

Le stress thermique environnemental dans l'espèce bovine : 4. Moyens de lutte

Djalel Eddine Gherissi ¹ Jean-François Cabaraux ²
Jean-Luc Hornick ² Christian Hanzen ^{2*}

Mots-clés

Bovin, stress thermique, conduite d'élevage, alimentation, logement des animaux, sélection

OPEN ACCESS

© D.E. Gherissi *et al.*, 2025
published by Cirad



This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY).

Type: Review article

Submitted: 08 July 2024

Accepted: 12 February 2025

Online: 28 April 2025

DOI: 10.19182/remvt.37495

Résumé

Contexte : Le stress thermique a un impact significatif sur le bien-être des animaux d'élevage, affectant leur santé physique ainsi que des paramètres zootechniques tels que la productivité et le rendement, ce qui a des conséquences directes sur la rentabilité des exploitations. De nombreuses recherches sont menées dans le but d'évaluer et d'améliorer les méthodes de lutte contre le stress thermique. **Objectifs** : Cette revue de littérature récapitule les méthodes de lutte contre le stress thermique. Celles-ci peuvent être regroupées en quatre catégories, qui sont l'amélioration de l'environnement physique des animaux, la gestion de l'alimentation, l'approche par sélection génétique et la gestion de la reproduction. **Méthode** : Cette revue de littérature s'est d'abord appuyée sur des articles de synthèse issus de la base PubMed, puis a été enrichie par l'examen des références citées dans ces articles. **Résultats** : Il n'existe pas de solution unique pour atténuer les effets d'un stress thermique chez les animaux. Au contraire, les diverses solutions apparaissent comme étant complémentaires et doivent être choisies en fonction du contexte de l'élevage. La première méthode de lutte se concentre sur des adaptations de l'environnement des animaux ciblant la ventilation, le choix des matériaux de construction, et les systèmes de refroidissement. La deuxième méthode de lutte vise une gestion plus rigoureuse de l'alimentation. La troisième méthode de lutte repose sur plusieurs approches complémentaires : la sélection génétique factorielle, la sélection génomique, ainsi que le croisement et l'hybridation. Enfin, la quatrième catégorie de solutions explore l'utilisation des biotechnologies de la reproduction et des traitements hormonaux. **Conclusions** : La recommandation principale est de combiner plusieurs méthodes, en privilégiant les adaptations environnementales et nutritionnelles, tout en intégrant progressivement une stratégie de sélection génétique adaptée à chaque système d'élevage.

■ Comment citer cet article : Gherissi, D. E., Cabaraux, J.- F., Hornick, J.- L., & Hanzen, C. (2025). Le stress thermique environnemental dans l'espèce bovine : 4. Moyens de lutte. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, 78, 37495. <https://doi.org/10.19182/remvt.37495>

■ INTRODUCTION

Les bovins maintiennent physiologiquement leur température corporelle entre 38 et 39,5 °C dans une zone de thermoneutralité comprise entre des températures critiques minimale (- 15 °C) et maximale (22 à 25 °C) (Silanikove, 2000 ; Hanzen *et al.*, 2024a). Lorsque la température dépasse la valeur critique maximale, les bovins subissent

un stress thermique qualifié de léger, modéré, sévère ou extrême en fonction de la valeur de l'index de température / humidité (*Temperature Humidity Index*, THI). Cet index évalue le stress thermique en fonction de la température et de l'humidité (REFF). Il se calcule par la formule suivante :

$$THI = (0,8 \times T^{\circ}C) + [(HR / 100) \times (T^{\circ}C - 14,4)] + 46,4 \quad (\text{équation 1})$$

Un THI < 72 indique l'absence de stress, 72-78 un stress léger, 78-88 un stress modéré à sévère, et > 88 un stress extrême impactant la santé et la production animale (REFF). En effet, le stress thermique est principalement déterminé par la température et l'humidité, comme le reflète l'indice THI. Cependant, d'autres facteurs comme l'âge, la race, le métabolisme, le pelage, la vitesse du vent et le rayonnement solaire peuvent moduler la réponse des animaux. Il s'accompagne de multiples conséquences physiologiques, comportementales ou

1. Laboratoire de Productions Animales, Biotechnologies et Santé (PABIOS). Institut des sciences agronomiques et vétérinaires, Département des sciences vétérinaires, Université de Souk Ahras, Souk Ahras, Algérie

2. Faculté de médecine vétérinaire, Département de gestion vétérinaire des ressources animales, Liège, Belgique

* Pour la correspondance

Tél. : +32 4 3664142 ; E-mail : christian.hanzen@uliege.be

concernant la production (Hanzen *et al.*, 2024b) et la reproduction (Hanzen *et al.*, 2025), dont les conséquences économiques ont été démontrées (St Pierre *et al.*, 2003).

