

Le stress thermique environnemental dans l'espèce bovine :

2. Effets physiologiques, pathologiques, comportementaux, alimentaires, immunitaires et sur la production laitière

Christian Hanzen¹ Pauline Delhez² Jean-Luc Hornick¹
Françoise Lessire¹ Djalel Eddine Gherissi³

Mots-clés

Bovin, température corporelle, stress thermique, physiologie, prise alimentaire, pathologie, comportement, mortalité du bétail, immunité

© C. Hanzen et al., 2024



<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Submitted: 05 February 2024

Accepted: 29 October 2024

Online: 10 December 2024

DOI: 10.19182/remvt.37380

Résumé

Contexte : Le stress thermique se traduit par divers effets sur la physiologie générale de l'animal. **Objectifs** : Cette revue de littérature a pour objectif de décrire les effets physiologiques, pathologiques, comportementaux, alimentaires et immunitaires du stress thermique et son impact sur la production laitière. **Méthode** : À partir de la base PubMed, elle s'est concentrée dans un premier temps sur les articles de synthèse puis a été complétée par les références des articles identifiés. **Résultats** : La température corporelle mesurée par des capteurs placés en divers endroits du corps dépend davantage du THI que de la température environnementale. Elle dépend du niveau de la production laitière, de la race et du rythme circadien. L'augmentation de la fréquence respiratoire (> 60 mouvements/min) et le halètement qui en résulte tout comme l'augmentation de la quantité d'eau ingérée et la réduction de l'ingestion alimentaire constituent les principales manifestations d'un stress thermique. Il se traduit également par une perte d'état corporel et une augmentation du pH sanguin. Il entrave le développement néonatal du fait de la réduction de l'ingestion alimentaire et de l'altération du système immunitaire. La diminution de la production laitière est une autre conséquence importante d'un stress thermique qui s'accompagne par ailleurs d'une diminution de la concentration en protéines, matière grasse et lactose du lait. Diverses altérations comportementales sont également observées : diminution de la position couchée et augmentation des stations debout, recherche d'ombre et d'eau, etc. Les effets immunitaires du stress thermique s'observent davantage avant qu'après le sevrage. Chez la vache en lactation, il entraîne une augmentation du taux cellulaire du lait et une diminution de la concentration plasmatique en cytokines et en immunoglobulines. Enfin, un stress thermique induit une augmentation de la prévalence de pathologies telles que l'acidose du rumen, l'acétonémie, les boiteries, les mammites ou encore l'infestation parasitaire. **Conclusions** : L'augmentation de la température environnementale nous invite à prendre davantage conscience de la multiplicité de ses effets directs ou indirects responsables à court, moyen et long terme et de ses conséquences économiques. L'augmentation constante des recherches conduites pour objectiver les effets observés permettront aux responsables de la santé animale de mettre en place les stratégies adéquates pour en limiter les effets.

■ Comment citer cet article : Hanzen C., Delhez P., Hornick J.L., Lessire F., Gherissi D.E., 2024. Le stress thermique environnemental dans l'espèce bovine : 2. Effets physiologiques, pathologiques, comportementaux, alimentaires, immunitaires et sur la production laitière. *Rev. Elev. Med. Vet. Pays Trop.*, 77: 37380, doi: 10.19182/remvt.37380

■ INTRODUCTION

Le changement climatique est une réalité. En témoignent les rapports alarmants régulièrement publiés par l'Organisation météorologique mondiale (OMM 2023) et par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC 2023). Ce changement induit un stress thermique à savoir l'incapacité pour l'animal à maintenir sa température corporelle dans sa zone de thermoneutralité comprise chez le bovin entre 5 et 25°C (Becker et al., 2020). Cette incapacité dépend de facteurs propres à l'animal comme son activité métabolique et physique et des facteurs d'environnement à savoir la température et le degré d'humidité de l'air, la vitesse du vent et l'intensité

1. Faculté de médecine vétérinaire, Département de gestion vétérinaire des Ressources Animales, Liège, Belgique.

2. RumeXperts, Faimet, Belgique.

3. Institut des Sciences Agronomiques et Vétérinaires, Département des Sciences Vétérinaires, Université de Souk Ahras, Souk Ahras, Algérie.

* Auteur pour la correspondance

Tél. : +32 4 366 41 50 ; email : christian.hanzen@uliege.be

des radiations solaires (Mader et al., 2006). Elle s'accompagne de multiples effets négatifs sur la capacité d'ingestion (Wheelock et al., 2010), le métabolisme (Rhoads et al., 2009), les aspects quantitatifs (West et al., 2003) et qualitatifs (Summer et al., 2019) de la production laitière, les performances de reproduction (Wolfenson et Roth, 2018), la croissance (Wang et al., 2020), le bien-être et les divers comportements de l'animal (Polsky et von Keyserlingk 2017) et la mortalité (Burhans et al., 2022). Les publications relatives au stress thermique ne cessent de se multiplier. Elles concernent les indices environnementaux de mesure du stress thermique (THI) (Thermal Humidity Index : Wang et al. 2018) mais aussi, les paramètres et les techniques de quantification des effets physiologiques, comportementaux et de performances laitières ou de croissance (Hoffmann et al. 2020).

Dans un premier article (Hanzen et al., 2024a), nous avons rappelé les données fondamentales relatives à la régulation, au stress thermique et aux méthodes qui permettent de les observer et de les quantifier. Le présent article décrit les principales conséquences d'un stress thermique sur la physiologie de l'animal, les comportements alimentaires, le développement néonatal, la capacité de production laitière ou encore les pathologies voire la survie de l'animal (figure 1). Nous avons procédé à une recherche bibliographique à partir de la base PubMed. Cette recherche a été conduite au moyen des mots-clés suivants : thermal stress, THI, fertility, milk production, animal health, metabolic disorders, immunity, cattle, behaviour. Nous avons également pris en compte les nombreux rapports et articles de synthèse sur le sujet disponibles au niveau universitaire.

Les effets sur la reproduction feront l'objet d'un article spécifique (Hanzen et al., 2024b).

■ LA TEMPERATURE CORPORELLE

Facteurs d'influence

La température rectale normale est comprise entre 38,5°C et 39,5°C chez le veau, entre 38,0°C et 39,5°C chez la génisse et entre 38,0°C et 39,0°C chez la vache adulte (Ma et Du, 2010). Chez la vache *Bos*

indicus, elle est comprise selon les races entre 38,65 et 39,05°C (Cardoso et al., 2015). Une température corporelle supérieure à 41-42°C est considérée comme léthale (Findlay, 1958).

Les facteurs physiologiques, pathologiques, alimentaires, environnementaux ou de production, susceptibles de modifier la température corporelle sont nombreux (Duff et al., 2007 ; Liang et al., 2013 ; Liu et al., 2019 ; Becker et al., 2020 ; Wijffels et al., 2020). Une modification de la température corporelle ne s'observe que 20 minutes à 5 heures après son augmentation (Brown-Bandl et al., 2005 ; Verwoerd et al., 2006 ; Mader, 2003), le seuil minimal pour qu'un tel effet apparaisse étant de 25°C (Hahn et al., 1992). La température corporelle dépend également de la production laitière (Purwanto et al., 1990). La température rectale moyenne de *Bos taurus* est supérieure à celle de *Bos indicus* ce qui en explique sa plus grande sensibilité au stress thermique (Finch, 1986). La grande capacité de régulation de la chaleur des bovins *Bos indicus* et de leurs croisements par rapport aux races *Bos taurus* est liée aux différences de métabolisme, de consommation de nourriture et d'eau, de taux de transpiration et de caractéristiques et couleurs du pelage (Blackshaw et Blackshaw, 1994). Ainsi, les bovins dont la peau est de couleur sombre réfléchissent moins de chaleur radiante que ceux dont la peau est claire (Stuart-Fox et al., 2017). Il en résulte une température rectale légèrement (0,1°C) plus élevée (Atkins et al., 2018). La température corporelle présente un rythme circadien qui selon les individus peut changer quotidiennement (Mayer et al., 2016). D'une manière générale, la température corporelle est minimale en matinée et maximale en milieu de nuit (Brown-Brandl et al., 2005). Une fluctuation diurne de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ est observée en fonction de la température ambiante, avec un pic de la température corporelle en début de soirée et un minimum en début de matinée (Liu et al., 2019). Des variations journalières comprises entre 0,2 et 0,9°C ont été documentées (Piccione et Refinetti, 2003).

Méthodes de détermination

La caractérisation des effets des multiples facteurs responsables d'une modification de la température corporelle passe par des méthodes permettant l'enregistrement en continu durant plusieurs jours de ces

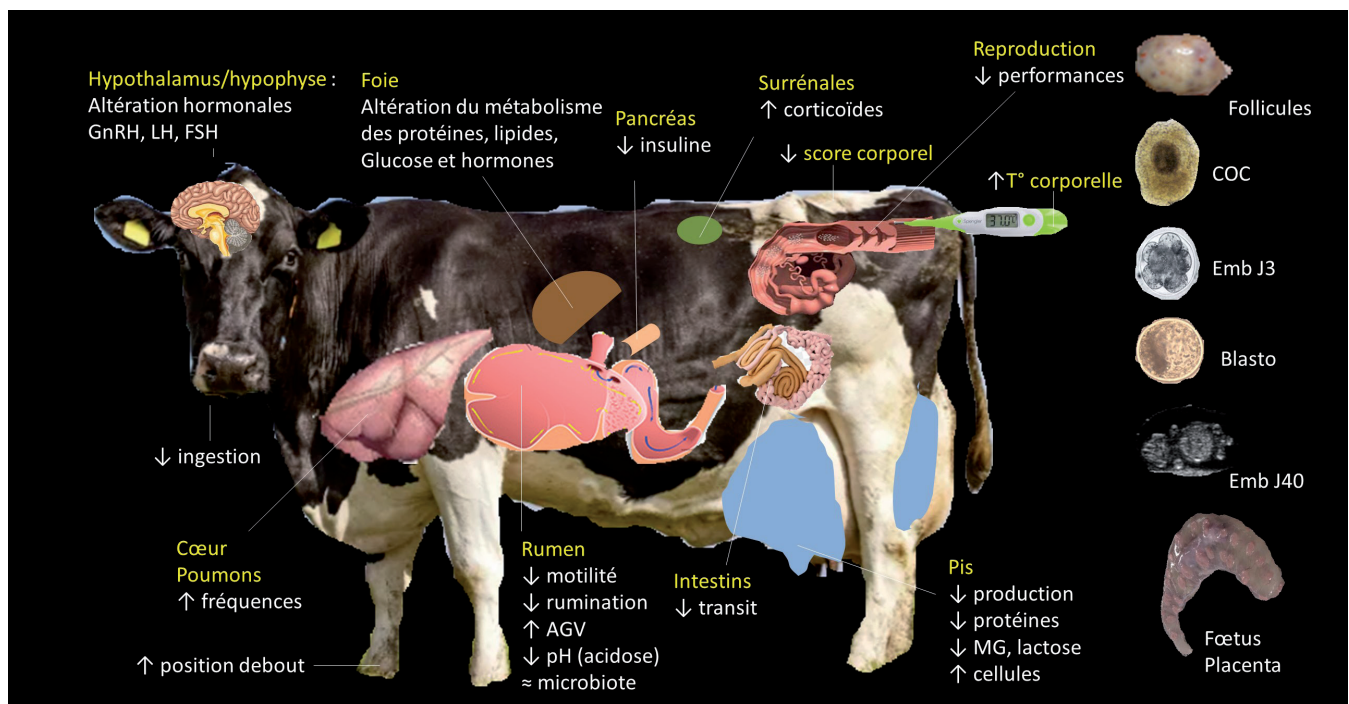


Figure 1 : Effets du stress thermique sur les diverses fonctions corporelles /// Effects of heat stress on various body functions

variations en divers endroits du corps. La technologie par infrarouge (IRT : Infrared thermometry/thermography) (Salles et al., 2016 ; Cardoso et al., 2015) utilise une caméra qui capture des images thermiques des animaux, ce qui peut fournir des informations sur leur température de surface et leur dissipation thermique (Islam et al., 2021). D'autres méthodes ont recours à des capteurs qui par radio-télémetrie transmettent les températures enregistrées. Ces capteurs sont placés au niveau des muqueuses rectale ou vaginale voire au niveau de la membrane tympanique, du réticulo-rumen, du péritoine, chaque site présentant des avantages et des inconvénients (Liang et al., 2013 ; Ammer et al., 2016b ; Koltes et al., 2018 ; Wijffels et al., 2020 ; Vázquez-Diosdado et al., 2019).

Classiquement la température corporelle est évaluée par la température rectale (Liang et al., 2013 ; Vickers et al., 2010) au moyen d'un thermomètre dont il faut cependant assurer une introduction correcte. Ainsi, la prévalence des températures rectales supérieures ou égales aux seuils de 39,5, 39,7 et 40°C sont plus fréquemment observées dans un environnement hygrométrique et de température élevée (THI >74) (46,6 %, 36,1 % et 17,1 %, respectivement) que dans un environnement normal (7,6 %, 5,3 % et 3,4 %, respectivement) (Burfeind et al., 2012).

