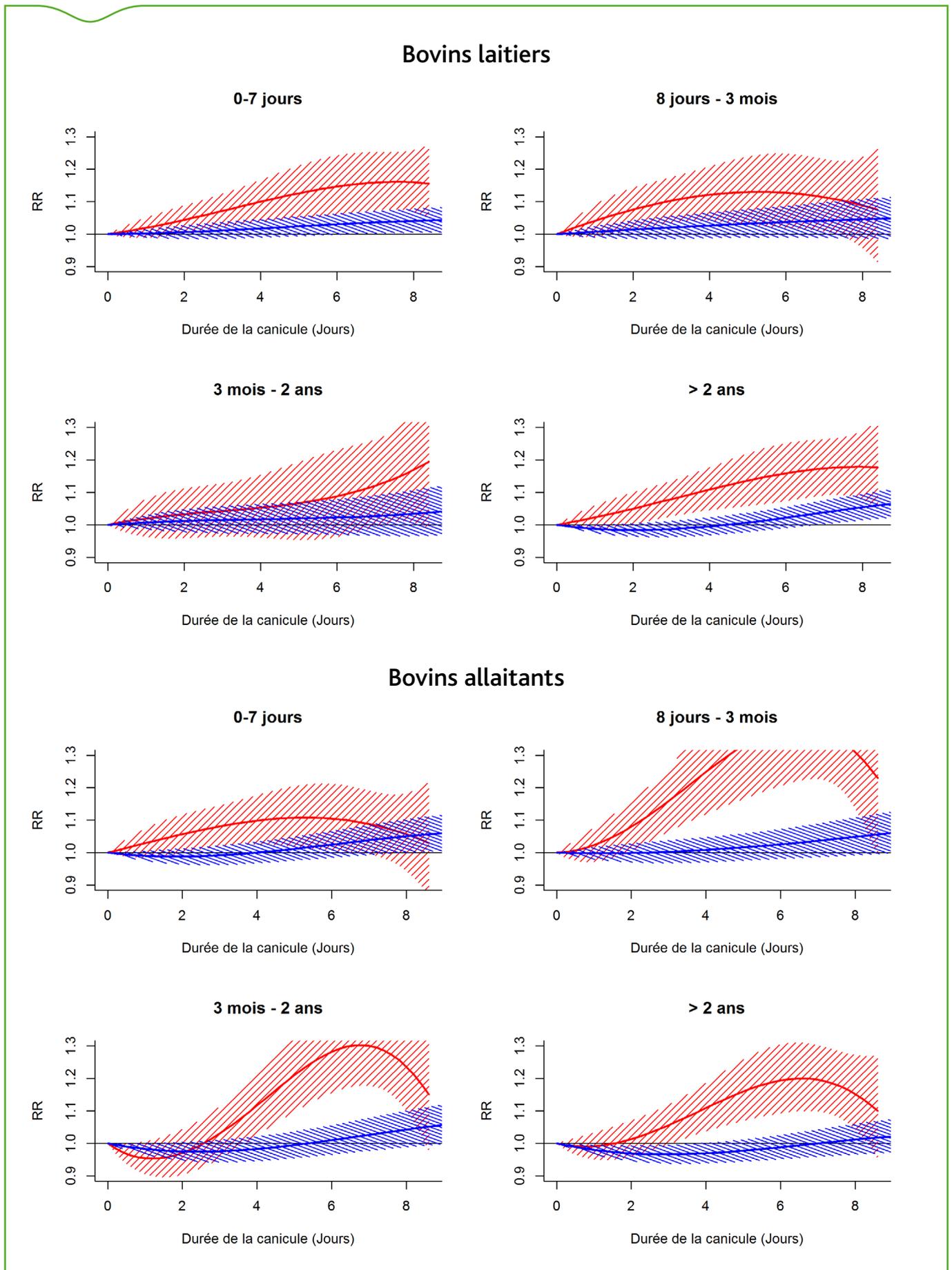


Figure 2. Relation globale entre la durée de la canicule et la mortalité bovine en France pour les bovins laitiers et allaitants (Morignat *et al.*, 2018). RR = risque relatif. En bleu, la relation pour une canicule définie par une température moyenne au-dessus du 95^{ème} percentile et en rouge, la relation définie par une température moyenne au-dessus du 99^{ème} percentile. Les surfaces hachurées représentent les intervalles de confiance à 95 % du risque relatif.