La progression des connaissances relatives aux mécanismes et effets du stress thermique sur les performances des bovins laitiers et/ou à viande a permis de mettre au point diverses stratégies visant à limiter les impacts de ce stress (figure 1). La stratégie la plus importante concerne l'amélioration de l'environnement physique des animaux et la mise au point de systèmes de ventilation, d'ombrage et d'humidification des animaux (Becker & Stone, 2020). La gestion de l'alimentation, par la mise en place de modifications nutritionnelles pour atténuer significativement les effets physiologiques du stress thermique chez les bovins et réduire son impact sur la productivité et le bien-être animal, constitue une seconde approche stratégique prometteuse (Harris & Barney, 1992). Par ailleurs, l'élucidation des mécanismes génétiques de la thermotolérance laisse entrevoir la possibilité de programmes de sélection adaptés (Barendse, 2017 ; Carabaño *et al.*, 2019 ; Durosaro *et al.*, 2023 ; Hansen, 2020 ; Lemal *et al.*, 2022). Enfin, les biotechnologies de la reproduction et les traitements hormonaux, ainsi que la gestion de la saisonnalité des vêlages, offrent des opportunités d'intervention, notamment durant la période embryonnaire (Khan *et al.*, 2023 ; Morgado *et al.*, 2023).

■ AMÉLIORATION DE L'ENVIRONNEMENT PHYSIQUE

Les stratégies d'amélioration du logement des animaux comprennent quatre axes (SAAW en Anglais) : l'ombre (*shade*), le débit de l'air (*air exchange*), la vitesse de l'air (*air velocity*) et l'eau (*water*) (Tyson *et al.*, 2014). Le premier axe vise à fournir de l'ombre aux animaux pour mieux gérer le stress thermique au pâturage ou dans les étables à front ouvert. Les autres ont pour but de favoriser l'échange et l'évacuation de la chaleur entre les vaches et leur environnement et au sein de

leur environnement. Des ventilateurs sont utilisés afin d'augmenter le débit de ventilation et/ou la vitesse de l'air, associés éventuellement à des brumisateurs et/ou des gicleurs. Peuvent également être refroidis le toit, l'environnement (l'air ambiant, les logettes, etc.) ou directement les vaches en appliquant de l'eau (House & Eng, 2015 ; Fournel *et al.*, 2017 ; Renaudeau *et al.*, 2012).

Amélioration de l'environnement immédiat

Fournir de l'ombre

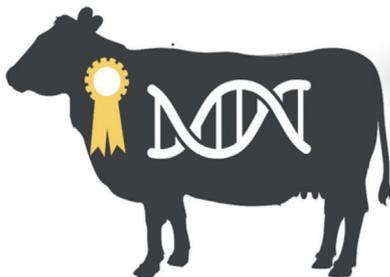
L'ombrage, qu'il soit naturel ou artificiel, est l'une des méthodes les plus faciles et économiques à mettre en œuvre pour minimiser les effets du rayonnement solaire (Fournel *et al.*, 2017 ; Renaudeau *et al.*, 2012). Les effets du recours à l'un ou l'autre système d'ombrage sont connus. Ainsi, l'ombrage s'accompagne d'une baisse de la température vaginale et rectale (Collier *et al.*, 1981 ; Fisher *et al.*, 2008 ; Roman-Ponce *et al.*, 1977 ; Tucker *et al.*, 2008 ; Schütz *et al.*, 2010), d'une diminution de la fréquence respiratoire à 15–35 respirations/min comparé à 25–65 respirations/min chez les bovins soumis au stress thermique (Collier *et al.*, 1981 ; Das *et al.*, 2016 ; Muller *et al.*, 1994 ; Roman-Ponce *et al.*, 1977) et d'une augmentation de l'ingestion alimentaire et de la rumination, de la production de lait et de la fertilité (Avenidaño-Reyes *et al.*, 2010 ; Blackshaw & Blackshaw, 1994 ; Das *et al.*, 2016 ; Fisher *et al.*, 2008 ; Muller *et al.*, 1994 ; Palacio *et al.*, 2015 ; Roman-Ponce *et al.*, 1977 ; Schütz *et al.*, 2010).

En prairie, la présence d'arbres et/ou de haies hautes permet de diminuer le rayonnement direct sur les animaux et améliore significativement le rendement des vaches laitières (Abreu *et al.*, 2020 ; Nielsen & Wredle, 2023). Il faut cependant que le nombre d'arbres ou la longueur de la haie soient suffisants pour que tous les animaux puissent s'abriter en même temps, sans générer de compétitions ou de conflits. Il faut éviter les zones boueuses ou assurer leur entretien régulier afin de limiter les risques de contamination, évitant ainsi les mammites d'environnement. Outre l'effet d'ombrage, la présence de nombreux

AMÉLIORATION DE L'ENVIRONNEMENT PHYSIQUE



GESTION DE L'ALIMENTATION



APPROCHES GÉNÉTIQUES



GESTION DE LA REPRODUCTION

Figure 1 : Stratégies de lutte contre le stress thermique des bovins laitiers /// Strategies to combat heat stress in dairy cattle

arbres, soit en prairie, notamment dans le cadre de l'agroforesterie, soit sur les parcours sylvopastoraux, entraîne une diminution de la température à leur proximité. En effet, l'eau émise par l'évapotranspiration des arbres et des buissons capte les calories ambiantes et les évacue via l'évaporation. De plus, la présence de ligneux (arbres et/ou buissons) peut servir de fourrage d'appoint lorsque l'herbe de la prairie se fait rare. À défaut d'arbres, il est nécessaire de prévoir un abri artificiel (Palacio *et al.*, 2015), éventuellement déplaçable, constitué par exemple d'une toile sur une armature en bois ou métallique, et bien ventilé (Nielsen & Wredle, 2023). Une simple cabane en tôle peut vite se transformer en four si elle n'est pas isolée ni ventilée. Ces points d'ombre en prairie ne doivent pas être trop éloignés des abreuvoirs, afin que les animaux soient incités à aller boire et ne soient pas obligés de parcourir une longue distance sous le soleil jusqu'à la source d'eau. Une distance trop importante diminue la quantité d'eau ingérée par les vaches et donc la production laitière. Lorsque la configuration des lieux le permet, certains éleveurs laissent les vaches à l'intérieur durant la journée, et les sortent la nuit lorsque la température est plus fraîche (Silanikove, 2000).