La température vaginale est mesurée au moyen d'un thermomètre ou de capteurs insérés dans la cavité vaginale (Kendall et al., 2007 ; Burdick et al., 2012). Les températures vaginales et rectales sont étroitement corrélées ($r = 0,72-0,97$) (Kendall et al., 2007 ; Vickers et al., 2010 ; Lees et al., 2018). La température vaginale est positivement corrélée (0,3) au THI pour des valeurs de THI comprises entre 72,0 et 81,1 (Nabenishi et al., 2011). Au niveau de la membrane tympanique (Bergen et Kennedy, 2000), la température est en moyenne inférieure de 0,5°C à celle enregistrée au niveau du rectum (Hahn et al., 1990). Des capteurs thermiques peuvent également être fixés au niveau du péritoine. La température y est en moyenne supérieure de 0,2°C à 0,4°C à celle enregistrée au niveau du rectum (Gaughan et al., 2010). La voie réticulo-ruménale permet au moyen de bolus des enregistrements en continu durant plusieurs mois (Ammer et al., 2016a). Chez la vache laitière, la température du rumen est plus élevée de 0,3 et de 0,4 à 0,5°C à celles relevées respectivement au niveau du vagin et du rectum (Beatty et al., 2008 ; Ammer et al., 2016b). La température du lait est habituellement inférieure à la température du corps. Elle varie entre 39,3°C et 39,6°C pour des valeurs de THI comprises entre 72,1 et 83,6 (West et al., 2003).

L'enregistrement du rayonnement infrarouge de l'œil, du globe oculaire ou plus souvent encore de la peau fait l'objet de multiples applications en médecine vétérinaire (McManus et al., 2016 ; Church et al., 2014). Il fait appel à des caméras ou à des capteurs directement fixés sur la peau. Se pose dans le premier cas le problème de l'immobilisation de l'animal et dans le second celui de la robustesse des capteurs et de leurs effets indirects sur la peau (Wijffels et al., 2020).

Compte tenu de son interaction avec l'environnement, des différences de vascularisation et de structure des tissus sous-cutanés (Taylor et al., 2014), la température cutanée présente une plus grande variabilité que celle mesurée au niveau du rectum, du vagin, du rumen, ou de l'œil (Church et al., 2014 ; Peng et al., 2019 ; Byrne et al., 2017). La température moyenne cutanée des bovins au pelage foncé est plus élevée que celle des bovins au pelage clair (Brown-Brandl et al., 2006). La température moyenne cutanée relevée en divers endroits du corps est hautement corrélée ($r = 0,93$) avec celle de l'air mais peu ($r = 0,27$ à $0,30$) avec celle de la température rectale (Scharf et al., 2010). Les températures cutanées relevées le matin et l'après-midi sont en moyenne 1,3 à 1,9°C inférieures à celles relevées au niveau du rectum ou du vagin et sont plus variables (Kaufman et al., 2018). En général, les températures relevées en divers sites cutanés sont peu corrélées à celles de la température rectale ($r = 0,27$ à $0,35$) (Salles et al.,

2016 ; Martello et al., 2016) mais fortement corrélées à la fréquence respiratoire ($R^2 = 0,73$) (Collier et al., 2006). La température mesurée au niveau du front est bien corrélée au THI calculé mais modérément corrélée avec la température rectale (Peng et al., 2019). Le recours à des caméras thermiques et l'amélioration des programmes et modèles informatiques de traitement des données devraient contribuer à affiner les résultats observés (Jorquera-Chavez et al., 2019) et mieux apprécier la diversité des facteurs susceptibles d'influencer les mesures (Fernández-Cuevas et al., 2015).

■ LE SYSTEME CARDIORESPIRATOIRE

Données générales

La fréquence cardiaque augmente lors de courtes périodes d'exposition à une température élevée mais diminue si cette durée d'exposition augmente. L'augmentation de la fréquence cardiaque a pour effet d'augmenter la dissipation de la chaleur en améliorant la circulation du sang dans les tissus périphériques (Kadzere et al., 2002). La fréquence respiratoire est normalement inférieure à 40 par minute chez les bovins. Les auteurs s'accordent à dire qu'elle augmente sous l'effet de la température environnementale. Une valeur supérieure à 60 respirations par minute indique un stress thermique (Shultz, 1984 ; Berman et al., 1985). L'augmentation de la fréquence respiratoire s'accompagne également de modifications cliniques tel le halètement auquel il est possible d'attribuer un score (Tresoldi et al., 2018 ; Kerr, 2015 ; Gaughan et al., 2008 – tableau I). Son utilisation a permis d'objectiver la plus grande résistance au stress thermique de différentes races de *Bos indicus* par rapport à *Bos taurus* (Gaughan et al. 2010). Les effets d'un stress thermique sur la fréquence respiratoire dépendent ou non de la couleur du pelage. Ainsi, une étude réalisée au cours de trois périodes estivales successives dans des parcs d'engraissement au Nebraska a observé que les races au pelage blanc (Charolais) exposées à un stress thermique

Tableau I : Scores de halètement et fréquence respiratoire chez la vache (Kerr, 2015 ; Gaughan et al., 2008) /// Cow panting and respiratory rate scores (according to Kerr 2015 and Gaughan et al., 2008)

Score	Fréquence respiratoire (/min)	Caractéristiques
0	<40	Normal, pas de halètement, mouvements de la poitrine peu perceptibles
1	40-70	Léger halètement, bouche fermée, mouvements des côtes visibles, pas de bave visible
2	70-120	Halètement rapide, légère bave autour de la bouche, bouche fermée
2,5	70-120	Idem score 2 avec parfois une ouverture de la bouche, langue non visible
3	120-160	Bouche ouverte, cou tendu, tête relevée. Danger si durée >2 h
3,5	120-160	Idem score 3 avec langue légèrement tendue
4	>160	Bouche ouverte et langue tendue pour de longues périodes, cou tendu, tête relevée, bave abondante
4,5	Très faible ou très élevée	Idem score 4 mais tête basse, mouvements abdominaux respiratoires très visibles, absence de bave

présentent une fréquence respiratoire moindre que celles au pelage noir (Angus) (Brown-Brandl et al., 2006). À l'inverse, l'effet négatif d'un stress thermique (THI de 82) sur la fréquence respiratoire s'est avéré comparable chez des vaches Holstein dont le pelage était majoritairement de couleur blanche ou noire (Atkins et al., 2018).

Méthodes de détermination de la fréquence respiratoire

La fréquence respiratoire constitue un des meilleurs indicateurs d'un stress thermique. Elle est classiquement déterminée par l'inspection visuelle du flanc de l'animal et est exprimée en mouvements inspiratoires par minute (Brown-Brandl et al., 2005 ; Gaughan et al., 2008). Cette méthode constitue cependant un facteur limitant pour des observations de longue durée. Diverses autres méthodes ont été proposées. Le recours à des capteurs fixés sur l'animal au moyen d'une ceinture permet de procéder à des enregistrements de plus longue durée sur un plus grand nombre d'individus (Brown-Brandl et al., 2005 ; Eigenberg et al., 2000 ; Eigenberg et al., 2005 ; Atkins et al., 2018). Un système d'enregistrement au laser des mouvements du flanc a également été proposé (Pastell et al., 2007). Un capteur placé sur le nez pour enregistrer la pression et la température de l'air inspiré et expiré a démontré sa corrélation étroite avec les résultats d'une simple observation visuelle (Milan et al., 2016). L'enregistrement au moyen d'une caméra thermographique des variations de température des narines au moment de l'inspiration et de l'expiration présente une très bonne corrélation ($r = 0,87$ à $0,93$) avec les mouvements du flanc (Lowe et al., 2019 ; Jorquera-Chavez et al., 2019). Il en est de même avec un système tubulaire enregistrant au niveau des narines les différences de pression entre l'air inspiré et expiré (Strutzke et al., 2019). Un accéléromètre serait également capable de mesurer les déplacements du corps lors des mouvements respiratoires (Bar et al., 2019). Une autre approche consiste à utiliser la technologie de surveillance vidéo, où une caméra est placée dans l'enclos ou la stalle de l'animal pour capturer son schéma respiratoire (Islam et al., 2021). Le flux vidéo est ensuite analysé à l'aide d'algorithmes de vision par ordinateur pour détecter le rythme respiratoire de l'animal. Les systèmes micro-électro-mécaniques (MEMS : Micro Electro Mechanical System) peuvent également fournir des signaux respiratoires plus précis et de plus grandes résolutions spatiales avec des erreurs de mesure plus faibles (Flamenbaum, 2023). Les MEMS peuvent être utilisés pour mesurer la fréquence respiratoire en incorporant de petits capteurs dans des appareils portables qui sont placés sur le corps de l'animal. Ces capteurs peuvent détecter les changements de pression, de volume ou de température associés à la respiration et traduire ces changements en signaux électriques qui peuvent être analysés.

En raison de la multiplicité des facteurs propres ou extérieurs à l'animal susceptibles d'influencer la fréquence respiratoire, ces innovations technologiques sont cependant loin d'apporter des réponses claires à l'utilisation de ce paramètre pour évaluer les effets d'un stress thermique (Wijffels et al., 2020). Elles nécessitent un étalonnage et une validation minutieux pour garantir des lectures précises. L'alimentation électrique continue est une contrainte et le déplacement de l'appareil en raison de l'activité des animaux et de leurs interactions avec d'autres animaux est une source potentielle d'erreur.

■ L'INGESTION ALIMENTAIRE

L'ingestion des aliments solides

La réduction de l'ingestion des aliments solides est une des principales conséquences directes d'un stress thermique chez les génisses (West et al., 2003 ; Ronchi et al., 2001) et les vaches (Wilson et al., 1998). Elle s'observe au-delà de 25°C et est proportionnelle à l'augmentation de la température (Wheelock et al., 2010 ; Divekar et Dhami, 2016 ;

Hahn, 1999). Elle peut précéder (de Andrade Ferrazza et al., 2017) et suivre (Ominski et al., 2002) le stress thermique proprement dit. Une réduction de l'ingestion s'observe lorsque les valeurs du THI sont supérieures à 72 (West et al., 2003) voire 78 (Cowley et al., 2015). Une récente méta-analyse a confirmé une corrélation linéaire négative ($-0,82$ entre le THI et l'ingestion de matière sèche). La réduction serait de $0,45$ kg par unité d'augmentation de la valeur du THI au-dessus d'une valeur de 68 (ChangFungMartel et al., 2021). Elle constitue une réponse adaptative pour réduire la production d'extra-chaaleur métabolique et associée à la digestion (Abilay et al., 1975). La baisse de motilité du rumen, associée à l'augmentation de la consommation d'eau, participe à la baisse d'ingestion, qui s'accompagne également d'une diminution de la durée de rumination, d'autant plus marquée que les températures augmentent (Soriani et al., 2013 ; Moretti et al., 2017). La rumination stimulant la production de salive, celle-ci est également moins abondante et moins concentrée en substances tampon indispensables à la fonction du rumen.

La réduction de l'ingestion d'aliments solides peut dépendre de divers facteurs : La réduction de l'ingestion alimentaire dépend des races, les capacités d'adaptation des ruminants vivant en zone méditerranéenne ou tropicale étant plus importantes que celles des races exotiques importées (Silanikove, 2000 ; Morand-Fehr et Doreau, 2001 ; Maloiy et al. 2008). La sensibilité au stress thermique augmente avec l'état corporel (Mader, 2003).

Elle est également proportionnelle à la production laitière et n'est avérée que si la production journalière est en moyenne supérieure à 20 litres (Wheelock et al., 2010 ; Zimbelman et al., 2010). Cette baisse d'ingestion est plus prononcée chez des animaux nourris avec une ration composée majoritairement de fourrage, *a fortiori* grossier, et/ou d'aliments faiblement digestibles (Beede et Collier, 1986). En période de stress thermique, la vache laitière préfère ingérer des concentrés plutôt que des fourrages, la digestion de ces derniers induisant une production accrue de chaleur métabolique (Kaufman et al., 2018). Cet apport complémentaire de concentrés est une stratégie souvent adoptée par l'éleveur pour compenser la réduction d'ingestion des fourrages (Renaudeau et al., 2012). Le stress thermique peut également perturber l'absorption des nutriments le long du tractus digestif. Il réduit notamment l'expression des gènes impliqués dans la croissance des papilles du rumen (Yazdi et al., 2016).

Une réduction de l'ingestion alimentaire augmente le risque d'un bilan énergétique négatif (Collier et al., 2019), plus élevé chez les vaches à fort potentiel laitier (West, 2003, Allen et al., 2015). La mobilisation des réserves étant modifiée, il peut en résulter une diminution de la production laitière (West, 2003 ; Rhoads et al., 2009) et des performances d'engraissement (Baumgard et al., 2014). Il serait très souhaitable que les logiciels de gestion de la ration intègrent de manière plus systématique l'impact du THI sur l'ingestion alimentaire (CNCPS 2024 ; Fox et Tylutki, 1998).

L'accroissement de la température a pour effet d'augmenter la digestibilité des fourrages mais pas des concentrés. Les variations cependant observées dépendraient du temps de rétention des aliments dans le rumen et donc de sa motricité, de l'activité microbienne ou de la réduction des aliments en particules plus fines (Morand-Fehr et Doreau, 2001 ; Maloiy et al., 2008 ; Bernabucci et al., 1999).

Les besoins en eau

Un stress thermique induit une augmentation de l'ingestion d'eau, nécessaire pour compenser les pertes cutanées et respiratoires. Il en résulte une augmentation de sa quantité dans le rumen (Silanikove, 2000) et l'accélération du passage du bol alimentaire vers le système intestinal (Shalit et al., 1991). L'ingestion d'eau augmente avec la température environnementale. Entre -25 et 15°C ils sont de 3 à 5 l par

kg de matière sèche ingérée, les besoins des animaux en croissance et des vaches laitières étant 10 à 50 % supérieurs. Au-delà de 35°C, ces besoins sont compris entre 8 et 15 l par kg de matière sèche ingérée (Sullivan et Mader, 2018).