Conclusion et perspective

« L'effet de la température » recouvre différentes notions qui ont été présentés dans cet article, avec leurs effets associés sur la mortalité bovine. En dépit de différences importantes dans la conception des études, dans le choix des modèles statistiques et des indicateurs de température, les différentes études s'accordent à montrer l'effet délétère des canicules, des vagues de froid ou plus simplement de l'exposition à des températures en dehors de la zone de thermo-neutralité sur la santé des bovins. En outre, les questions du bien-être animal ou des pertes économiques pour les éleveurs justifient à elles seules l'intérêt d'une meilleure évaluation de la relation température-mortalité et de l'impact des vagues de chaleur et des vagues de froid. La caractérisation de la zone de confort pour une région donnée est d'autant plus utile que des mesures simples peuvent être mises en œuvre afin de limiter les effets d'une augmentation ou d'une diminution excessive des températures (utilisation de brumisateurs pendant l'été comme c'est le cas dans des pays chauds (Arabie Saoudite, Israël par ex., mise à disposition d'abris en périodes très chaudes ou très froides, etc.). Cette connaissance peut également intéresser d'autres corporations, à l'image des éleveurs qui ont été confrontés à des problèmes de logistique importants lors des phénomènes de mortalité non anticipés en relation avec les épisodes de canicule de 2003 et 2006 en France. Des seuils de température minimale et maximale d'alerte pourraient être déterminés afin d'anticiper l'accroissement du nombre potentiel d'animaux morts et mettre en place des mesures pour garantir une intervention rapide dans les élevages (via des aménagements des tournées de ramassage des cadavres), limitant ainsi les risques sanitaires et environnementaux.

En France, un dispositif pilote de surveillance syndromique (SSy) de la mortalité, développé dans le cadre de la Plateforme d'épidémiologie en santé animale (Plateforme ESA), est en phase de test chez les bovins, l'Observatoire de la mortalité des animaux de rente (Omar). La SSy peut être définie comme le suivi en continu d'un ou plusieurs indicateurs non spécifiques (ici la mortalité bovine) du danger surveillé. Les objectifs affichés de ce type de surveillance sont d'assurer la détection précoce d'un risque sanitaire, déjà connu ou nouveau, et/ou d'évaluer l'impact ou l'absence d'impact de ce risque sur la santé (Triple-S. Project, 2011). L'analyse consiste à modéliser des séries temporelles de la mortalité bovine et à comparer les valeurs observées aux valeurs prédites à partir de l'historique disponible. Lorsque l'écart entre les valeurs observées et les valeurs prédites est jugé suffisamment important (et ne peut être attribué à l'incertitude des valeurs prédites), une alarme statistique est émise. Des investigations sont alors menées sur le terrain afin d'identifier les causes de cette variation anormale. Ces modèles pourraient être affinés par l'intégration des connaissances sur l'effet de la température, des vagues de froid et des périodes de canicule, pour augmenter la spécificité du système.