En étable, la longueur d'un bâtiment « fermé » doit être perpendiculaire aux vents dominants pour en favoriser la ventilation naturelle. Cette orientation pourrait cependant favoriser l'entrée des rayons du soleil quand celui-ci est bas, le matin et le soir, en été (Smith & Harner, 2012). Un système d'ombrage est donc à prévoir à cette période, avec des bardages appropriés et des options d'ombrage fixes ou saisonnières (Aggarwal & Upadhyay, 2012). La présence d'un nombre trop important de plaques translucides sur le toit comme source d'entrée de lumière augmente également l'entrée du rayonnement solaire. Une peinture blanche qui réfléchit la lumière peut être appliquée sur ces plaques, en été, comme le font certains jardiniers avec leur serre. D'une manière générale, il est conseillé d'installer une toiture de couleur claire afin que celle-ci reflète les rayons du soleil plutôt que de les absorber. Par ailleurs, pour que le vent puisse jouer son rôle dans la ventilation naturelle de l'étable, celle-ci doit avoir une largeur de 20 mètres maximum. Sinon, il convient d'aménager des ouvertures dans la toiture pour laisser entrer l'air à différents endroits du bâtiment. L'auge doit être maintenue à l'ombre afin d'éviter l'échauffement de la ration. La présence d'arbres et/ou de haies à côté du bâtiment comme moyen d'ombrage perturbe la vitesse du vent à l'approche de l'étable et modifie ainsi sa ventilation. Il en est de même en cas de présence de constructions à proximité de l'étable, telles qu'un silo, un bâtiment de stockage des fourrages ou de matériel agricole, une autre étable, etc.

Améliorer le climat dans le bâtiment

Le renouvellement d'air à l'intérieur de l'étable est assuré par la ventilation, qu'elle soit naturelle et/ou mécanique. En été, les recommandations usuelles quant aux besoins en ventilation des vaches laitières sont de 1 m³ d'air par heure et par kilogramme de poids vif, soit 700 m³ par heure pour une vache de 700 kg. Le volume d'air et la surface au sol disponibles par vache laitière suivent les recommandations de 5 m³ par 100 kg de poids vif et de 1 m² par 1 000 l de lait produit avec un minimum de 1 m² par 100 kg de poids vif, soit 35 m³ et 10 m² pour une vache laitière de 700 kg ayant une lactation annuelle de 10 000 l ou 35 m³ et 7 m² pour une vache allaitante de 700 kg. Cependant, une diminution de la densité animale dans l'étable permet que les rayonnements émis par la surface corporelle des vaches soient moins absorbés par la surface corporelle des vaches environnantes (Berman & Horovitz, 2012). Ces recommandations impliquent vingt renouvellements d'air par heure dans une étable. En hiver, les besoins de ventilation peuvent être divisés par trois, car la ventilation doit juste permettre d'évacuer l'humidité, les gaz, les microorganismes et les poussières qui s'accumulent dans l'air ambiant. En été, la ventilation doit permettre d'évacuer en plus la chaleur. Si la ventilation naturelle n'est pas suffisante, l'éleveur doit alors faire appel à une ventilation mécanique en utilisant des ventilateurs-extracteurs longitudinaux ou

transversaux placés sur les murs de l'étable, des ventilateurs verticaux placés à intervalles réguliers (qui correspondent normalement à dix fois le diamètre du ventilateur) et qui chassent l'air hors de l'étable à une vitesse élevée, des ventilateurs placés au niveau des plafonds qui brassent de grands volumes d'air à faible vitesse, ou des gaines de diffusion d'air sous pression positive.

L'isolation du toit d'une étable, même si les côtés de l'étable sont ouverts, et une pente plus raide des versants sont de bons moyens pour améliorer le climat de l'étable (Fournel *et al.*, 2017 ; House & Eng, 2015). En été, l'isolation empêche la chaleur d'entrer et en hiver, la chaleur de sortir et le froid d'entrer. La surface des entrées de lumière naturelle doit correspondre à environ 10 % de la surface au sol de l'étable ; les entrées d'air latérales sont souvent suffisantes comme entrées de lumière. L'installation excessive de plaques translucides sur le toit augmente l'entrée du rayonnement solaire, mais l'utilisation de matériaux filtrant les UV ou l'application d'une peinture blanche en été permet de limiter le réchauffement de l'air intérieur (voir précédemment). De même, si les dômes translucides situés au niveau du fûtage et laissant entrer la lumière ne sont pas constitués d'une matière résistante au passage des UV, un bouchon thermique se forme à cet endroit, empêchant l'air vicié de sortir et donc une bonne ventilation naturelle du bâtiment.