En période de stress thermique, il est essentiel que l'eau proposée aux vaches soit maintenue à une température relativement basse (10°C) (Stermer et al., 1986). En effet, une réduction de la température de l'eau entraîne une réduction de la température corporelle et de la fréquence respiratoire (Conte et al., 2018). Une telle pratique ne peut toutefois s'envisager que dans des contextes d'élevages intensifs.

■ LE DEVELOPPEMENT NEONATAL

La zone de thermoneutralité est chez les veaux comprise entre 10 et 26°C (Wathes et al., 1983, Stull et al., 2008). La température critique supérieure est comparable chez le veau et l'animal adulte mais la température critique inférieure est bien supérieure chez le veau (Hanzen et al., 2024a).

D'une manière générale, le stress thermique s'accompagne d'une réduction sensible du gain pondéral moyen des animaux en croissance (Nonaka et al., 2008 ; Broucek et al., 2009 ; Habeeb et al., 2011 ; O'Brien et al., 2010 ; Atta et al., 2014 ; Wang et al., 2020). Des différences entre races ont été observées (Marai et al., 1997 ; Hammond et al., 1998).

La réduction du gain de poids est une conséquence de celle de l'ingestion alimentaire mais aussi de la réduction de la motilité du rumen, responsable de celle du passage des digesta dans l'intestin. Elle résulte également d'une modification de la flore, les bactéries productrices d'acétate diminuant et celles produisant du butyrate augmentant (Tajima et al., 2007 ; Wang et al., 2020).

Les veaux nés de mères exposées à un stress thermique en fin de gestation ont une concentration plasmatique moindre en IgG. La cause en serait non pas une concentration colostrale moindre en IgG (Tao et al., 2012a) mais une absorption intestinale réduite (Monteiro et al., 2014). Ouellet et al. (2020) ont avancé l'hypothèse d'une fermeture prématurée des voies d'absorption des macromolécules par les entérocytes de l'intestin grêle. La réduction de la durée de gestation sous l'effet du stress thermique pourrait altérer la capacité des entérocytes à assurer l'endocytose de manière optimale (Sangild et al., 2002). D'autre part, les veaux ayant subi un stress thermique post-natal présentent plus souvent de l'hyperthermie et reçoivent davantage de traitements (Dado-Senn et al., 2020).

■ LA PRODUCTION LAITIÈRE

Aspects quantitatifs

La majorité des auteurs rapportent qu'une augmentation du THI s'accompagne d'une diminution proportionnelle de la production laitière (Spiers et al., 2004 ; West et al., 2003 ; Kadzere et al., 2002 ; Rhoads et al., 2009 ; Bouraoui et al., 2002). Des observations semblables ont été faites en Inde (Pramod et al. 2021) et en Afrique de l'Ouest (Zecchini et al. 2003).

Une augmentation de la température environnementale de 1,6, 3,2 et 8,8°C au-dessus d'une température de 21°C entraîne une diminution de la production laitière respectivement de 4,5 ; 6,8 et 14 % (Petkov, 1971). Au-delà de 32°C, la diminution peut être de 50 % (Raval et Dhami, 2005). L'impact dépend de la race et notamment du rapport entre la surface cutanée et le poids de l'animal (Liu et al., 2019).

Seuls 35 % à 50 % de la baisse de production laitière sont attribuables directement à la baisse d'ingestion constatée chez une vache en stress thermique (Rhoads et al., 2009). D'autres facteurs sont susceptibles

de contribuer à cette diminution. Citons l'augmentation des besoins d'entretien, la baisse d'absorption des nutriments, l'altération du fonctionnement du rumen, les changements métaboliques et hormonaux (Rhoads et al., 2009 ; Bernabucci et al., 2010).

Un taux d'humidité élevé, facteur objectivé par le THI, joue un rôle : lors de stress thermique, des pertes journalières comprises entre 2 et 4 kg de lait ont été avancées quand la température passe de 26 à 33°C pour un degré d'humidité de 40 % (Bernabucci et al., 2010 ; Bohmanova et al., 2007). La production laitière journalière est négativement corrélée au THI (-0,76) et diminue de 0,41 kg par unité d'augmentation du THI au-dessus de la valeur seuil de 69 (Bouraoui et al., 2002). Cette diminution de production s'observe 24 à 48 heures après une augmentation de la température environnementale (Collier et al., 1981) et après 4 jours durant lesquels le THI est supérieur à 74 (Linville et Pardue, 1992). Ces effets négatifs sur la production laitière dépendent des régions d'élevage. Ainsi une valeur moyenne journalière de THI égale à 60 a été proposée en Allemagne (Brugemann et al., 2012). En Italie, un effet négatif a été observé pour des valeurs de THI comprises entre 65 et 76 (Bernabucci et al., 2014). Ces effets dépendent par ailleurs du THI utilisé (Bohmanova et al., 2007). En race Montbéliarde, une valeur seuil du THI de 55 a été déterminée, les interactions entre la génétique et le THI étant par ailleurs faibles pour les caractères de production et de santé de la mamelle (Vinet et al., 2022).

La production laitière ne se trouve significativement diminuée en zone tempérée qu'après une période de trois jours de stress thermique (Lambertz et al., 2014) ou après une période de deux jours durant laquelle le THI est compris entre 72,1 et 83,6 (West et al., 2003).

La réduction de la production laitière s'observe également chez les vaches dont les mères ont été exposées à un stress thermique durant leur période de reproduction (Brown et al. 2016 ; Pinedo et De Vries, 2017). Exposées à un stress thermique avant leur naissance, les génisses présentent des alvéoles mammaires de taille plus réduite (Dado-Senn et al., 2020). De tels effets histologiques s'observeraient encore durant la 2^e lactation (Ouellet et al., 2020). Ils traduiraient les effets épigénétiques du stress thermique sur les gènes responsables de la prolifération, du développement et de l'apoptose des cellules mammaires (Ahmed et al., 2021 ; Almoosavi et al. 2020).

Aspects qualitatifs

Plusieurs auteurs rapportent qu'en période estivale ou lors d'augmentation du THI, on observe une diminution de la concentration en protéine, matière grasse et lactose dans le lait (Summer et al., 2019 ; Smith et al., 2013 ; Chanda et al., 2017 ; Bernabucci et al., 2002). Une teneur élevée en acide oléique (C18:1) serait le signe d'un déficit énergétique (Hammami et al. 2015). La diminution de la fraction protéique s'accompagne d'un changement de ratio des différentes caséines du lait (Cowley et al., 2015 ; Bernabucci et al., 2015). Ces modifications peuvent entraîner des perturbations dans les processus de caséification du lait (Cowley et al., 2015).

L'effet négatif du THI sur la production laitière et les constituants du lait résulte essentiellement de la réduction de l'ingestion alimentaire mais également du fait que la vascularisation est redirigée en périphérie pour contribuer à réduire la température corporelle (Bouraoui et al., 2002). Il en résulte une réduction de l'absorption des nutriments et de l'efficacité alimentaire (Wolfenson et al., 2000). Le stress thermique exerce également un effet négatif sur le développement du système canaliculaire et alvéolaire de la glande mammaire et l'expression des gènes impliqués dans la synthèse du lait (Collier et al., 2006). Il induit une réduction de la production des acides gras non estérifiés et du glucose hépatique ce qui diminue la quantité de lactose et des lipides pour la glande mammaire (Wheelock et al., 2010). Lors

de stress thermique, on constate une réduction journalière de 200 à 400 g de la synthèse de lactose par la glande mammaire (Baumgard et Rhoads, 2013), conséquence du fait que le glucose est davantage utilisé par d'autres processus tels que la thermorégulation ou l'immunité (Wheelock et al., 2010).

On constate une dégradation du point de congélation (cryoscopie) des laits en période de fortes températures. Cette situation se retrouve notamment au pâturage si la disponibilité en eau est insuffisante. Les vaches boivent une quantité d'eau très importante en arrivant au bâtiment, juste avant la traite, abaissant ainsi le point de congélation du lait (Vallée 2021).

■ LE COMPORTEMENT

Données générales

Un stress thermique entraîne une augmentation de 30 % du temps passé par l'animal en position debout. Il en résulte une augmentation de la surface disponible pour dissiper la chaleur (Cook et al., 2007 ; Herbut et al., 2021). Cette situation contribue à augmenter le risque de boiteries et donc de douleur et dans ce cas à diminuer la production laitière (Cook et Nordlund, 2009 ; Allen et al., 2015).

Les animaux recherchent plus activement les points d'abreuvement et d'ombre (Schütz et al., 2010). Ils modifient également leur comportement alimentaire en s'abreuvant davantage, en se nourrissant moins et moins fréquemment et en ruminant moins, limitant ainsi la production de chaleur liée à la fermentation ruminale et au métabolisme des nutriments.

L'augmentation de la température de l'air ambiant risque de se traduire par un allongement de plusieurs semaines de la saison de pâturage dans la plupart des pays européens (Phelan et al., 2015). Il conviendra sans doute d'adapter les populations végétales prairiales à cette évolution ainsi que les méthodes de récolte (Gauly et al., 2013). D'autre part, le comportement de pâturage est susceptible de changer en cas de stress thermique, les animaux ayant alors tendance à déplacer leur période d'alimentation – et donc de production d'extrachaleur – pendant les périodes nocturnes (Holinger et al., 2024). Si la température interne ne peut être dissipée durant la nuit, les vaches peuvent se retrouver dans un état de stress permanent (Sunagawa et al., 2015).

Des comportements de compétition entre vaches sont observés lorsque l'ombre disponible au pâturage est limitée (Schütz et al., 2010 ; Vizzotto et al., 2015). Ils s'observent également au niveau des points d'eau (McDonald et al., 2020).

Méthodes d'évaluation

Plusieurs publications ont décrit les méthodes d'étude des modifications comportementales et/ou physiologiques des effets du stress thermique (Rashamol et al., 2019 ; Islam et al., 2021 ; Becker et al., 2021).

Les modifications comportementales peuvent s'étudier au moyen d'accéléromètres (Vázquez Diosdado et al., 2015 ; Cabezas et al., 2022). Ces appareils mesurent l'accélération du mouvement d'une structure dans un espace 2D ou 3D. Ils fonctionnent en enregistrant l'accélération statique et dynamique, à l'aide de capteurs électromécaniques. Les divers comportements enregistrés tels que manger, boire, paître, ruminer, haleter, se coucher/se reposer, se tenir debout, présentent de bonnes corrélations avec des observations visuelles (Islam et al., 2021). Des accéléromètres triaxiaux ont été utilisés au pâturage pour mesurer la réaction de mouvements arrière, de pas et de coups de pied afin d'évaluer le stress et l'inconfort chez les vaches laitières (Bar et al., 2019).

Les modifications comportementales peuvent d'autre part s'observer au moyen de systèmes de localisation en temps réel (RTLS : Real-Time Location System) (Meunier et al., 2017). Ils permettent de suivre individuellement l'emplacement des animaux. Ces systèmes consistent généralement en des capteurs attachés aux étiquettes ou aux colliers d'oreille des animaux, qui transmettent les données de localisation à un système de surveillance central. Les systèmes RTLS peuvent fournir aux agriculteurs des informations précieuses sur l'emplacement, le comportement et les mouvements de leurs animaux à proximité des aliments ou de l'eau (Porto et al., 2014). Ces données de localisation peuvent être utilisées pour développer des algorithmes pour prédire les comportements alimentaires, de boisson, de couchage et de défécation (Porto et al., 2014 ; Shane et al., 2016 ; Meunier et al., 2017). De tels systèmes peuvent identifier les animaux qui passent plus de temps près de l'eau et de l'ombre et ainsi déterminer leur sensibilité à la chaleur. En outre, les systèmes RTLS peuvent aider les agriculteurs à optimiser leurs schémas de pâturage en suivant l'emplacement et les mouvements des animaux individuels. Cela peut aider à prévenir le surpâturage dans certaines zones, à réduire l'érosion des sols et à améliorer la gestion globale des pâturages.

■ L'IMMUNITÉ

La réponse immunitaire ne constitue qu'un des mécanismes d'adaptation des animaux au stress thermique. Un stress thermique se traduit également par des modifications cellulaires et moléculaires, alimentaires, morphologiques, comportementales, physiologiques, neuro-endocriniennes, biochimiques et métaboliques (Sejian et al., 2018). Nombreuses sont les synthèses consacrées aux effets du stress thermique sur l'immunité qu'elle soit innée ou acquise (Gupta et al., 2023 ; Dahl et McFadden, 2022 ; Dahl et al., 2020). Ces effets s'exercent au cours des différentes étapes du développement.

Le système immunitaire se met en place durant la période embryonnaire, se développe durant la gestation et atteint sa maturité 6 mois après la naissance (Chase et al., 2008). Les effets d'un stress thermique durant la gestation seront plus largement envisagés dans notre article relatif à ses effets sur la reproduction (Hanzen et al., 2024b).

Les veaux dont la mère a été exposée à un stress thermique en fin de gestation présentent une augmentation du risque de pathologies (diarrhée, pneumonie, omphalite) après la naissance (Yin et al., 2022) conséquences qui résulte davantage d'une altération du transfert des Igs avant le sevrage que de la concentration en Igs du colostrum (Tao et al., 2012 ; Nardone et al., 1997). L'exposition des veaux après la naissance à un stress thermique se traduit par une diminution de leur concentration en IgG1 (Kelley et al., 1982). Un stress thermique aigu induit l'activation des gènes impliqués dans la réponse immunitaire (Srikanth et al., 2017).

