

Bulletin épidémiologique Santé animale - alimentation

Décembre 2018

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

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

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 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 $26^{\circ}\text{C}_{\text{ITH}}$ et d'ITH minimal⁽²⁾ de $21^{\circ}\text{C}_{\text{ITH}}$ (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 $21^{\circ}\text{C}_{\text{ITH}}$ (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 entre 15 et $20^{\circ}\text{C}_{\text{ITH}}$ sauf pour les bovins laitiers de huit jours à trois mois qui ont une zone de thermo-neutralité plus large, entre 10

et $17^{\circ}\text{C}_{\text{ITH}}$ et pour les bovins laitiers de plus de deux ans entre 5 et $17^{\circ}\text{C}_{\text{ITH}}$. 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 $-7^{\circ}\text{C}_{\text{ITH}}$ (la moyenne nationale des températures minimales) et à $25^{\circ}\text{C}_{\text{ITH}}$ (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 thermoneutralité.

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

(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.

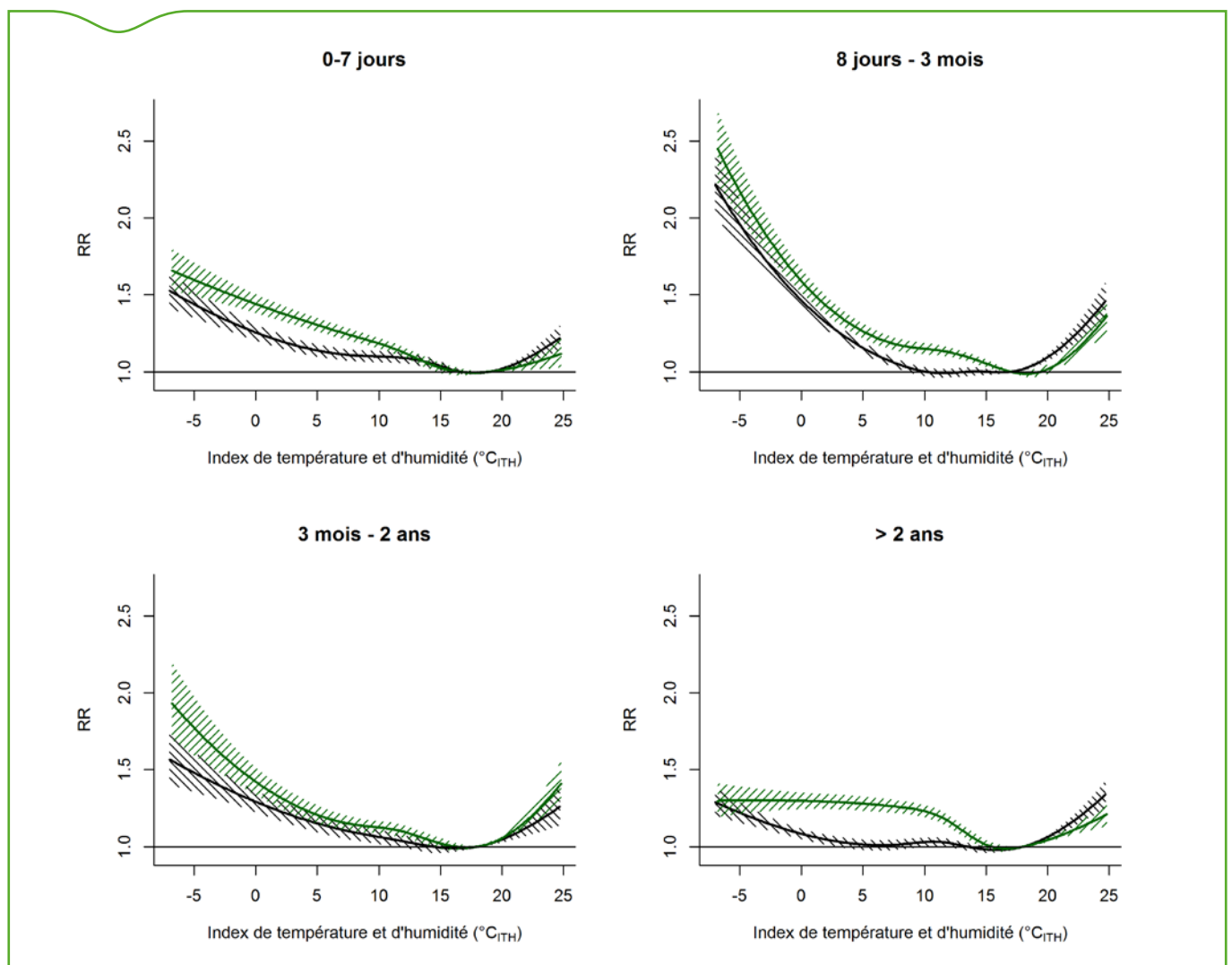


Figure 1. Relation température-mortalité par classe d'âge chez les bovins laitiers (en noir) et les bovins allaitants (en vert) (Morignat *et al.*, 2018) – RR = risque relatif

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 vêler, puis les veaux abrités pendant les premiers jours de vie.