Les murs et le toit de l'étable peuvent emmagasiner la chaleur via le rayonnement direct et émettre des rayonnements indirects sur les animaux dans l'étable, durant la journée mais également durant la nuit, retardant ainsi le refroidissement de l'étable. Il est donc conseillé de limiter la hauteur des murs et de les isoler enfin qu'ils n'accumulent pas la chaleur. Il est également conseillé d'augmenter la hauteur du toit, pour diminuer les radiations indirectes en provenance du toit et accroître en parallèle la perte de chaleur radiante depuis la surface corporelle des animaux vers le haut. Cependant, l'effet positif de l'augmentation de la hauteur du toit est contrebalancé par l'augmentation de la radiation indirecte entrante via les côtés du bâtiment ; un compromis doit donc être trouvé (Berman & Horovitz, 2012).

Les éleveurs peuvent utiliser des brumisateurs à haute pression qui pulvérisent des microgouttelettes d'eau dans l'air ; celles-ci absorbent l'énergie de l'environnement et réduisent ainsi la température ambiante. Les gicleurs fonctionnent par intermittence. Ils pulvérisent durant quelques secondes à quelques minutes, puis s'arrêtent pendant environ 30 secondes. Les gicleurs doivent être couplés à des ventilateurs afin que ceux-ci évacuent l'eau qui s'accumule dans l'air. En effet, si l'humidité relative de l'air augmente, l'évaporation des microgouttelettes sera limitée, réduisant ainsi l'efficacité de la brumisation pour abaisser la température et, par conséquent, le THI.

Il est également possible d'obliger l'air entrant dans une étable à passer par un tampon de refroidissement par évaporation qui, grâce à l'eau qui y circule, le refroidit. L'air refroidi entre dans le bâtiment soit via la dépression créée par de gros ventilateurs-extracteurs longitudinaux, soit via des gaines de ventilation qui soufflent de l'air dans l'étable.

Augmentation des pertes caloriques

Il existe différents mécanismes pour augmenter les échanges de chaleur entre les animaux et leur environnement. Il s'agit d'une part des pertes de chaleur sensibles via la convection, c'est-à-dire le mouvement pris par un fluide ou un gaz sous l'influence d'une variation de température, et via la conduction, c'est-à-dire la transmission par la matière sans qu'il y ait déplacement de matière (Becker *et al.*, 2020). Il s'agit d'autre part des pertes de chaleur sous forme latente qui sont dues à l'évaporation de l'eau à la surface de la peau ou du pelage et au niveau des muqueuses respiratoires (Bonney & Noordhuizen, 2011).

Lorsque l'air dans l'étable est immobile, sans ventilation forcée ni courants d'air, et que le mouvement de l'air à la surface de la peau des animaux est dû uniquement à la différence de densité provoquée par l'échauffement de l'air induit par la chaleur émise par la peau (vitesse inférieure à 1 m/s), il est question de convection naturelle (Becker *et al.*, 2020). Par refroidissement de l'air ambiant, la vasodilatation au niveau de la peau de l'animal s'accroît, et les pertes de chaleur par convection augmentent. Un autre moyen d'augmenter ces pertes est d'accroître la vitesse de l'air au niveau de la peau (1 à 3 m/s) pour évacuer plus de calories, soit en créant un courant d'air, soit en plaçant des ventilateurs ; il est alors question de pertes par convection forcée (Berman *et al.*, 1985). La création d'un courant d'air naturel se fait en ouvrant toutes les ouvertures (portes et fenêtres) et/ou en enlevant temporairement les systèmes brise-vent (filet, bardage ajouré, etc.) dont sont normalement munies les entrées d'air pour éviter les courants d'air en période froide.

Les pertes de chaleur par conduction se réalisent par contact direct entre la peau de l'animal et un matériau plus froid composant la litière (Becker *et al.*, 2020). Ce type de perte est moins important que les autres, car seule une faible proportion du corps de la vache est en contact avec ce matériau (Becker *et al.*, 2020) : 10 % lorsque l'animal est en décubitus sternal (couché sur le ventre avec les membres repliés) et 20 % lorsqu'il est en en décubitus latéral (allongé sur le côté). Au niveau de la litière, le calcaire broyé et le sable présentent une température plus basse que la paille ou des copeaux de bois (Cummins, 1998) et le sable permet un échange de chaleur plus important (Fournel *et al.*, 2017). Il existe également des matelas de logette à eau refroidie (Bastian *et al.*, 2003). La circulation de l'eau refroidit le matelas et la chaleur perdue par les vaches peut être récupérée pour chauffer l'eau nécessaire au fonctionnement d'autres ateliers dans l'exploitation laitière. Cependant, si ces matelas améliorent le confort des animaux et contribuent à allonger le temps de couchage, certains auteurs ont remarqué qu'en cas de stress thermique, ils diminuent la production laitière (Bouglé, 2022 ; Tourillon, 2022), alors que d'autres ont observé qu'ils améliorent cette production (Perano *et al.*, 2015).

Enfin, les animaux peuvent perdre de la chaleur sous forme de chaleur latente de vaporisation. Étant donné que 1 g d'eau élimine en moyenne 0,585 kcal pour passer de l'état liquide à l'état gazeux, la sudation permet d'évacuer la chaleur du corps. Un bovin adulte peut ainsi perdre de 550 à 650 g d'eau par heure et par mètre carré de surface corporelle, en fonction de sa race. Afin d'augmenter ces pertes par évaporation, les vaches peuvent être soit brumisées, soit arrosées par des gouttelettes, ce qui consomme dix fois plus d'eau que la brumisation (Bonney & Noordhuizen, 2011). En outre, l'utilisation de ventilateurs force le mouvement de l'air sur le corps de la vache, améliore l'évaporation et donc accroît les pertes de chaleur. Le refroidissement via un système d'arrosage sans ventilateur permet d'améliorer la température rectale et le taux de respiration mais ne permet pas d'augmenter la production laitière, à la différence du refroidissement combinant arroseurs et ventilateurs, qui améliore en plus la production laitière (Fournel *et al.*, 2017).