Les effets du stress thermique sur les génisses en croissance ont encore été peu décrits mais ne peuvent vraisemblablement pas être négligés (Gupta et al., 2023). In vitro, les réponses cellulaires à un stress thermique sont différentes chez *Bos taurus* et *Bos indicus* (Kamwanja et al., 1994). Selon différentes études, un stress thermique ne semble pas avoir des effets négatifs sur la fonction des globules blancs (Dahl et al., 2020).

Chez la vache en lactation, un stress thermique subi se traduit par une augmentation du taux cellulaire du lait et une diminution de la concentration plasmatique en cytokines et en immunoglobulines (Safa et al., 2019 ; Zeinhom et al., 2016 ; Lambert et al., 2014 ; Nasr et El-Tarabany, 2017). Un stress thermique en période de tarissement se traduit par l'augmentation de diverses protéines qui témoignent de ses effets sur le stress oxydatif et l'organisation cellulaire de la glande mammaire (Skibiél et al., 2022). Le refroidissement des vaches en

tarissement lors de stress thermique se traduit par une augmentation de leurs lymphocytes et une plus grande expression de leurs récepteurs à la prolactine (Do Amaral et al., 2010). On observe également une augmentation du risque de rétention placentaire, de mammites et d'infections utérines que le stress thermique ait été observé avant ou après la parturition (Dubois et Williams, 1980 ; Gernand et al., 2019 ; Molinari et al., 2022). Ces divers effets observés *in vivo* se trouvent indirectement confirmés par la réduction de la fonction immunitaire cellulaire *in vitro* (Lacetera et al., 2006 ; Lecchi et al., 2016).

■ LES PATHOLOGIES

Pathologies métaboliques

Le stress thermique favorise l'acidose du rumen. En effet, l'hyperventilation s'accompagne d'une perte de bicarbonate dans la salive. Il en résulte une diminution de son effet tampon au niveau du rumen (De Rensis et al., 2017). Couplée avec la baisse d'ingestion et de motilité du rumen constatées lors d'un stress thermique, cette acidification diminue la capacité de fermentation en perturbant le fonctionnement de la flore ruminale (Baumgard et al., 2014).

Malgré le fait que la capacité à mobiliser les réserves corporelles est perturbée en cas de stress thermique, les vaches en début de lactation sont également plus susceptibles de présenter de l'acétonémie. En effet, le déficit en glucose lié aux adaptations du métabolisme face à la chaleur ne permet plus au foie de dégrader correctement les graisses mobilisées, favorisant la présence de corps cétoniques dans le sang (Lacetera et al., 1996).

En favorisant l'afflux sanguin périphérique, le stress thermique réduit la perfusion intestinale. Il en résulte une augmentation du risque inflammatoire et le passage de bactéries dans le sang (Pearce et al., 2013 ; Koch et al., 2021).

Boiteries et mammites

Les vaches passent plus de temps debout afin de dissiper la chaleur ; le repos et l'alimentation sont perturbés, augmentant ainsi le risque de boiteries dans les semaines qui suivent les périodes de stress thermique (Cook et al., 2007 ; Lacetera, 2019).

Les cas de mammites cliniques sont plus fréquents en cas de stress thermique, en particulier pour les niveaux de production élevés, en milieu et en fin de lactation (Vitali et al., 2020). De nombreuses études observent des hausses du score de cellules somatiques pendant les mois d'été et pendant les périodes où le THI est élevé (Hammami et al., 2015 ; Bertocchi et al., 2014 ; Bernabucci et al., 2015 ; Gherissi et al., 2022).

Mortalités

Diverses publications font état d'une augmentation des mortalités durant les mois les plus chauds de l'année (Martin et al., 1975 ; Vitali et al., 2009 ; St Pierre et al., 2003 ; Lees et al., 2019 ; Mornat et al., 2014). La mortalité survient quand la température corporelle est comprise entre 42 et 45°C (Silanikove, 2000). Selon une étude italienne, le risque de mortalité apparaît et est maximal quand respectivement les valeurs de THI sont de 77 et 87 (Vitali et al., 2009). En Californie, la mortalité des veaux augmente lorsque les températures sont inférieures à 14°C ou supérieures à 24°C (Stull et al., 2008).

Une augmentation de la température environnementale peut avoir un effet direct sur les mécanismes régulateurs de la température corporelle et aussi indirect sur la disponibilité en eaux des animaux et sur la multiplication d'agents pathogènes infectieux ou non (Silanikove, 2000 ; Kadzere et al., 2002). Les nématodes (Morgan et al., 2013) et

les insectes responsables de la transmission du virus de la fièvre de la vallée du Rift (Rolin et al., 2013) en constituent deux exemples.

La pathogénie de la mortalité a fait récemment l'objet d'une synthèse très intéressante (Burhans et al., 2022). Le stress thermique résulte de la conjonction d'une augmentation de l'humidité environnementale et de la température qui s'ajoute à celle produite par le métabolisme de l'animal. L'animal réagit à ces modifications en abaissant la température par évaporation. Dans un premier temps, il en résulte l'apparition de diverses modifications métaboliques (modification de l'équilibre acido-basique du fait que l'évaporation s'accompagne d'une perte importante des ions K et Na), comportementales (réduction de l'ingestion pour diminuer la température métabolique, diminution de la production laitière, augmentation des stations debout, regroupement des animaux, augmentation de l'ingestion d'eau pour compenser l'eau perdue par la transpiration) et physio-pathologiques (augmentation de la fréquence respiratoire et du halètement susceptible de conduire à de l'alcalose respiratoire du fait de l'augmentation de la concentration en CO₂, augmentation de la fréquence cardiaque pour augmenter le flux sanguin au niveau cutané et ainsi favoriser la perte de chaleur par radiation mais a contrario elle diminue la perfusion du système digestif, hypersalivation, perte de salive...). L'entrée en hyperthermie de l'animal induit dans un second temps l'apparition de pathologies métaboliques (alcalose respiratoire, acidose ruminale, acidose métabolique...) et au niveau du système digestif (hypoxie, diminution de l'absorption des acides gras volatils, réduction de la rumination, stress oxydatif, nécrose...). Ces diverses conséquences entraînent une endotoxémie responsable d'un syndrome systémique inflammatoire (SIRS : systemic inflammatory response syndrome) qui se traduit par une réponse exagérée du système immunitaire induisant des lésions cellulaires. Ce syndrome s'accompagne également d'altérations vasculaires (coagulopathies, microthromboses et altérations de la perméabilité vasculaire). Ce syndrome dysfonctionnel (MODS : Multiple organ Dysfunction Syndrome) entraîne la mort de l'animal.

■ CONCLUSION

L'augmentation de la température environnementale mais surtout du THI se traduit par de multiples modifications physiologiques, voire pathologiques qui entravent directement ou indirectement le potentiel de production laitière ou de viande de la vache et augmentent le risque de mortalité. Le recours plus systématique aux divers systèmes d'enregistrement en continu des variations des paramètres physiologiques ou comportementaux des animaux devrait permettre de mieux appréhender ces conséquences et de formuler au niveau de l'élevage des recommandations appropriées pour en réduire les conséquences économiques.

Remerciements

Mes remerciements s'adressent aux collègues qui ont participé à la rédaction de cet article ainsi qu'au personnel de la *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux* qui en a assuré la correction et la mise en page.

Financement

Ce travail de synthèse n'a bénéficié d'aucune subvention spécifique de la part d'un organisme de financement du secteur public, commercial ou à but non lucratif.

Conflits d'intérêts

L'étude a été réalisée sans aucun conflit d'intérêts.

Contributions des auteurs

CH et DEG ont participé à la conception et à la rédaction du présent travail. PD, JLH, FL ont révisé le manuscrit.

Ethique de la recherche

Cet article de synthèse essentiellement basé sur la littérature scientifique et des rapports d'expertise n'a pas fait l'objet de demande spécifique auprès d'un comité d'éthique.

Accès aux données de la recherche

Les données n'ont pas été déposées dans un dépôt officiel. Les données qui étayent les résultats de l'étude sont disponibles sur demande auprès des auteurs.

Déclaration de l'utilisation de l'IA générative dans la rédaction scientifique

Les auteurs déclarent qu'ils n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

REFERENCES

- Abilay T.A., Johnson H.D., Madam M., 1975. Influence of environmental health on peripheral plasma progesterone and cortisol during the bovine oestrus cycle. *J. Dairy Sci.*, **58** (12): 1836-1840, doi: 10.3168/jds.S0022-0302(75)84795-3
- Ahmed B.M.S., Younas U., Asar T.O., Monteiro A.P.A., Hayen M.J., Tao S., Dahl G.E., 2021. Maternal heat stress reduces body and organ growth in calves: relationship to immune status. *JDS Comm.*, **2** (5): 295-299, doi: 10.3168/jdsc.2021-0098
- Allen J.D., Hall L.W., Collier R.J., Smith J.F., 2015. Effect of core body temperature, time of day, and climate conditions on behavioral patterns of lactating dairy cows experiencing mild to moderate heat stress. *J. Dairy Sci.*, **98** (1): 118-127, doi: 10.3168/jds.2013-7704
- Almoosavi S.M.M., Ghoorchi T., Naserian A.A., Ramezanpor S.S., Ghafari M.H., 2020. Long-term impacts of late-gestation maternal heat stress on growth performance, blood hormones and metabolites of newborn calves independent of maternal reduced feed intake. *Dom. Anim. Endocrinol.*, **72**: 106433, doi: 10.1016/j.domaniend.2019.106433
- Ammer S., Lambert C., Gaulty M., 2016a. Is reticular temperature a useful indicator of heat stress in dairy cattle? *J. Dairy Sci.*, **99** (12): 10067-10076, doi: 10.3168/jds.2016-11282
- Ammer S., Lambert C., Gaulty M., 2016b. Comparison of different measuring methods for body temperature in lactating cows under different climatic conditions. *J. Dairy Res.*, **83** (2): 165-172, doi: 10.1017/S0022029916000182
- Atkins I.K., Cook N.B., Mondaca M.R., Choi C.Y., 2018. Continuous respiration rate measurement of heat-stressed dairy cows and relation to environment, body temperature, and lying time. *Trans. ASABE*, **61** (5): 1475-1485, doi: 10.13031/trans.12451
- Atta M.A.A., Marai I.F.M., El-Darawany A.A.M., El-Masry K.A., 2014. The adaptability of bovine calves under a subtropical environment. *Zagazig J. Agric. Res.*, **41** (4): 793-802
- Bar D., Kaim M., Flamenbaum I., Hanochi B., Toaff-Rosenstein R.L., 2019. Technical note: Accelerometer-based recording of heavy breathing in lactating and dry cows as an automated measure of heat load. *J. Dairy Sci.*, **102** (4): 3480-3486, doi: 10.3168/jds.2018-15186
- Baumgard L.H., Abuajamieh M.K., Stoakes S.K., Sanz-Fernandez M.V., Johnson J.S., Rhoads R.P., 2014. Feeding and managing cows to minimize heat stress. In: Proc. 23rd Tri-State Dairy Nutrition Conference, Fort Wayne, Ohio State University, USA, April 14-16, pp. 61-74
- Baumgard L.H., Rhoads R.P., 2013. Effects of heat stress on postabsorptive metabolism and energetics. *Annu. Rev. Anim. Biosci.*, **1**: 311-337, doi: 10.1146/annurev-animal-031412-103644
- Beatty D.T., Barnes A., Taylor E., Maloney S.K., 2008. Do changes in feed intake or ambient temperature cause changes in cattle rumen temperature relative to core temperature? *J. Thermal Biol.*, **33** (1): 12-19, doi: 10.1016/j.jtherbio.2007.09.002
- Becker C.A., Collier R.J., Stone A.E., 2020. Invited review: Physiological and behavioral effects of heat stress in dairy cows. *J. Dairy Sci.*, **103** (8): 6751-6770, doi: 10.3168/jds.2019-17929
- Becker C.A., Aghalari A., Marufuzzaman M., Stone A.E., 2021. Predicting dairy cattle heat stress using machine learning techniques. *J. Dairy Sci.*, **104** (1): 501-524, doi: 10.3168/jds.2020-18653
- Beede D.K., Collier R.J., 1986. Potential Nutritional Strategies for Intensively Managed Cattle during Thermal Stress. *J. Anim. Sci.*, **62** (2): 543-554, doi: 10.2527/jas1986.622543x
- Bergen R.D., Kennedy A.D., 2000. Relationship between vaginal and tympanic membrane temperature in beef heifers. *Can. J. Anim. Sci.*, **80** (3): 515-518, doi: 10.4141/A00-033
- Berman A., Folman Y., Kaim M., Mamen M., Herz Z., Wolfenson D., Arieli A., et al. 1985. Upper critical temperatures and forced ventilation effects for high-yielding dairy cows in a subtropical climate. *J. Dairy Sci.*, **68**: 1488-1495, doi: 10.3168/jds.S0022-0302(85)80987-5
- Bernabucci U., Bani P., Ronchi B., Lacetera N., Nardone A., 1999. Influence of short- and long-term exposure to a hot environment on rumen passage rate and diet digestibility by Friesian heifers. *J. Dairy Sci.*, **82** (5): 967-973, doi: 10.3168/jds.S0022-0302(99)75316-6
- Bernabucci U., Lacetera N., Ronchi B., Nardone A., 2002. Effects of the hot season on milk protein fractions in Holstein cows. *Anim. Res.*, **51**: 25-33, doi: 10.3168/jds.2014-8788
- Bernabucci U., Lacetera N., Baumgard L.H., Rhoads R.P., Ronchi B., Nardone A., 2010. Metabolic and hormonal acclimation to heat stress in domesticated ruminants. *Animal*, **4** (7): 1167-1183, doi: 10.1017/S175173111000090X
- Bernabucci U., Biffani S., Buggiotti L., Vitali A., Lacetera N., Nardone A., 2014. The effects of heat stress in Italian Holstein dairy cattle. *J. Dairy Sci.*, **97**: 471-486, doi: 10.3168/jds.2013-6611
- Bernabucci U., Basiricò L., Morera P., Dipasquale D., Vitali A., Cappelli F.P., Calamari L., 2015. Effect of summer season on milk protein fractions in Holstein cows. *J. Dairy Sci.*, **98** (3): 1815-1827, doi: 10.3168/jds.2014-8788
- Bertocchi L., Vitali A., Lacetera N., Nardone A., Varisco G., Bernabucci U., 2014. Seasonal variations in the composition of Holstein cow's milk and temperature-humidity index relationship. *Animal*, **8** (4): 667-674, doi: 10.1017/S1751731114000032
- Blackshaw J.K., Blackshaw A.W., 1994. Heat stress in cattle and the effect of shade on production and behavior: A review. *Anim. Prod. Sci.*, **34** (2): 285-295, doi: 10.1071/EA9940285
- Bohmanova J., Misztal I., Cole J.B., 2007. Temperature-humidity indices as indicators of milk production losses due to heat stress. *J. Dairy Sci.*, **90** (4): 1947-1956, doi: 10.3168/jds.2006-513
- Bouraoui R., Lahmar M., Majdoub A., Djemali M., Belyea R., 2002. The relationship of temperature-humidity index with milk production of dairy cows in a Mediterranean climate. *Anim. Res.*, **51** (6): 479-491, doi: 10.1051/animres:2002036
- Broucek J., Kisac P., Uhrincat M., 2009. Effect of hot temperatures on the hematological parameters, health and performance of calves. *Int. J. Biometeorol.*, **53** (2): 201-208, doi: 10.1007/s00484-008-0204-1
- Brown B.M., Stallings J.W., Clay J.S., Rhoads M.L., 2016. Periconceptional heat stress of Holstein dams is associated with differences in daughter milk production during their first lactation. *PLoS One*, **11** (2), doi: 10.1371/journal.pone.0148234
- Brown-Brandt T.M., Eigenberg R.E., Nienaber J.A., Hahn G.L., 2005. Dynamic response indicators of heat stress in shaded and non-shaded feedlot cattle: Part 1: Analyses of indicators. *Biosyst. Eng.*, **90** (4): 451-462, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2004.12.006
- Brown-Brandt T.M., Nienaber J.A., Eigenberg R.A., Mader T.L., Morrow J.L., Dailey J.W., 2006. Comparison of heat tolerance of feedlot heifers of different breeds. *Livest. Sci.*, **105** (1-3): 19-26, doi: 10.1016/j.livsci.2006.04.012
- Brügemann K., Gernand E., König von Borstel U., König S., 2012. Defining and evaluating heat stress thresholds in different dairy cow production systems. *Arch. Tierz.*, **55** (1): 13-24, doi: 10.5194/aab-55-13-2012
- Burdick N.C., Carroll J.A., Dailey J.W., Randel R.D., Falkenberg S.M., Schmidt T.B., 2012. Development of a self-contained, indwelling vaginal temperature probe for use in cattle research. *J. Therm. Biol.*, **37**: 339-343, doi: 10.1016/j.jtherbio.2011.10.007
- Burfeind O., Suthar V.S., Heuwieser W., 2012. Effect of heat stress on body temperature in healthy early postpartum dairy cows. *Theriogenology*, **78** (9): 2031-2038, doi: 10.1016/j.theriogenology.2012.07.024
- Burhans W.S., Rossiter Burhans C.A., Baumgard L.H., 2022. Invited review: Lethal heat stress: The putative pathophysiology of a deadly disorder in dairy cattle. *J. Dairy Sci.*, **105** (5): 3716-3735, doi: 10.3168/jds.2021-21080
- Byrne D.T., Berry D.P., Esmonde H., McHugh N., 2017. Temporal, spatial, inter-, and intra-cow repeatability of thermal imaging. *J. Anim. Sci.*, **95** (2): 970-979, doi: 10.2527/jas2016.1005
- Cabezas J., Yubero R., Visitación B., Navarro-García J., Algar M.J., Cano E.L., Ortega F., 2022. Analysis of accelerometer and GPS Data for cattle behaviour identification and anomalous events detection. *Entropy*, **24** (3): 336, doi: 10.3390/e24030336