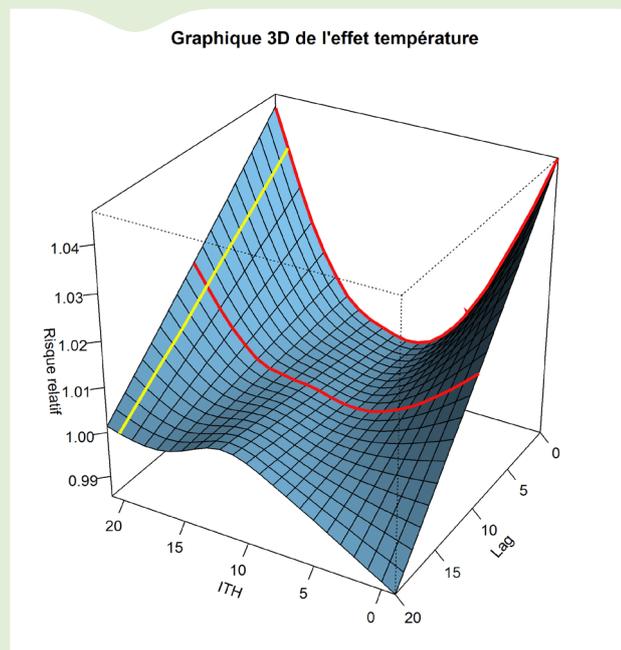
Références bibliographiques

Bishop-Williams, K.E., Berke, O., Pearl, D.L., Hand, K., Kelton, D.F., 2015. "Heat stress related dairy cow mortality during heat waves and control periods in rural Southern Ontario from 2010–2012." *BMC Vet. Res.* 11, 291.
Cox, B., Gasparrini, A., Catry, B., Delcloo, A., Bijns, E., Vangronsveld, J., Nawrot, T.S., 2016. "Mortality related to cold and heat. What do we learn from dairy cattle?" *Environ. Res.* 149, 231-238.

Encadré 1. Distributed lag non-linear models

Les modèles de la classe des "distributed lag non-linear models" permettent de modéliser le risque associé à des niveaux d'exposition à un facteur environnemental, conjointement à l'évolution de ces risques dans le temps. Cette classe de modèles est basée sur la définition d'un espace bidimensionnel de fonctions décrivant la relation simultanément dans l'espace des températures et des lags (délais en français). La figure 3a illustre le résultat d'une modélisation de la relation température-mortalité, représentée par une surface de risque. Le risque relatif est représenté sur l'axe vertical et les deux autres axes représentent, respectivement, la plage des températures (ici, l'ITH) et le délai entre le jour d'exposition et le jour où le risque est estimé (lag). Les courbes en rouge représentent, respectivement, la relation au jour de l'exposition (lag 0) et dix jours après. La courbe en jaune représente l'évolution du risque lié à une exposition à une température de 20°C au cours des 20 jours suivant l'exposition. La Figure 3b représente l'effet global de la température, obtenu par la somme des risques cumulés depuis le jour de l'exposition jusqu'au 20^{ème} jour suivant l'exposition.

a. Relation température-mortalité



b. Effet global de la relation température-mortalité

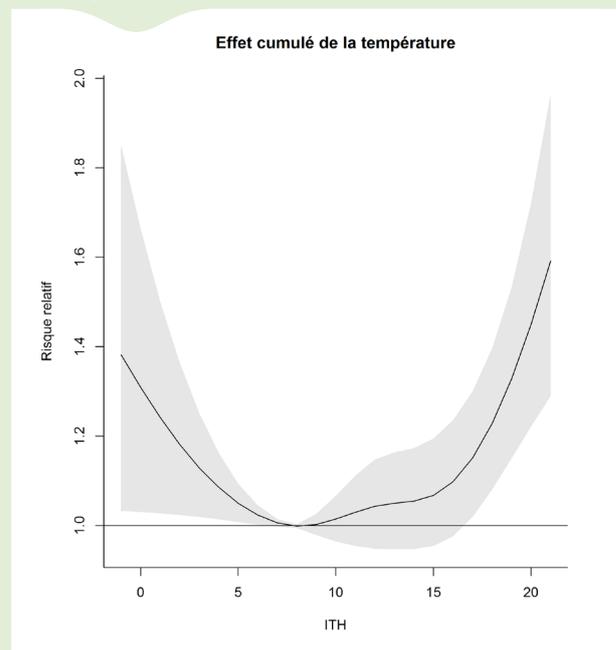


Figure 3. Risque relatif de mortalité dans la population bovine en fonction des conditions de température et d'humidité (représenté par l'ITH) et du nombre de jours depuis l'exposition (a) ou cumulé sur la période où la température un jour donné est perçue (b)

Crescio, M.I., Forastiere, F., Maurella, C., Ingravalle, F., Ru, G., 2010. "Heat-related mortality in dairy cattle: A case crossover study." *Prev. Vet. Med.* 97, 191-197.