L'amélioration du confort thermique des bâtiments d'élevage doit impliquer l'installation de capteurs enregistrant les paramètres de température, d'humidité relative et de vitesse du vent (c'est-à-dire une station météo), afin que les situations climatiques soient objectives et non subjectives par les éleveurs. Ces données pourraient être analysées complémentaires à celles relevées sur les animaux, telles la température corporelle, l'ingestion alimentaire ou encore la production laitière, pour *in fine*, permettre à un logiciel de gérer automatiquement les différents mécanismes régulant la bioclimatologie des étables (vitesse des ventilateurs, durée de la brumisation, quantité d'eau injectée, ouverture des rideaux, etc.).

■ GESTION DE L'ALIMENTATION

Les stratégies visant à améliorer la tolérance des bovins au stress thermique et conserver dans la mesure du possible leur niveau de production s'emploient à maintenir une ingestion alimentaire suffisante capable de garantir le fonctionnement du rumen, à augmenter la densité énergétique de la ration, à améliorer le métabolisme protéique à l'origine d'une partie significative de la production d'extra-chaleur, et à assurer des apports adéquats en minéraux et en vitamines. Par ailleurs, en période de stress thermique, il est recommandé de distribuer l'alimentation tôt le matin et en fin d'après-midi, afin de limiter la charge thermique des animaux. Il est également conseillé de repousser l'aliment plusieurs fois dans la journée (idéalement 4 à 6 fois) pour le maintenir frais et accessible, favorisant ainsi une ingestion régulière (Negron-Pérez *et al.*, 2019).

Les recommandations proposées dans cet article concernent davantage les élevages de type intensif que de type extensif. Les apports en eau et en minéraux constituent des priorités pour les élevages pastoraux, les recommandations plus spécifiques, comme par exemple l'apport d'additifs alimentaires, étant plus difficiles à mettre en œuvre, pour des raisons pratiques et économiques.

Gestion globale de la ration : bonnes pratiques

Les rations pour les bovins sont principalement composées de fourrages, mais elles incluent également une proportion de concentrés (grains, tourteaux, sous-produits riches en énergie et en protéines), dont la quantité augmente avec le niveau de production laitière de l'animal. Afin de limiter les risques d'acidose, la ration doit être formulée en fonction de normes internationales (CVB, 2022 ; INRA, 2018 ; NRC, 2021), qui respectent les besoins de l'animal en énergie et en protéines.

Diversifier les aliments et fractionner la ration alimentaire sont deux règles importantes. La diversification des aliments contribue à maintenir une flore ruminale saine, en permettant aux différents microorganismes de collaborer métaboliquement, et à fournir des sources variées d'acides aminés (INRA, 2018). Des fourrages de qualité réduisent le risque de tri alimentaire par les animaux. Ce risque est également limité par la distribution d'une ration totale mélangée contenant des brins longs (5 cm), notamment par l'incorporation de paille, qui favorise une meilleure homogénéité de la ration (Coon *et al.*, 2018).

La nature des aliments concentrés est importante à considérer. La ration doit contenir suffisamment d'énergie rapidement fermentescible permettant de synthétiser le glucose nécessaire à la production de lactose – et donc de lait – et au maintien d'une flore ruminale équilibrée. Le pH diminue en cas d'apport excessif de concentrés, qui contribuent à favoriser la production d'acides organiques forts tels que l'acide lactique, conduisant au dépassement de la capacité tampon apportée par les sels minéraux salivaires et les acides gras volatils issus des fermentations. Il est recommandé d'ajouter à la ration des solutions tampons comme le bicarbonate de sodium (apporté à raison de 0,75 % de la matière sèche ingérée, soit environ 200 g par jour et par vache), le magnésium fin ou le calcium sous forme de lithotamne (algue rouge, *Phymatolithon calcareum*). Ces additifs contribuent à la stabilité du pH au cours de la journée. Alternativement, l'augmentation des risques d'acidose en période chaude et le caractère exothermique des fermentations justifient d'incorporer dans la ration des concentrés riches en amidon, à fermentation plus lente (Bland *et al.*, 2013 ; Gonzalez-Rivas *et al.*, 2017 ; 2018).

Il est conseillé de fractionner la ration alimentaire en plusieurs repas pour éviter l'échauffement et la détérioration des aliments dans la mangeoire, et réduire la population d'insectes.

Le microbiote du système digestif, ruminal et/ou intestinal, est un élément important du métabolisme et de la santé de l'animal. Il peut être influencé directement par un stress thermique ou indirectement par les effets du stress thermique sur la réduction de l'ingestion de la matière sèche, sur la modification de la séquence et du volume des repas, sur le tri des portions alimentaires préférées, sur la diminution du temps de mastication et donc l'incorporation de bicarbonate salivaire dans le rumen, qui entraînent une perturbation et une modification du microbiome ruminal et du métabolisme (Chen *et al.*, 2018 ; Patra & Kar, 2021 ; Park *et al.*, 2022 ; Uyeno *et al.*, 2010 ; Zhao *et al.*, 2019). L'effet propre du stress thermique sur le microbiote intestinal de la vache est cependant encore peu étudié. Les effets de nuisance des modifications de l'ingestion et du comportement animal en cas de stress thermique sont difficiles à dissocier des modifications du microbiote dues à la température (Park *et al.*, 2022).