- Cardoso C.C., Peripolli V., Amador S.A., Brandão E.G., Esteves G.I.F., Sousa C.M.Z., França M.F.M.S., et al., 2015. Physiological and thermographic response to heat stress in zebu cattle, *Livest. Sci.*, **182**: 83-92, doi: 10.1016/j.livsci.2015.10.022
- Chanda T., Debnath G.K., Khan K.I., Rahman M.M., Chanda G.C., 2017. Impact of heat stress on milk yield and composition in early lactation of Holstein Friesian crossbred cattle. *Bangladesh J. Anim. Sci.*, **46** (3): 192-197, doi: 10.3329/bjas.v46i3.36314
- ChangFungMartel J., Harrison M.T., Brown J.N., Rawnsley R., Smith A.P., Meinke H., 2021. Negative relationship between dry matter intake and the temperaturehumidity index with increasing heat stress in cattle: a global metaanalysis. *Int. J. Biometeorol.*, **65**: 2099-2109, doi: 10.1007/s00484-021-02167-0
- Chase C.C., Hurley D.J., Reber A.J., 2008. Neonatal immune development in the calf and its impact on vaccine response. *Vet. Clin. North Am. Food Anim. Pract.*, **24** (1): 87-104, doi: 10.1016/j.cvfa.2007.11.001
- Church J.S., Hegadoren P.R., Paetkau M.J., Miller C.C., Regev-Shoshani G., Schaefer A.L., Schwartzkopf-Genswein K.S., 2014. Influence of environmental factors on infrared eye temperature measurements in cattle. *Res. Vet. Sci.*, **96** (1): 220-226, doi: 10.1016/j.rvsc.2013.11.006
- CNCPS (Cornell Net Carbohydrate and Protein System) <https://cals.cornell.edu/animal-science/outreach-extension/publications-resources-software/cncps> (accessed May 2024)
- Collier R.J., Baumgard L.H., Zimbelman R.B., Xiao Y., 2019. Heat stress: physiology of acclimation and adaptation. *Anim. Front.*, **9** (1): 12-19, doi: 10.1093/af/vfy031
- Collier R.J., Stiening C.M., Pollard B.C., VanBaale M.J., Baumgard L.H., Gentry P.C., Coussens P.M., 2006. Use of gene expression microarrays for evaluating environmental stress tolerance at the cellular level in cattle. *J. Anim. Sci.*, **84** (E Suppl 13): E1-E13, doi: 10.2527/2006.8413_supplE1x
- Collier R.J., Eley R.M., Sharma A.K., Pereira R.M., Buffington D.E., 1981. Shade management in subtropical environment for milk yield and composition in Holstein and Jersey cows. *J. Dairy Sci.*, **64**: 844-849, doi: 10.3168/jds.S0022-0302(81)82656-2
- Conte G., Ciampolini R., Cassandro M., Lasagna E., Calamari L., Bernabucci U., Abeni F., 2018. Feeding and nutrition management of heat-stressed dairy ruminants. *Ital. J. Anim. Sci.*, **17** (3): 604-620, doi: 10.1080/1828051X.2017.1404944
- Cook N.B., Mentink R.L., Bennett T.B., Burgi K., 2007. The Effect of heat stress and lameness on time budgets of lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.*, **90** (4): 1674-1682, doi: 10.3168/jds.2006-634
- Cook N.B., Nordlund K.V., 2009. The influence of the environment on dairy cow behavior, claw health and herd lameness dynamics. *Vet. J.*, **179** (3): 360-369, doi: 10.1016/j.tvjl.2007.09.016
- Cowley F.C., Barber D.G., Houlihan A.V., Poppi D.P., 2015. Immediate and residual effects of heat stress and restricted intake on milk protein and casein composition and energy metabolism. *J. Dairy Sci.*, **98** (4): 2356-2368, doi: 10.3168/jds.2014-8442
- Dado-Senn B., Laporta J., Dahl G.E., 2020. Carry over effects of late-gestational heat stress on dairy cattle progeny. *Theriogenology*, **154**: 17-23, doi: 10.1016/j.theriogenology.2020.05.012
- Dahl G.E., Tao S., Laporta J., 2020. Heat Stress Impacts Immune Status in Cows Across the Life Cycle. *Front. Vet. Sci.*, **7**: 116, doi: 10.3389/fvets.2020.00116
- Dahl G.E., McFadden T.B., 2022. *Symposium review*: Environmental effects on mammary immunity and health. *J. Dairy Sci.*, **105** (10): 8586-8589, doi: 10.3168/jds.2021-21433
- de Andrade Ferrazza R., Mogollón García H.D., Vallejo Aristizábal V.H., de Souza Nogueira C., Veríssimo C.J., Sartori J.R., Sartori R., et al., 2017. Thermoregulatory responses of Holstein cows exposed to experimentally induced heat stress. *J. Thermal Biol.*, **66**: 68-80, doi: 10.1016/j.jtherbio.2017.03.014
- Fox D.G., Tylutki T.P., 1998. Accounting for the Effects of Environment on the Nutrient Requirements of Dairy Cattle. *J. Dairy Sci.*, **81**: 3085-3095, doi: 10.3168/jds.S0022-0302(98)75873-4
- De Rensis F., Lopez-Gatius F., García-Ispuerto I., Morini G., Scaramuzzi R.J., 2017. Causes of declining fertility in dairy cows during the warm season. *Theriogenology*, **91**: 145-153, doi: 10.1016/j.theriogenology.2016.12.024
- Divekar B.S., Dhani A.J., 2016. Heat stress management in dairy bovines: An overview. *Int. J. Vet. Sci. Anim. Husband.*, **1** (3): 19-23
- Do Amaral B.C., Connor E.E., Tao S., Hayen J., Bubolz J., Dahl G.E., 2010. Heat stress abatement during the dry period influences prolactin signaling in lymphocytes. *Domest. Anim. Endocrinol.*, **38** (1): 38-45, doi: 10.1016/j.domaniend.2009.07.005
- Dubois P.R., Williams D.J., 1980. Increased incidence of retained placenta associated with heat stress in dairy cows. *Theriogenology*, **13** (2): 115-121, doi: 10.1016/0093-691X(80)90120-X
- Duff G.C., Galyean M.L., 2007. Board-invited review: Recent advances in management of highly stressed, newly received feedlot cattle. *J. Anim. Sci.*, **85** (3): 823-840, doi: 10.2527/jas.2006-501
- Eigenberg R.A., Brown-Brandl T.M., Nienaber J.A., Hahn G.L., 2005. Dynamic response indicators of heat stress in shaded and non-shaded feedlot cattle, part 2: Predictive relationships. *Biosys. Eng.*, **91** (1): 111-118, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2005.02.001
- Eigenberg R.A., Hahn G.L., Nienaber J.A., Brown-Brandl T.M., Spiers D.E., 2000. Development of a new respiration rate monitor for cattle. *Trans. ASAE*, **43** (3): 723-728, doi: 10.13031/2013.2755
- Fernández-Cuevas I., Carlos Bouzas Marins J., Arnáiz Lastras J., María Gómez Carmona P., Piñonosa Cano S., Ángel García-Concepción M., Sillero-Quintana M., 2015. Classification of factors influencing the use of infrared thermography in humans: A review. *Infrared Phys. Tech.*, **71**: 28-55, doi: 10.1016/j.infrared.2015.02.007
- Finch V.A., 1986. Body temperature in beef cattle: its control and relevance to production in the tropics. *J. Anim. Sci.*, **62** (2):531-542, doi: 10.2527/jas1986.622531x
- Findlay J.D., 1958. Physiological Reactions of Cattle to Climatic Stress. *Proc. Nutr. Soc.*, **17** (2): 186-190, doi: 10.1079/PNS19580037
- Flamenbaum I., 2023. Monitoring heat stress in dairy cows: Part 2 – automation and sensors. https://en.engormix.com/dairy-cattle/heat-stress-dairy-cattle/monitoring-heat-stress-dairy_a52598/
- Gaughan J.B., Mader T.L., Holt S.M., Lisle A., 2008. A new heat load index for feedlot cattle. *J. Anim. Sci.*, **86** (1): 226-234, doi: 10.2527/jas.2007-0305
- Gaughan J.B., Mader T.L., Holt S.M., Sullivan M.L., Hahn G.L., 2010. Assessing the heat tolerance of 17 beef cattle genotypes. *Int. J. Biometeorol.*, **54**: 617-627, doi: 10.1007/s00484-009-0233-4
- Gauly M., Bollwein H., Breves G., Brügemann K., Dänicke S., Das G., Demeler J., et al., 2013. Future consequences and challenges for dairy cow production systems arising from climate change in Central Europe – a review. *Animal*, **7** (5): 843-859, doi: 10.1017/S1751731112002352
- Gernand E., König S., Kipp C., 2019. Influence of on-farm measurements for heat stress indicators on dairy cow productivity, female fertility, and health. *J. Dairy Sci.*, **102** (7): 6660-6671, doi: 10.3168/jds.2018-16011
- Gherissi D.E., Chacha F., Lamraoui R., Messaadia F., Nouadri S.E., Bouzebda F., Bouzebda Z., 2022. Seasonal trends and milking-related factors influencing somatic cell counts in tank milks of dairy cattle in northeast Algeria. *Pak. J. Agric. Sci.*, **59** (4): 531-542
- GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), 2023. <https://climat.be/changements-climatiques/changements-observees/rapports-du-giec/2023-rapport-de-synthese>
- Gupta S., Sharma A., Joy A., Dunshea F.R., Chauhan S.S., 2023. The Impact of Heat Stress on Immune Status of Dairy Cattle and Strategies to Ameliorate the Negative Effects. *Animals*, **13** (1): 107, doi: 10.3390/ani13010107
- Habeeb A.A.M., Gad A.E., El-Tarabany A.A., 2011. Effect of two climatic conditions and types of feeding on body weight gain and some physiological and biochemical parameters in crossing calves. *Zagazig Vet. J.*, **39** (3): 34-48
- Hahn G.L., 1999. Dynamic responses of cattle to thermal heat loads dynamic responses of cattle to thermal heat loads. *J. Anim. Sci.*, **77** (Suppl 2): 10-20, doi: 10.2527/1997.77suppl_210x
- Hahn G.L., Chen Y.R., Nienaber J.A., Eigenberg R.A., Parkhurst A.M., 1992. Characterizing animal stress through fractal analysis of thermoregulatory responses. *J. Thermal Biol.*, **17** (2): 115-120, doi: 10.1016/0306-4565(92)90008-4
- Hahn G.L., Eigenberg R.A., Nienaber J.A., Littledike E.T., 1990. Measuring physiological responses of animals to environmental stressors using a microcomputer-based portable datalogger. *J. Anim. Sci.*, **68** (9): 2658-2665, doi: 10.2527/1990.6892658x
- Hammami H., Vandenplas J., Vanrobays M.-L., Rekik B., Bastin C., Gengler N., 2015. Genetic analysis of heat stress effects on yield traits, udder health and fatty acids of Walloon Holstein cows. *J. Dairy Sci.*, **98** (7): 4956-4968, doi: 10.3168/jds.2014-9148
- Hammond A.C., Chase C.C., Bowers E.J., Olson T.A., Randel R.D. 1998. Heat Tolerance in Tuli-, Senepol-, and Brahman-Sired F1 Angus Heifers in Florida. *J. Anim. Sci.*, **76** (6): 1568-1577, doi: 10.2527/1998.7661568x
- Hanzen C., Delhez P., Hornick J.L., Gherissi D.E., 2025. Le stress thermique environnemental dans l'espèce bovine : 3. Effets sur la reproduction, *Rev. Elev. Med. Vet. Pays Trop.*, **78**: 37381, doi: 10.19182/remvt.37381