Daniel, M., Clare, H., Sotiris, V., Chris, H., Giacomo, M., Benoit, P.G., Peter, F., Andy, B., David, W., Myles, A., 2016. "Attributing human mortality during extreme heat waves to anthropogenic climate change." *Environ. Res. Lett.* 11, 074006.

Dominici, F., Samet, J.M., Zeger, S., 2000. "Combining evidence on air pollution and daily mortality from the 20 largest US cities: a hierarchical modelling strategy." *J. R. Statist. Soc.: Series A (Statistics in Society)* 163(3), pp. 263-302.

Gasparrini, A., Armstrong, B., 2013. "Reducing and meta-analysing estimates from distributed lag non-linear models." *BMC Med. Res. Methodol.* 13.

Hahn, G.L., 1999. "Dynamic responses of cattle to thermal heat loads." *J. Anim. Sci.* 77 Suppl 2, 10-20.

Hertel, S., Le Tertre, A., Jockel, K.H., Hoffmann, B., 2009. "Quantification of the heat wave effect on cause-specific mortality in Essen, Germany." *Eur. J. Epidemiol.* 24, 407-414.

IPCC, 2012. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582.

Kaiser, R., Le Tertre, A., Schwartz, J., Gotway, C.A., Daley, W.R., Rubin, C.H., 2007. "The effect of the 1995 heat wave in Chicago on all-cause and cause-specific mortality." *Am. J. Public Health* 97 Suppl 1, S158-162.

Le Tertre, A., Lefranc, A., Eilstein, D., Declercq, C., Medina, S., Blanchard, M., Chardon, B., Fabre, P., Filleul, L., Jusot, J.F., Pascal, L., Prouvost, H., Cassadou, S., Ledrans, M., 2006. "Impact of the 2003 heatwave on all-cause mortality in 9 French cities." *Epidemiology* 17, 75-79.

Morignat, E., Gay, E., Vinard, J.-L., Calavas, D., Hénaux, V., 2017. "Temperature-mortality relationship in dairy cattle in France based on an iso-hygro-thermal partition of the territory." *Environ. Res. Lett.* 12.

Morignat, E., Gay, E., Vinard, J.-L., Sala, C., Calavas, D., Hénaux, V., 2018. "Impact of heat and cold waves on female cattle mortality beyond the effect of extreme temperatures." *J. Therm. Biol.* 78, 374-380.

Morignat, E., Gay, E., Vinard, J.L., Calavas, D., Henaux, V., 2015. "Quantifying the influence of ambient temperature on dairy and beef cattle mortality in France from a time-series analysis." *Environ. Res.* 140, 524-534.

Morignat, E., Perrin, J.B., Gay, E., Vinard, J.L., Calavas, D., Henaux, V., 2014. "Assessment of the impact of the 2003 and 2006 heat waves on cattle mortality in France." *PLoS ONE* 9, e93176.

Silanikove, N., 2000. "Effects of heat stress on the welfare of extensively managed domestic ruminants." *Livest. Prod. Sci.* 67, 1-18.

Vitali, A., Felici, A., Esposito, S., Bernabucci, U., Bertocchi, L., Maresca, C., Nardone, A., Lacetera, N., 2015. "The effect of heat waves on dairy cow mortality." *J. Dairy Sci.* 98, 4572-4579.

Vitali, A., Segnalini, M., Bertocchi, L., Bernabucci, U., Nardone, A., Lacetera, N., 2009. "Seasonal pattern of mortality and relationships between mortality and temperature-humidity index in dairy cows." *J. Dairy Sci.* 92, 3781-3790.