Stratégies ciblant l'eau

Un point capital et évident consiste à toujours laisser les animaux accéder à une eau propre et à volonté, tant la restriction hydrique a des effets négatifs marqués sur la production laitière et les indicateurs de bien-être chez le ruminant (Alamer, 2009 ; Ghassemi Nejad *et al.*, 2014). La restriction hydrique a également des effets sur le turnover hydrique du rumen (Chaiyabutr *et al.*, 1987) et réduit l'efficacité du transport et du renouvellement de l'eau dans le rumen, processus essentiel au déplacement des nutriments issus des fermentations pré-gastriques. Lorsque les conditions le permettent, offrir aux animaux une eau suffisamment froide (à 10 °C) peut se révéler efficace pour maintenir basse plus longtemps la température interne des animaux. Une consommation d'environ 20 l d'une eau à 10 °C réduit la température interne de près de 1 °C (Stermer *et al.*, 1986). Ce résultat est prédictible à partir de la charge calorique qu'absorbe une telle quantité d'eau à une telle température.

Stratégies ciblant l'énergie fournie

En période de stress thermique, le risque de déficit énergétique, où l'animal doit puiser dans ses réserves corporelles pour compenser un apport insuffisant, peut être atténué en augmentant la densité énergétique de la ration sans perturber sa fermentescibilité. L'apport de quelques pour cent (2-3 %) de lipides permet d'augmenter dans une même proportion la teneur en énergie nette, car les lipides sont très peu fermentescibles et bien métabolisés, avec peu de production de chaleur métabolique supplémentaire. Les lipides protégés sous forme de sels calciques ou de graines oléagineuses conviennent mieux, car ils impactent peu la flore du rumen (Moallem *et al.*, 2010). Il en va de même des acides gras saturés (Wang *et al.*, 2010), dont l'apport peut provenir de graines de coton ou de soja, voire de suif dans les pays où il est autorisé pour l'alimentation des ruminants.

Alternativement, les lipides peuvent être remplacés par une forme d'amidon plus résistante aux fermentations du rumen. L'impact sur la fermentation est ainsi minimisé et l'amidon résistant parvient directement au niveau de l'intestin grêle, où il peut être hydrolysé et absorbé sous forme de glucose. L'amidon de maïs est connu pour être résistant aux fermentations. Gonzalez-Rivas *et al.* (2017) ont montré que l'orge traitée à l'hydroxyde de sodium possédait les mêmes propriétés.

La densité de la ration peut être indirectement augmentée en substituant une partie des fibres peu fermentescibles (lignocellulose) par une forme plus fermentescible (hémicellulose) ou très fermentescible (fibres solubles) (Naderi *et al.*, 2016). Néanmoins, cette substitution est difficile à réaliser dans la pratique et les fibres solubles très fermentescibles tendent à se comporter comme des sources d'amidon. D'une façon générale, l'augmentation des teneurs en fibres neutro-détergentes (NDF, Neutral Detergent Fiber), qui représentent la fraction fibreuse insoluble des aliments (cellulose,

hémicellulose et lignine), entraîne une réduction de la matière sèche volontairement ingérée, quel que soit le climat (West *et al.*, 1999).

La stratégie ciblant la flore du rumen consiste à incorporer dans l'aliment des souches microbiennes en mesure d'augmenter la fibrolyse ruminale. L'addition de levures a été proposée pour améliorer la digestion des fibres, maintenir un pH et un potentiel rédox plus stables et de ce fait améliorer les performances de production et de croissance ainsi que la santé des animaux en période de stress thermique (Salvati *et al.*, 2015 ; Zhang *et al.*, 2022). *Saccharomyces cerevisiae* est une levure ayant fait l'objet dans ce cadre de beaucoup d'études qui se sont révélées positives. Le mode d'action porte sur la consommation par la levure d'oxygène résiduel dans le rumen, ce qui renforce la capacité fibrolytique de la flore ruménale, et sur la capacité fibrolytique propre du germe. *S. cerevisiae* produit naturellement très peu de cellulase ou d'enzymes fibrolytiques, mais des souches sélectionnées ou recombinantes issues du génie génétique activement étudiées actuellement, notamment pour la production de biocarburants (Kroukamp *et al.*, 2013), sont également exploitées en alimentation des ruminants. Ces souches peuvent être combinées avec des souches bactériennes fibrolytiques. À noter qu'en Europe, l'usage de souches microbiennes génétiquement modifiées en alimentation animale est fortement réglementé. Elles doivent notamment être certifiées QPS (*Qualified Presumption of Safety*) et une modification génétique ne doit pas entraîner de problèmes de sécurité, tels qu'une potentielle production d'antibiotiques ou de toxines (EFSA, 2024). L'usage de ces additifs pose la question de leur coût et du bénéfice que l'éleveur peut retirer de leur utilisation, compte tenu des doses recommandées, qui peuvent aller de quelques grammes à quelques centaines de grammes par vache et par jour.