- Hanzen C., Delhez P., Knapp E., Hornick J.L., Gherissi D.E., 2024. Le stress thermique environnemental dans l'espèce bovine : 1. Caractéristiques générales et méthodes d'évaluation. *Rev. Elev. Med. Vet. Pays Trop.*, **77**: 37379, doi: 10.19182/remvt.37379
- Herbut P., Hoffmann G., Angrecka S., Godyń D., 2021. The effects of heat stress on the behaviour of dairy cows – a review. *Ann. Anim. Sci.*, **21** (2): 385-402, doi: 10.2478/aoas-2020-0116
- Hoffmann G., Herbut P., Pinto S., Heinicke J., Kuhla B., Amon T., 2020. Animal-related, non-invasive indicators for determining heat stress in dairy cows. *Biosyst. Eng.*, **199**: 83-96, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2019.10.017
- Holinger M., Bühl V., Helbing M., Pieper L., Kürmann S., Pontiggia A., Dohme-Meier F., et al., 2024. Behavioural changes to moderate heat load in grazing dairy cows under on-farm conditions. *Livest. Sci.* **279**: 105376, doi: 10.1016/j.livsci.2023.105376
- Islam M.A., Lomax S., Doughty A., Islam M.R., Jay O., Thomson P., Clark C., 2021. Automated Monitoring of Cattle Heat Stress and Its Mitigation. *Front. Anim. Sci.*, **2**: 737213, doi: 10.3389/fanim.2021.737213
- Jorquera-Chavez M., Fuentes S., Dunshea F.R., Warner R.D., Poblete T., Jongman E.C., 2019. Modelling and validation of computer vision techniques to assess heart rate, eye temperature, ear-base temperature and respiration rate in cattle. *Animals*, **9** (12): 1089, doi: 10.3390/ani9121089
- Kadzere C.T., Murphy M.R., Silanikove N., Maltz E., 2002. Heat stress in lactating dairy cows: A review. *Livest. Prod. Sci.*, **77** (1): 59-91, doi: 10.1016/S0301-6226(01)00330-X
- Kamwanja L.A., Chase C.C. Jr, Gutierrez J.A., Guerriero V. Jr, Olson T.A., Hammond A.C., Hansen P.J., 1994. Responses of bovine lymphocytes to heat shock as modified by breed and antioxidant status. *J. Anim. Sci.*, **72** (2): 438-44, doi: 10.2527/1994.722438x
- Kaufman J.D., Saxton A.M., Riús A.G., 2018. Short communication: Relationships among temperature-humidity index with rectal, udder surface, and vaginal temperatures in lactating dairy cows experiencing heat stress. *J. Dairy Sci.*, **101** (7): 6424-6429, doi: 10.3168/jds.2017-13799
- Kelley K.W., Osborne C.A., Evermann J.F., Parish S.M., Gaskins C.T., 1982. Effects of chronic heat and cold stressors on plasma immunoglobulin and mitogen-induced blastogenesis in calves. *J. Dairy Sci.*, **65**: 1514-1528, doi: 10.3168/jds.S0022-0302(82)82376-X
- Kendall P.E., Verkerk G.A., Webster J.R., Tucker C.B., 2007. Sprinklers and shade cool cows and reduce insect-avoidance behavior in pasture-based dairy systems. *J. Dairy Sci.*, **90** (8): 3671-3680, doi: 10.3168/jds.2006-766
- Kerr S., 2015. Livestock Heat Stress: Recognition, Response, and Prevention. Washington State University, Washington, USA, 10 p. <https://hdl.handle.net/2376/5277>
- Koch F., Albrecht D., Görs S., Kuhla B., 2021. Jejunal mucosa proteomics unravel metabolic adaptive processes to mild chronic heat stress in dairy cows. *Sci Rep.*, **11**: 12484, doi: 10.1038/s41598-021-92053-x
- Koltes J.E., Koltes D.A., Mote B.E., Tucker J., Hubbell D.S., 2018. Automated collection of heat stress data in livestock: new technologies and opportunities. *Transl. Anim. Sci.*, **2** (3): 319-323, doi: 10.1093/tas/txy061
- Lacetera N., Bernabucci U., Scalia D., Basiricò L., Morera P., Nardone A., 2006. Heat stress elicits different responses in peripheral blood mononuclear cells from brown swiss and holstein cows. *J. Dairy Sci.*, **89** (12): 4606-4612, doi: 10.3168/jds.S0022-0302(06)72510-3
- Lacetera N., 2019. Impact of climate change on animal health and welfare. *Anim. Front.*, **9** (1): 26-31, doi: 10.1093/af/vfy030
- Lacetera N., Bernabucci U., Ronchi B., Nardone A., 1996. Body condition score, metabolic status and milk production of early lactating dairy cows exposed to warm environment. *Riv. Agric. Subtrop. Trop.* **90**: 43-55
- Lambertz C., Sanker C., Gauly M., 2014. Climatic effects on milk production traits and somatic cell score in lactating Holstein-Friesian cows in different housing systems. *J. Dairy Sci.*, **97** (1): 319-329, doi: 10.3168/jds.2013-7217
- Lecchi C., Rota N., Vitali A., Ceciliani F., Lacetera N., 2016. In vitro assessment of the effects of temperature on phagocytosis, reactive oxygen species production and apoptosis in bovine polymorphonuclear cells. *Vet Immunol Immunopathol.*, **182**: 89-94, doi: 10.1016/j.vetimm.2016.10.007
- Lees J.C., Lees A.M., Gaughan J.B., 2018. Developing a heat load index for lactating dairy cows. *Anim. Prod. Sci.*, **58** (8): 1387-1391, doi: 10.1071/AN17776
- Lees A.M., Sejian V., Wallage A.L., Steel C.C., Mader T.L., Lees J.C., Gaughan J.B., 2019. The Impact of Heat Load on Cattle. *Animals*, **9** (6): 322, doi: 10.3390/ani9060322
- Liang D., Wood C.L., McQuerry K.J., Ray D.L., Clark J.D., Bewley J.M., 2013. Influence of breed, milk production, season, and ambient temperature on dairy cow reticulorumen temperature. *J. Dairy Sci.*, **96** (8): 5072-5081, doi: 10.3168/jds.2012-6537
- Linville D.E., Pardue F.E., 1992. Heat stress and milk production in the South Carolina coastal plains. *J. Dairy Sci.*, **75** (9): 2598-2604, doi:10.3168/jds.S0022-0302(92)78022-9
- Liu B., Martre P., Ewert F., Porter J.R., Challinor A.J., Müller C., Ruane A.C., et al., 2019. Global wheat production with 1.5 and 2.0°C above pre-industrial warming. *Glob. Change Biol.*, **25** (4): 1428-1444, doi: 10.1111/gcb.14542
- Lowe G., Sutherland M., Waas J., Schaefer A., Cox N., Stewart M., 2019. Infrared thermography – a non-invasive method of measuring respiration rate in calves. *Animals*, **9** (8): 535, doi: 10.3390/ani9080535
- Ma Y.L., Du W.K., 2010. Relationship between body temperature and disease of cattle. *Shangdong J. Anim. Sci. Vet. Med.*, **31**: 91-92
- Mader T.L., 2003. Environmental stress in confined beef cattle. *J. Anim. Sci.*, **81E** (Suppl. 2): E110-E119, doi: 10.2527/2003.8114_SUPPL_2E110X
- Mader T.L., Davis M.S., Brown-Brandl T., 2006. Environmental factors influencing heat stress in feedlot cattle. *J. Anim. Sci.*, **84** (3): 712-719, doi: 10.2527/2006.843712x
- Maloij G.M.O., Kanui T.I., Towett P.K., Wambugu S.N., Miaron J.O., Wan-yoike M.M., 2008. Effects of dehydration and heat stress on food intake and dry matter digestibility in East African ruminants. *Comp. Biochem. Physiol.*, **151** (2): 185-190, doi: 10.1016/j.cbpa.2008.06.019
- Marai I.F.M., Habeeb A.A., Daader A.H., Yousef H.M., 1997. Effects of diet supplementation and body cooling on Friesian calves reared in high ambient temperatures in the Eastern desert of Egypt. *Trop. Anim. Health Prod.*, **29** (4): 201-208, doi: 10.1007/BF02632305
- Martello L.S., Silva S.L., Gomes R.C., Corte R.R.P.S., Leme P.R., 2016. Infrared thermography as a tool to evaluate body surface temperature and its relationship with feed efficiency in *Bos indicus* cattle in tropical conditions. *Int. J. Biometeorol.*, **60**: 173-181, doi: 10.1007/s00484-015-1015-9
- Martin S.W., Schwabe C.W., Franti C.E., 1975. Dairy calf mortality rate: The association of daily meteorological factors and calf mortality. *Can. J. Comp. Med.*, **39** (4): 377-388, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC1277482/>
- Mayer J.J., Davis J.D., Purswell J.L., Koury E.J., Younan N.H., Larson J.E., Brown-Brandl T.M., 2016. Development and characterization of a continuous tympanic temperature logging (CTTL) probe for bovine animals. *Trans. ASABE*, **59** (2): 703-714, doi: 10.13031/trans.59.11367
- McDonald P.V., von Keyserlingk M.A.G., Weary D.M., 2020. Hot weather increases competition between dairy cows at the drinker. *J. Dairy Sci.*, **103** (4): 3447-3458, doi: 10.3168/jds.2019-17456
- McManus C., Tanure C.B., Peripolli V., Seixas L., Fischer V., Gabbi A.M., Menegassi S.R.O., et al., 2016. Infrared thermography in animal production: An overview. *Comput. Electron. Agric.*, **123**: 10-16, doi: 10.1016/j.compag.2016.01.027
- Meunier B., Delval E., Cirié C., Mialon M.M., Pradel P., Gaudron Y., Ledoux D., et al., 2017. Automated measurement of dairy cow grooming behaviour from real-time location system. In: Proc. of the 8th Europ. Conf. Precision Livestock Farming, Nantes, France, 12-14 Sept. 2017, 77-83, <https://hal.inrae.fr/hal-02738160>
- Milan H.F.M., Maia A.S.C., Gebremedhin K.G., 2016. Technical note: Device for measuring respiration rate of cattle under field conditions. *J. Anim. Sci.*, **94** (12): 5434-5438, doi: 10.2527/jas.2016-0904
- Molinari P.C.C., Dahl G.E., Sheldon I.M., Bromfield J.J., 2022. Effect of calving season on metritis incidence and bacterial content of the vagina in dairy cows. *Theriogenology*, **191**: 67-76, doi: 10.1016/j.theriogenology.2022.08.001
- Monteiro A.P.A., Tao S., Thompson I.M., Dahl G.E., 2014. Effect of heat stress during late gestation on immune function and growth performance of calves: isolation of altered colostral and calf factors. *J. Dairy Sci.*, **97** (10): 6426-6439, doi: 10.3168/jds.2013-7891
- Morand-Fehr P., Doreau M., 2001. Ingestion et digestion chez les ruminants soumis à un stress de chaleur. *INRA Prod. Anim.*, **14** (1): 15-27, doi: 10.20870/productions-animales.2001.14.1.3722
- Moretti R., Biffani S., Chessa S., Bozzi R., 2017. Heat stress effects on Holstein dairy cows' rumination. *Animal*, **11** (12): 2320-2325, doi: 10.1017/S1751731117001173
- Morgan E.R., Charlier J., Hendrickx G., Biggeri A., Catalan D., Samson-Himmelstjerna G. von, 2013. Global change and helminth infections in grazing ruminants in Europe: impacts, trends and sustainable solutions. *Agriculture*, **3** (3): 484-502, doi: 10.3390/agriculture3030484