Encadré 2. Partitionnement spatial en zones iso-hygro-thermiques

La construction de zones iso-hygro-thermiques homogènes résulte de l'utilisation combinée d'une analyse factorielle multiple (AFM) et d'une classification ascendante hiérarchique (CAH). L'AFM permet la création d'un espace factoriel de dimension réduite par rapport à l'espace factoriel défini par les variables de départ, avec des propriétés particulièrement adaptées à l'utilisation de la CAH. La CAH permet l'agrégation de clusters deux à deux, de sorte à minimiser la variance intra-cluster et maximiser la variance inter-clusters. Cette méthode a été appliquée pour découper le territoire français en zones homogènes en termes de température et d'humidité (Morignat *et al.*, 2017). Le processus itératif a débuté avec 1300 hexagones de 11,5 km de côté, qui ont été agrégés successivement deux à deux jusqu'à obtenir un seul et unique cluster au cours de la dernière itération. Deux découpages ont été utilisés: un découpage en 100 zones de niveaux de températures et humidités homogènes au sein de chaque zone utilisé pour modéliser la relation température-mortalité et un découpage en neuf grandes régions climatiques, utilisé pour combiner les résultats des relations température-mortalité estimés sur les 100 zones.

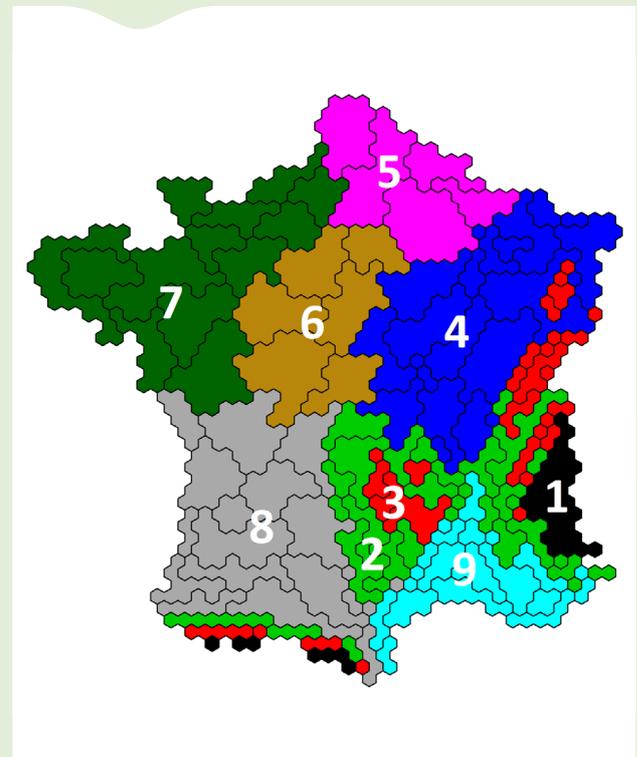


Figure 4. Découpage de la France métropolitaine en 100 clusters iso-igro-thermiques (délimité par les lignes noires) et en neuf régions climatiques (chacune caractérisée par une couleur différente) (Morignat *et al.*, 2017)

Directeur de publication: Roger Genet
Directeur associé: Patrick Dehaumont
Comité de rédaction: Didier Boisseleau, Anne Brisabois, Corinne Danan, Benoît Durand, Françoise Gauchard, Pascal Hendrikx, Paul Martin, Elisabeth Repérant, Sylvain Traynard
Rédacteur en chef: Didier Calavas
Rédactrice en chef adjointe: Anne Bronner

Éditeur scientifique: Julien Cauchard
Responsable d'édition: Fabrice Coutureau
Assistante d'édition: Céline Leterq
Anses - www.anses.fr
 14 rue Pierre et Marie Curie
 94701 Maisons-Alfort Cedex
Courriel: bulletin.epidemie@anses.fr

Conception et réalisation: Parimage
Crédits photos: Anses, Parimage
Impression: Bialec
 23 Allée des Grands Pâquis - 54180 Heillecourt
Tirage: 3 500 exemplaires
Dépôt légal à parution/ISSN 1630-8018