Stratégies ciblant les protéines

Le stress thermique entraîne des perturbations de l'absorption intestinale, une augmentation du catabolisme et des modifications de la synthèse protéique, favorisant la production de protéines de phase aiguë et de choc thermique (Rius, 2019). Ces effets se traduisent par des altérations des teneurs en acides aminés plasmatiques chez la vache (Guo *et al.*, 2018). Pourtant, l'infusion jugulaire d'acides aminés essentiels ne modifie pas la production laitière (Kassube *et al.*, 2017). Les conséquences pratiques de ces observations sont difficiles à définir. Les protéines sont en effet connues pour générer davantage de chaleur métabolique que les autres nutriments, en raison de leur taux de catabolisme élevé. À l'entretien, c'est-à-dire pour couvrir les besoins physiologiques de base de l'animal, ce taux est de 100 %, tandis qu'il est d'environ 50 % lorsqu'elles sont utilisées pour la production de lait ou de viande. Il semble raisonnable de recommander de ne pas augmenter les apports de protéines chez les ruminants soumis à un stress thermique mais plutôt d'améliorer la qualité des protéines digérées. Cet objectif est difficile à atteindre car la qualité des protéines microbiennes du rumen, digestibles dans l'intestin, est déjà très élevée. Par contre, il est recommandé de formuler le plus précisément possible les rations afin, d'une part, d'assurer un couplage étroit entre l'azote fermentescible dans le rumen et l'énergie fermentescible, pour ne pas avoir un excédent d'azote ammoniacal qui devrait ensuite être métabolisé en urée par l'animal, et d'autre part, de ne pas susciter une faim azotée qui réduirait la capacité de la flore à fermenter les fibres. Cet équilibre est évalué par la balance protéique du rumen (BalProRu), un indicateur défini par l'INRA (2018).

Apports en minéraux et en vitamines

Il conviendrait de distinguer les effets des apports en macrominéraux et en oligoéléments, qui interviennent principalement dans l'équilibre électrolytique, la structure osseuse et le fonctionnement enzymatique, de ceux des vitamines, impliquées dans la régulation

des réactions biochimiques et le métabolisme énergétique. Bien que ces deux types de nutriments aient des rôles complémentaires, leurs mécanismes d'action métaboliques diffèrent. Toutefois, la littérature rapporte généralement des essais associant ces nutriments en cocktails visant à exercer des effets holistiques sur l'animal soumis à un stress thermique.

Concernant plus particulièrement les minéraux, il est rapporté que le stress thermique augmente les besoins en certains d'entre eux (Harris & Barney, 1992), suite à la diminution de l'ingestion et de la perfusion intestinale, aux perturbations électrolytiques liées à l'alcalose respiratoire (Farooq *et al.*, 2010), et aux pertes par la transpiration et la miction qui éliminent une plus grande part de ces éléments. Sanchez *et al.* (1994) avaient rapporté chez des vaches cathétérisées un effet généralement positif d'un doublement des apports en minéraux (Calcium, Phosphore, Sodium, Potassium et Magnésium) sur l'ingestion, avec toutefois des effets négatifs observés lorsque ces minéraux étaient apportés sous forme de chlorures et de sulfates. L'apport de chrome (à une dose dix fois supérieure aux recommandations habituelles) s'est révélé avoir un effet positif sur l'ingestion de matière sèche. Le chrome est un oligoélément indispensable à la flore cellulosique du rumen. Il a un effet antioxydant, il améliore l'action de l'insuline et a un effet positif sur le métabolisme des lipides, des protéines, des acides nucléiques et des hydrates de carbone (Bin-Jumah *et al.*, 2020). Ajouté à la ration de vaches laitières subissant un stress thermique à raison de 7,2 ou 10,8 mg par vache, ce supplément a pour effet d'augmenter l'ingestion de matière sèche et la production laitière (An-Qiang *et al.*, 2009). Il serait pertinent de préciser si l'effet est proportionnel à la dose administrée ou si ces valeurs varient en fonction du poids des vaches. Néanmoins, les doses préconisées sont élevées et donc difficiles à mettre en œuvre pratiquement, et elles soulèvent des questions de contamination environnementale.

Sans entrer dans le détail des besoins spécifiques en minéraux, qu'il s'agisse de leur quantité totale (brute) ou de leur fraction réellement assimilable par l'organisme, il est conseillé de se baser sur des normes globales de National Research Council (NRC, 2021), qui recommande pour des vaches en état de stress thermique des teneurs dans la ration (en % de la matière sèche) de 1,5 % de potassium, 0,5 % de sodium et 0,35 % de magnésium ainsi qu'un apport en calcium de l'ordre de 1 %. Les suppléments minéraux riches en potassium et en sodium doivent être réservés aux vaches en lactation. Leur distribution aux vaches tarées est déconseillée, car un apport excessif en sel ou en potassium peut augmenter le risque d'œdème du pis pendant la période de tarissement.

Les résultats relatifs aux suppléments minéralo-vitaminiques en situation de stress thermique rapportés chez les ruminants sont assez variables, malgré des décennies de recherches. Cela souligne la complexité des interactions entre les minéraux, les vitamines et les mécanismes d'adaptation au stress thermique, ainsi que la nécessité d'adapter les recommandations en fonction des conditions spécifiques. Min *et al.* (2019) dans leur revue ont rapporté des résultats relativement modestes de suppléments en zinc, en sélénium, en vitamine A, en niacine, et ce à des doses généralement élevées, difficilement abordables d'un point de vue économique. Plusieurs études ont rapporté des effets positifs de mixtures minéralo-vitaminiques et antioxydantes sur les performances de ruminants, telles celle de Seijan *et al.* (2010) sur la brebis, les animaux supplémentés (avec 2 % de mixture par kg de matière sèche) montrant de plus faibles taux de cortisol, une hormone sécrétée en réponse au stress.