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

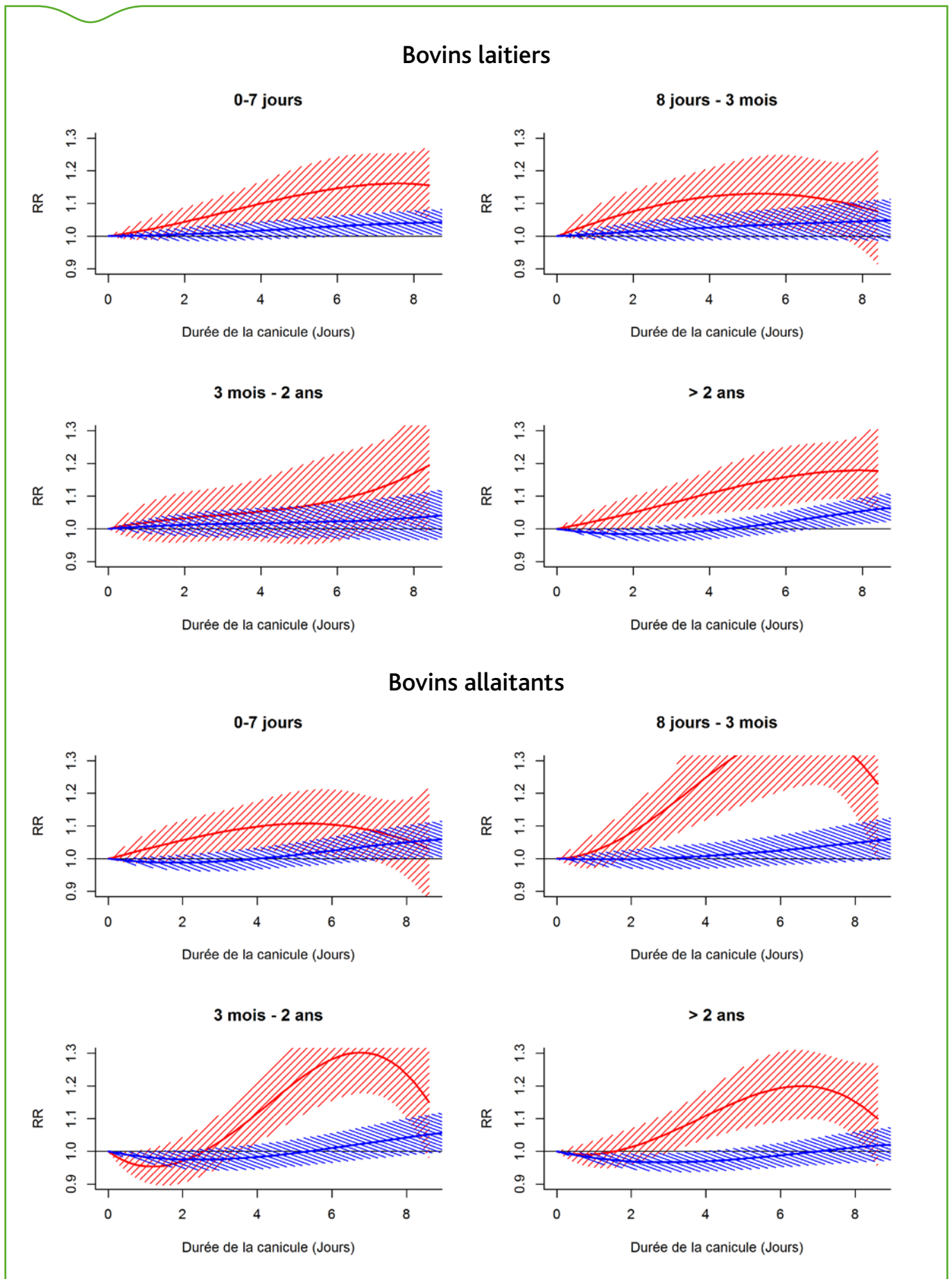


Figure 2. Relation globale entre la durée de la canicule et la mortalité bovine en France pour les bovins laitiers et allaitants (Morignat et al., 2018). RR = risque relatif. En bleu, la relation pour une canicule définie par une température moyenne au-dessus du 95^{ème} percentile et en rouge, la relation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

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.