- Morignat E., Perrin J.-B., Gay E., Vinard J.-L., Calavas D., Hénaux V., 2014. Assessment of the Impact of the 2003 and 2006 Heat Waves on Cattle Mortality in France. *PLoS ONE*, **9** (3): e93176, doi:10.1371/journal.pone.0093176
- Nabenishi H., Ohta H., Nishimoto T., Morita T., Ashizawa K., Tsuzuki Y., 2011. Effect of the Temperature-humidity index on body temperature and conception rate of lactating dairy cows in southwestern Japan. *J. Reprod. Dev.*, **57** (4): 450-456, doi: 10.1262/jrd.10-135T
- Nardone A., Lacetera N., Bernabucci U., Ronchi B., 1997. Composition of Colostrum from Dairy Heifers Exposed to High Air Temperatures During Late Pregnancy and the Early Postpartum Period. *J. Dairy Sci.*, **80**: 838-844, doi: 10.3168/jds.S0022-0302(97)76005-3
- Nasr M.A., El-Tarabany M.S., 2017. Impact of three THI levels on somatic cell count, milk yield and composition of multiparous Holstein cows in a subtropical region. *J. Therm. Biol.*, **64**: 73-77, doi: 10.1016/j.jtherbio.2017.01.004
- Nonaka I., Takusari N., Tajima K., Suzuki T., Higuchi K., Kurihara M., 2008. Effects of high environmental temperatures on physiological and nutritional status of prepubertal Holstein heifers. *Livest. Sci.*, **113** (1): 14-23, doi: 10.1016/j.livsci.2007.02.010
- O'Brien M.D., Rhoads R.P., Sanders S.R., Duff G.C., Baumgard L.H., 2010. Metabolic adaptations to heat stress in growing cattle. *Domest. Anim. Endocrinol.*, **38** (2): 86-94, doi: 10.1016/j.domaniend.2009.08.005
- Ominski K.H., Kennedy A.D., Wittenberg K.M., Moshtaghi Nia S.A., 2002. Physiological and production responses to feeding schedule in lactating dairy cows exposed to short-term, moderate heat stress. *J. Dairy Sci.*, **85**: 730-737, doi: 10.3168/jds.S0022-0302(02)74130-1
- OMM (Organisation Météorologique mondiale), 2023. <https://wmo.int/fr/news/media-centre/les-indicateurs-du-changement-climatique-ont-atteint-des-niveaux-record-en-2023-omm>
- Ouellett V., Laporta J., Dahl G.E., 2020. Late gestation heat stress in dairy cows: Effects on dam and daughter. *Theriogenology*, **150**: 471-479, doi: 10.1016/j.theriogenology.2020.03.011
- Pastell M., Kaihilahti J., Aisla A.-M., Hautala M., Poikalainen V., Ahokas J., 2007. A system for contact-free measurement of respiration rate of dairy cows. In: Proc. S. Cox (Ed.), Precision Livestock Farming 07, Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands, pp. 105-109, doi: 10.3920/978-90-8686-604-5
- Pearce S.C., Mani V., Weber T.E., Rhoads R.P., Patience J.F., Baumgard L.H., Gabler N.K., 2013. Heat stress and reduced plane of nutrition decreases intestinal integrity and function in pigs. *J. Anim. Sci.*, **91** (11): 5183-5193, doi: 10.2527/jas.2013-6759
- Peng D., Chen S., Li G., Chen J., Wang J., Gu X., 2019. Infrared thermography measured body surface temperature and its relationship with rectal temperature in dairy cows under different temperature-humidity indexes. *Int. J. Biometeorol.*, **63**: 327-336, doi: 10.1007/s00484-018-01666-x
- Petkov G., 1971. Environmental milk production of cows. *Vet. Shirkha*, **75**: 23-28
- Phelan P., Morgan E.R., Rose H., Grants J., O'Kiel P., 2015. Predictions of future grazing season length for European dairy, beef and sheep farms based on regression with bioclimatic variables. *J. Agric. Sci.*, **154** (5): 765-781, doi: 10.1017/S0021859615000830
- Piccione G., Refinetti R., 2003. Thermal chronobiology of domestic animals. *Front. Biosci.*, **8** (6): S258-S264, doi: 10.2741/1040
- Pinedo P.J., De Vries A., 2017. Season of conception is associated with future survival, fertility, and milk yield of Holstein cows. *J. Dairy Sci.*, **100** (8): 6631-6639, doi: 10.3168/jds.2017-12662
- Polsky L., von Keyserlingk M.A.G., 2017. *Invited review*: Effects of heat stress on dairy cattle welfare. *J. Dairy Sci.*, **100** (11): 8645-8657, doi: 10.3168/jds.2017-12651
- Porto S.M.C., Arcidiacono C., Giummarra A., Anguzza U., Cascone G., 2014. Localisation and identification performances of a real-time location system based on ultra wide band technology for monitoring and tracking dairy cow behaviour in a semi-open free-stall barn. *Comput. Electron. Agric.*, **108**: 221-229, doi: 10.1016/j.compag.2014.08.001
- Pramod S., Sahib L., Becha B., Venkatachalapathy T., 2021. Analysis of the effects of thermal stress on milk production in a humid tropical climate using linear and non-linear models. *Trop. Anim. Health Prod.*, **53**: 66, doi: 10.1007/s11250-020-02525-x
- Purwanto B.P., Abo Y., Sakamoto R., Furumoto F., Yamamoto S., 1990. Diurnal patterns of heat production and heart rate under thermoneutral conditions in Holstein Friesian cows differing in milk production. *J. Agric. Sci.*, **114** (2): 139-142, doi: 10.1017/S0021859600072117
- Rashamol V.P., Sejian V., Pragna P., Lees A.M., Bagath M., Krishnana G., Gaughan J.B., 2019. Prediction models, assessment methodologies and biotechnological tools to quantify heat stress response in ruminant livestock. *Int. J. Biometeorol.*, **63**: 1265-1281, doi: 10.1007/s00484-019-01735-9
- Raval R.J., Dhama A.J., 2005. Effect of heat stress on bovine reproduction – an overview. *Indian J. Field Vet.*, **1** (2): 1-9
- Renaudeau D., Collin A., Yahav S., De Basilio V., Gourdière J.L., Collier R.J., 2012. Adaptation to hot climate and strategies to alleviate heat stress in livestock production. *Animal*, **6** (5): 707-728, doi: 10.1017/S1751731111002448
- Rhoads M.L., Rhoads R.P., VanBaale M.J., Collier R.J., Sanders S.R., Weber W.J., Crooker B.A., et al., 2009. Effects of heat stress and plane of nutrition on lactating Holstein cows: I. Production, metabolism, and aspects of circulating somatotropin. *J. Dairy Sci.*, **92** (5): 1986-1997, doi: 10.3168/jds.2008-1641
- Rolin A.I., Berrang-Ford L., Kulkarni M.A., 2013. The risk of Rift Valley fever virus introduction and establishment in the United States and European Union. *Emerg. Microbes Infect.*, **2** (1): 1-8, doi: 10.1038/emi.2013.81
- Ronchi B., Stradaoli G., Verini Supplizi A., Bernabucci U., Lacetera N., Accorsi P.A., Nardone A., et al., 2001. Influence of heat stress or feed restriction on plasma progesterone, oestradiol-17 β , LH, FSH, prolactin and cortisol in Holstein heifers. *Livest. Prod. Sci.*, **68** (1-2): 231-241, doi: 10.1016/S0301-6226(00)00232-3
- Safa S., Kargar S., Moghaddam G.A., Ciliberti M.G., Caroprese M., 2019. Heat stress abatement during the postpartum period: Effects on whole lactation milk yield, indicators of metabolic status, inflammatory cytokines, and biomarkers of the oxidative stress. *J. Anim. Sci.*, **97** (1): 122-132, doi: 10.1093/jas/sky408
- Salles M.S., da Silva S.C., Salles F.A., Roma Jr L.C., El Faro L., Bustos MacLean P.A., Lins de Oliveira C.E., et al., 2016. Mapping the body surface temperature of cattle by infrared thermography. *J. Therm. Biol.*, **62** (Part A): 63-69, doi: 10.1016/j.jtherbio.2016.10.003
- Sangild P.T., Petersen Y.M., Schmidt M., Elnif J., Petersen T.K., Buddington R.K., et al., 2002. Preterm birth affects the intestinal response to parenteral and enteral nutrition in newborn pigs 1, 2. *J. Nutr.*, **132** (9): 2673-2681, doi: 10.1093/jn/132.9.2673
- Scharf B., Carroll J.A., Riley D.G., Chase Jr C.C., Coleman S.W., Keisler D.H., Weaver R.L., et al., 2010. Evaluation of physiological and blood serum differences in heat-tolerant (Romosinuano) and heat-susceptible (Angus) *Bos taurus* cattle during controlled heat challenge. *J. Anim. Sci.*, **88** (7): 2321-2336, doi: 10.2527/jas.2009-2551
- Schütz K.E., Rogers A.R., Poulouin Y.A., Cox N.R., Tucker C.B., 2010. The amount of shade influences the behavior and physiology of dairy cattle. *J. Dairy Sci.*, **93** (1): 125-133, doi: 10.3168/jds.2009-2416
- Sejian V., Bhatta R., Gaughan J.B., Dunshea F.R., Lacetera N., 2018. Review: adaptation of animals to heat stress. *Animal*, **12** (2): S431-S444, doi: 10.1017/S1751731118001945
- Shalit U., Maltz E., Silanikove N., Berman A., 1991. Water, sodium, potassium, and chlorine metabolism of dairy cows at the onset of lactation in hot weather. *J. Dairy Sci.*, **74**: 1874-1883, doi: 10.3168/jds.S0022-0302(91)78353-7
- Shane D.D., White B.J., Larson R.L., Amrine D.E., Kramer J.L., 2016. Probabilities of cattle participating in eating and drinking behavior when located at feeding and watering locations by a real time location system. *Comput. Electron. Agric.*, **127**: 460-466, doi: 10.1016/j.compag.2016.07.005
- Shultz T.A., 1984. Weather and shade effects on cow corral activities. *J. Dairy Sci.*, **67**: 868-873, doi: 10.3168/jds.S0022-0302(84)81379-X
- Silanikove N., 2000. Effects of heat stress on the welfare of extensively managed domestic ruminants. *Livest. Prod. Sci.*, **67** (1-2): 1-18, doi: 10.1016/S0301-6226(00)00162-7
- Skibieli A.L., Koh J., Zhu N., Zhu F., Yoo M.J., Laporta J., 2022. Carry-over effects of dry period heat stress on the mammary gland proteome and phosphoproteome in the subsequent lactation of dairy cows. *Sci. Rep.*, **12**: 6637, doi: 10.1038/s41598-022-10461-z
- Smith D.L., Smith T., Rude B.J., Ward S.H., 2013. Comparison of the effects of heat stress on milk and component yields and somatic cell score in Holstein and Jersey cows. *J. Dairy Sci.*, **96** (5): 3028-3033, doi: 10.3168/jds.2012-5737
- Soriani N., Panella G., Calamari L., 2013. Rumination time during the summer season and its relationships with metabolic conditions and milk production. *J. Dairy Sci.*, **96** (8): 5082-5094, doi: 10.3168/jds.2013-6620