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

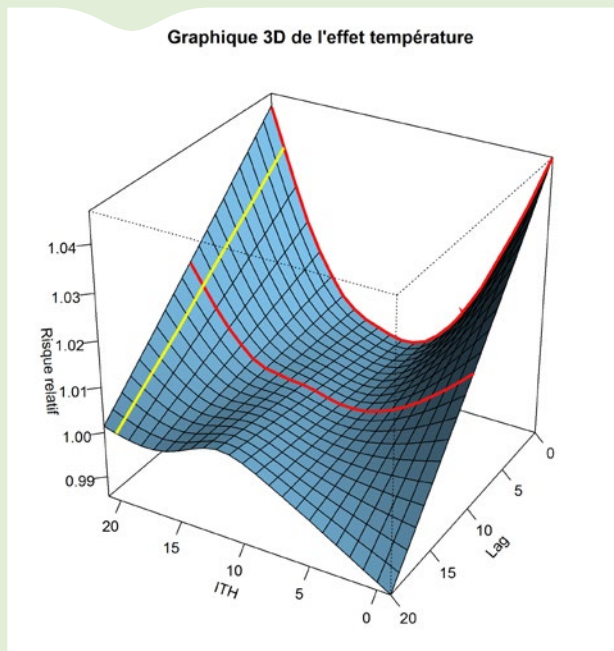
de température, les différentes études s'accordent à montrer l'effet délétère des canicules, des vagues de froid ou plus simplement de l'exposition à des températures en dehors de la zone de thermo-neutralité sur la santé des bovins. En outre, les questions du bien-être animal ou des pertes économiques 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 équarisseurs 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

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

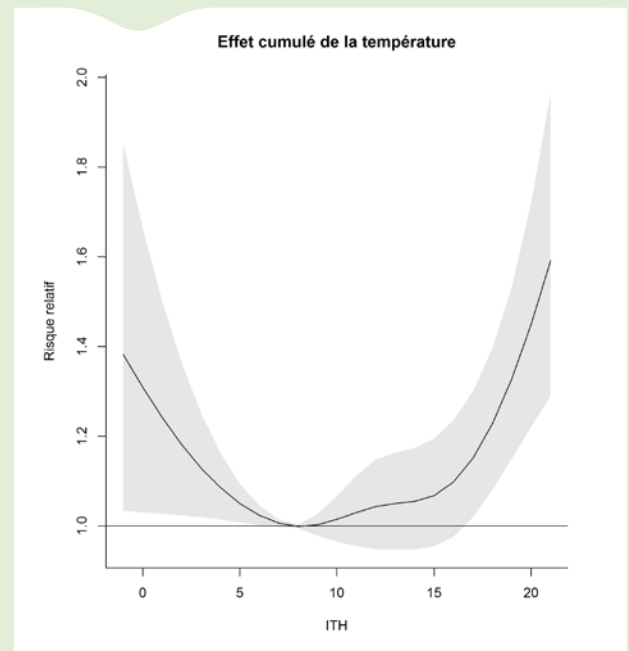


Figure 3. Risque relatif de mortalité dans la population bovine en fonction des conditions de température et d'humidité (représenté par l'ITH) et du nombre de jours depuis l'exposition (a) ou cumulé sur la période où la température un jour donné est perçue (b)

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.

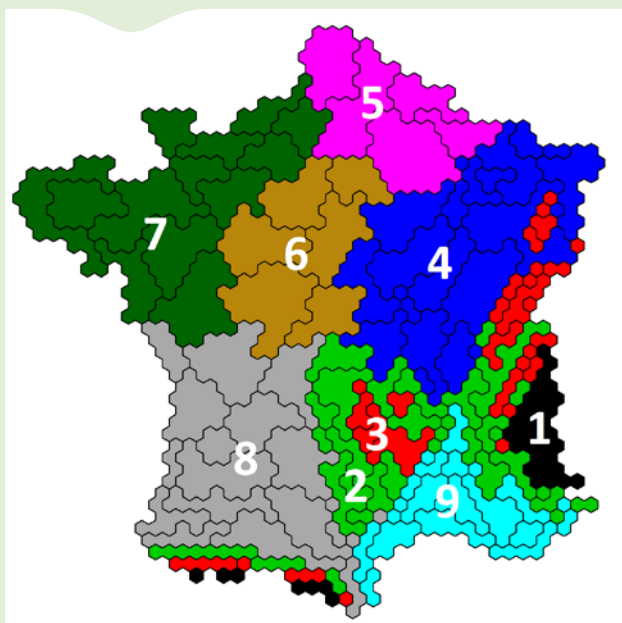


Figure 4. Découpage de la France métropolitaine en 100 clusters iso-igro-thermiques (délimité par les lignes noires) et en neuf régions climatiques (chacune caractérisée par une couleur différente) (Morignat *et al.*, 2017)

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., Delclocq, A., Bijnsens, 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.
- 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.