- Spiers D.E., Spain J.N., Sampson J.D., Rhoads R.P., 2004. Use of physiological parameters to predict milk yield and feed intake in heat-stressed dairy cows. *J. Therm. Biol.*, **29** (7-8): 759-764, doi: 10.1016/j.jtherbio.2004.08.051
- Srikanth K., Kwon A., Lee E., Chung H., 2017. Characterization of genes and pathways that respond to heat stress in Holstein calves through transcriptome analysis. *Cell. Stress. Chaperones*, **22** (1): 29-42, doi: 10.1007/s12192-016-0739-8
- St-Pierre N.R., Cobanov B., Schnitkey G., 2003. Economic Losses from Heat Stress by US Livestock Industries. *J. Dairy Sci.*, **86** (Supplement): E52-E77, doi: 10.3168/jds.S0022-0302(03)74040-5
- Stermer R.A., Brasington C.F., Coppock C.E., Lanham J.K., Milam K.Z., 1986. Effect of drinking water temperature on heatstress of dairy cows. *J. Dairy Sci.*, **69**: 546-551, doi: 10.3168/jds.S0022-0302(86)80436-2
- Strutzke S., Fiske D., Hoffmann G., Ammon C., Heuwieser W., Amon T., 2019. Technical note: Development of a noninvasive respiration rate sensor for cattle. *J. Dairy Sci.*, **102** (1): 690-695, doi: 10.3168/jds.2018-14999
- Stuart-Fox D.L., Newton E., Clusella-Trullas S., 2017. Thermal consequences of colour and near-infrared reflectance. *Phil. Trans. R. Soc. B.*, **372**: 20160345, doi: 10.1098/rstb.2016.0345
- Stull C.L., Messam L.L.V., Collar C.A., Peterson N.G., Castillo A.R., Reed B.A., et al., 2008. Precipitation and Temperature Effects on Mortality and Lactation Parameters of Dairy Cattle in California. *J. Dairy Sci.*, **91** (12), 4579-4591, doi: 10.3168/jds.2008-1215
- Sullivan K.F., Mader T.L., 2018. Managing Heat Stress Episodes in Confined Cattle. *Vet. Clin. Food Anim.*, **34** (2): 325-339, doi: 10.1016/j.cvfa.2018.05.001
- Summer A., Lora I., Formaggioni P., Gottardo F., 2019. Impact of heat stress on milk and meat production. *Anim. Front.*, **9** (1): 39-46, doi: 10.1093/af/vfy026
- Sunagawa K., Nagamine I., Kamata Y., Niino N., Taniyama Y., Kinjo K., Matayoshi A., 2015. Nighttime cooling is an effective method for improving milk production in lactating goats exposed to hot and humid environment. *Asian-Australas. J. Anim. Sci.*, **28** (7): 966-975, doi: 10.5713/ajas.14.0890
- Tajima K., Nonaka I., Higuchi K., Takusari N., Kurihara M., Takenaka A., Mitsumori M., et al., 2007. Influence of high temperature and humidity on rumen bacterial diversity in Holstein heifers. *Anaerobe*, **13** (2): 57-64, doi: 10.1016/j.anaerobe.2006.12.001
- Tao S., Monteiro A.P.A., Thompson I.M., Hayen M.J., Dahl G.E., 2012a. Effect of late-gestation maternal heat stress on growth and immune function of dairy calves. *J. Dairy Sci.*, **95** (12): 7128-7136, doi: 10.3168/jds.2012-5697
- Tao S., Thompson I.M., Monteiro A.P.A., Hayen M.J., Young L.J., Dahl G.E., 2012. Effect of cooling heat-stressed dairy cows during the dry period on insulin response. *J. Dairy Sci.*, **95** (9): 5035-5046, doi: 10.3168/jds.2012-5697
- Tao S., Monteiro A.P.A., Thompson I.M., Hayen M.J., Dahl G.E., 2012. Effect of late-gestation maternal heat stress on growth and immune function of dairy calves. *J. Dairy Sci.*, **95** (12): 7128-7136, doi: 10.3168/jds.2012-5697
- Taylor N.A.S., Tipton M.J., Kenny G.P., 2014. Considerations for the measurement of core, skin and mean body temperatures. *J. Thermal Biol.*, **46**: 72-101, doi: 10.1016/j.jtherbio.2014.10.006
- Tresoldi G., Schutz K.E., Tucker C.B., 2018. Cooling cows with sprinklers: Spray duration affects physiological responses to heat load. *J. Dairy Sci.*, **101**: 4412-4423, doi: 10.3168/jds
- Vallée R., Ballot N., Charef J., Fagoo B., 2021. Impacts du stress thermique sur les vaches laitières. Revue de littérature. https://idele.fr/umt-ebis/publications/detail-article?tx_atolidelecontenus_publicationdetail%5Baction%5D=showArticle&tx_atolidelecontenus_publicationdetail%5Bcontroller%5D=Detail&tx_atolidelecontenus_publicationdetail%5Bpublication%5D=16071&cHash=14851223ee28f107261b293a64539f56. (Consulté en mars 2024)
- Vázquez Diosdado J.A., Barker Z.E., Hodges H.R., Amory J.R., Croft D.P., Bell N.J., Codling E.A., 2015. Classification of behaviour in housed dairy cows using an accelerometer-based activity monitoring system. *Anim. Biotelem.*, **3**: 15, doi: 10.1186/s40317-015-0045-8
- Vázquez-Diosdado J.A., Miguel-Pacheco G.G., Plant B., Dottorini T., Green M., Kaler J., 2019. Developing and evaluating threshold-based algorithms to detect drinking behavior in dairy cows using reticulorumen temperature. *J. Dairy Sci.*, **102** (11): 10471-10482, doi: 10.3168/jds.2019-16442
- Verwoerd W., Wellby M., Barrell G., 2006. Absence of a causal relationship between environmental and body temperature in dairy cows (*Bos taurus*) under moderate climatic conditions. *J. Thermal Biol.*, **31** (7):533-540, doi: 10.1016/j.jtherbio.2006.07.001
- Vickers L.A., Burfeind O., Von Keyserlingk M.A.G., Veira D.M., Weary D.M., Heuwieser W., 2010. Technical note: Comparison of rectal and vaginal temperatures in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.*, **93** (11): 5246-5251, doi: 10.3168/jds.2010-3388
- Vinet A., Mattalia S., Vallée R., Bertrand C., Bertuzzi P., Cuyabano B.C.D., Boichard D., 2022. Étude de la tolérance à la chaleur des bovins par l'étude des interactions entre génotype et indice température-humidité sur la production et la santé de la mamelle en race Montbéliarde. *Renc. Rech. Rumin.*, **26**: 191-195.
- 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** (8): 3781-3790, doi: 10.3168/jds.2009-2127
- Vitali A., Felici A., Lees A.M., Giacinti G., Maresca C., Bernabucci U., Gaughan J.B., et al., 2020. Heat load increases the risk of clinical mastitis in dairy cattle. *J. Dairy Sci.*, **103**: 8378-8387, doi: 10.3168/jds.2019-17748
- Vizzotto E.F., Fischer V., Thaler Neto A., Abreu A.S., Stumpf M.T., Werncke D., Schmidt F.A., McManus C.M., 2015. Access to shade changes behavioral and physiological attributes of dairy cows during the hot season in the subtropics. *Animal*, **9** (9): 1559-1566, doi: 10.1017/S1751731115000877
- Wang J., Li J., Wang F., Xiao J., Wang Y., Yang H., Li S., et al., 2020. Heat stress on calves and heifers: a review. *J. Anim. Sci. Biotechnol.*, **11**: 79-86, doi: 10.1186/s40104-020-00485-8
- Wang X., Bjerg B.S., Choi C.Y., Zong C., Zhang G., 2018. A review and quantitative assessment of cattle-related thermal indices. *J. Therm. Biol.*, **77**: 24-37, doi: 10.1016/j.jtherbio.2018.08.005
- Wathes C.M., Jones C.D., Webster A.J., 1983. Ventilation, air hygiene and animal health. *Vet. Rec.*, **113** (24): 554-559
- West J.W., Mullinix B.G., Bernard J.K., 2003. Effects of hot, humid weather on milk temperature, dry matter intake, and milk yield of lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.*, **86** (1): 232-242, doi: 10.3168/jds.S0022-0302(03)73602-9
- Wheelock J.B., Rhoads R., VanBaale M., Sanders S., Baumgard L.H., 2010. Effects of heat stress on energetic metabolism in lactating Holstein cows. *J. Dairy Sci.*, **93** (2): 644-655, doi: 10.3168/jds.2009-2295
- Wijffels G., Sullivan M., Gaughan J., 2020. Methods to quantify heat stress in ruminants: current status and future prospects. *Methods*, **186**: 3-13, doi: 10.1016/j.ymeth.2020.09.004
- Wilson S.J., Marion R.S., Spain J.N., Spiers D.E., Keisler D.H., Lucy M.C., 1998. Effects of controlled heat stress on ovarian function of dairy cattle. *J. Dairy Sci.*, **81**: 2124-2131, doi: 10.3168/jds.S0022-0302(98)75788-1
- Wolfenson D., Roth Z., Meidan R., 2000. Impaired reproduction in heat-stressed cattle: basic and applied aspects. *Anim. Reprod. Sci.*, **60-61**: 535-547, doi: 10.1093/af/vfy027
- Wolfenson D., Roth Z., 2018. Impact of heat stress on cow reproduction and fertility. *Anim. Front.*, **9** (1): 32-38, doi: 10.1093/af/vfy027
- Yazdi M.H., Mirzaei-Alamouti H.R., Amanlou H., Mahjoubi E., Nabipour A., Aghaziarati N., Baumgard L.H., 2016. Effects of heat stress on metabolism, digestibility, and rumen epithelial characteristics in growing Holstein calves. *J. Anim. Sci.*, **94** (1): 77-89, doi: 10.2527/jas.2015-9364
- Yin T., Halli K., König S., 2022. Direct genetic effects, maternal genetic effects and maternal genetic sensitivity on prenatal heat stress for calf diseases and corresponding genomic loci in German Holsteins. *J. Dairy Sci.*, **105** (8): 6795-6808, doi: 10.3168/jds.2022-21804
- Zecchini M., Barbieri S., Boureima K., Crimella C., 2003. Heat stress parameters in Azawak (*Bos indicus*): four seasons of data collection. *Ital. J. Anim. Sci.*, **2** (1): 142-144, doi: 10.4081/ijas.2003.11675940
- Zeinhom M.M.A., Abdel Aziz R.L., Mohammed A.N., Bernabucci U., 2016. Impact of seasonal conditions on quality and pathogens content of milk in Friesian cows. *Asian-Australas J. Anim. Sci.*, **29** (8): 1207-1213, doi: 10.5713/ajas.16.0143
- Zimbelman R.B., Baumgard L.H., Collier R.J., 2010. Effects of encapsulated niacin on evaporative heat loss and body temperature in moderately heat-stressed lactating Holstein cows. *J. Dairy Sci.*, **93** (6): 2387-2394, doi: 10.3168/jds.2009-2557

Summary

Hanzen C., Delhez P., Hornick J.L., Lessire F., Gherissi D.E. Environmental heat stress in cattle: 2. Physiological, pathological, behavioral, dietary and dairy production effects

Background: Heat stress has various effects on the general physiology of the animal. **Aim:** The aim of this literature review was to describe the physiological, pathological, behavioral, dietary and immune effects of heat stress and its impact on milk production. **Methods:** Using the PubMed database, the review focused initially on review articles, and was then supplemented by references to identified articles. **Results:** Body temperature, measured by sensors placed at various points on the body, is more influenced by the Temperature-Humidity Index (THI) than by the environmental temperature. This body temperature also depends on milk production level, breed and circadian rhythm. Key signs of heat stress include an increased respiratory rate (> 60 movements/min) and consequent panting, as well as increased water intake and reduced feed intake. Heat stress also results in a loss of body condition and an increase in blood pH. It hampers neonatal development through reduced food intake and alteration of the immune system. Moreover, it leads to reduced milk production, accompanied by lower milk protein, fat and lactose concentrations. Various behavioral changes are also observed: reduced time spent lying down and increased standing, seeking shade and water, etc. The immune effects of heat stress are more pronounced before than after weaning. In lactating cows, it leads to an increase in the milk cell count and a decrease in plasma cytokine and immunoglobulin concentrations. Finally, heat stress increases the prevalence of pathologies such as rumen acidosis, acetonemia, lameness, mastitis and parasitic infestation. **Conclusions:** The increase in environmental temperature calls for a greater awareness of the multiplicity of direct and indirect effects in the short, medium and long term, as well as of the economic consequences. The constant increase in research carried out to objectivize the effects observed will enable those in charge of animal health to implement appropriate strategies to limit their effects.

Keywords: cattle, body temperature, heat stress, physiology, feed intake, pathology, behaviour, livestock mortality, immunity

Resumen

Hanzen C., Delhez P., Hornick J.L., Lessire F., Gherissi D.E. Estrés térmico ambiental en el ganado bovino: 2. Efectos fisiológicos, patológicos, conductuales, dietéticos, inmunitarios y en la producción de leche

Contexto: El estrés térmico se manifiesta con diversos efectos en la fisiología general del animal. **Objetivos:** Esta revisión de la literatura tiene como objetivo describir los efectos fisiológicos, patológicos, conductuales, dietéticos e inmunitarios del estrés térmico, y su impacto en la producción lechera. **Método:** A partir de la base PubMed, el estudio se concentró primeramente en los artículos de síntesis y posteriormente se completó con las referencias de los artículos identificados. **Resultados:** La temperatura corporal medida por los sensores situados en diversos puntos del cuerpo depende más del THI (índice de temperatura-humedad) que de la temperatura ambiental. Depende del nivel de producción lechera, de la raza y del ritmo circadiano. El aumento de la frecuencia respiratoria (> 60 movimientos/min) y el jadeo resultante, así como el aumento de la cantidad de agua ingerida y la reducción de la ingesta de alimentos constituyen las principales muestras de un estrés térmico. También se manifiesta con una pérdida del grado de engorde y un aumento del pH sanguíneo. Además, obstaculiza el desarrollo neonatal a causa de la reducción de la ingesta de alimentos y de la alteración del sistema inmunitario. La disminución de la producción lechera es otra consecuencia importante de un estrés térmico, acompañada por una disminución de la concentración de proteínas, materia grasa y lactosa de la leche. Igualmente se observaron varias alteraciones conductuales: disminución de la postura acostada y aumento de las posturas de pie, búsqueda de sombra y de agua, etc. Los efectos inmunitarios del estrés térmico se detectan más antes que después del destete. En la vaca en lactancia comporta un aumento de la tasa celular de la leche y una disminución de la concentración plasmática de citoquinas e inmunoglobulinas. Finalmente, el estrés térmico induce un aumento de la frecuencia de patologías como acidosis ruminal, acetonemia, cojera, mastitis o incluso infestación parasitaria. **Conclusiones:** El aumento de la temperatura ambiental nos invita a ser más conscientes de la multiplicidad de sus efectos directos o indirectos a corto, medio y largo plazo, y de sus consecuencias económicas. El aumento constante de las investigaciones llevadas a cabo para objetivar los efectos observados permitirá a los responsables de la salud animal aplicar las estrategias adecuadas para limitar estos efectos.

Palabras clave: ganado bovino, temperatura del cuerpo, estrés térmico, fisiología, ingestión de piensos, patología, mortalidad del ganado, inmunidad