L'augmentation du stress oxydatif et les modifications métaboliques observées lors d'un stress thermique semblent également atténuées par un apport supplémentaire en oligoéléments (cuivre, zinc, sélénium) et en vitamines (A, B, D, et E) (Guo *et al.*, 2018 ; Khare *et al.*, 2018 ; Ruiz-González *et al.*, 2023). Ruiz-González *et al.* (2023)

ont observé qu'une supplémentation en vitamine D3 (+300 %) et en calcium (+31 %) améliorait les marqueurs de l'inflammation chez des vaches soumises à un stress thermique, et ce, que ces vaches aient ou non reçu un supplément en sélénium et en vitamine E.

Le défaut de ces approches holistiques est qu'elles ne permettent pas de discriminer les effets propres à chaque nutriment. Il est difficile de tirer des conclusions définitives des différentes études relatives à la supplémentation minéralo-vitaminique des bovins en situation de stress thermique. Une approche robuste nécessiterait d'effectuer des méta-analyses. Néanmoins, il semble raisonnable de recommander un doublement des apports en minéraux, oligoéléments et vitamines par rapport aux normes visant des animaux en situation de thermoneutralité.

Additifs alimentaires

Le recours à des additifs alimentaires, notamment les levures et autres probiotiques, peut, en cas de stress thermique, soutenir le métabolisme. Ces additifs consistent en des solutions tampons, propylène glycol ou glycérol. L'ajout de propylène glycol ou de glycérol dans la ration favorise la synthèse de propionate au niveau du rumen et améliore ce faisant la production de glucose sans augmenter les fermentations. Les doses efficaces sont de 300 g de propylène ou 500 g de glycérol par jour (Lomander *et al.*, 2012 ; Liu *et al.*, 2014).

Les antioxydants neutralisent les radicaux libres générés lors de périodes de stress thermique, et exercent des effets anti-inflammatoires. Des tels effets sont associés à certains acides organiques (citrique et sorbique) et extraits de plantes (thymol et vanilline) (Fontoura *et al.*, 2022), mais également aux pigments (caroténoïdes, xanthophylles), polyphénols, tanins, oligoéléments (surtout le sélénium), (pro-)vitamines (β -carotène, vitamines A, C, E) et aux cocktails les contenant (Gessner *et al.*, 2016 ; Huang et Xu, 2018 ; Liu *et al.*, 2013 ; Sun *et al.*, 2019).

■ APPROCHES GÉNÉTIQUES

Sélection génétique classique

Les preuves phénotypiques et génotypiques de la thermotolérance sont de natures diverses. Les animaux thermotolérants présentent lors de stress thermiques une température de surface de la peau plus élevée, une température rectale plus basse et une diminution moindre de leur production laitière (Garner *et al.*, 2016). Les zébus sont les bovins ayant la plus grande surface cutanée par rapport à leur poids, les poils les plus courts et les plus clairs, la peau la plus pigmentée et davantage vascularisée, le nombre et la taille des glandes sudoripares plus élevés (Landaeta-Hernández *et al.*, 2011 ; Riley *et al.*, 2012). Les embryons des zébus (Nelore, Brahman, Gyr) sont davantage thermotolérants que ceux des taurins (Holstein, Angus) (Block *et al.*, 2002 ; Eberhardt *et al.*, 2009). La fertilité des taurins de race Wagyu ne semble pas être modifiée par un stress thermique (Wallage *et al.*, 2017).

Certaines stratégies de croisement permettent d'améliorer la résistance des bovins au stress thermique. Par exemple, en Tanzanie, les vaches issues d'un croisement entre Holstein Friesian et zébu s'adaptent mieux à la chaleur. Celles ayant un patrimoine génétique composé à parts égales de Holstein Friesian et de zébu (50 % – 50 %) résistent mieux aux températures élevées et maintiennent une meilleure production laitière que celles ayant 75 % de Holstein Friesian et 25 % de zébu. Cela illustre l'intérêt des croisements pour permettre l'adaptation des animaux aux conditions climatiques difficiles tout en optimisant leur production.

Les études sur l'ADN mitochondrial ont démontré que les espèces taurines et les zébus possèdent des capacités de résistance au stress

thermique différentes (Hansen, 2004 ; Souza-Cacares *et al.*, 2019). De plus, les variations génomiques impliquées dans l'adaptabilité des bovins indigènes africains (Kim *et al.*, 2017) et d'autres populations bovines (Shen *et al.*, 2020) sont de plus en plus étudiées. Ces connaissances, combinant preuves phénotypiques et génotypiques, ouvrent des perspectives pour la sélection et l'amélioration des races bovines face aux contraintes climatiques, notamment à travers des programmes de croisement ciblés.

L'existence d'une variabilité génétique pour la tolérance à la chaleur permet d'envisager ce paramètre comme critère de sélection (Bernabucci *et al.*, 2014 ; Campos *et al.*, 2022 ; Nguyen *et al.*, 2016). L'héritabilité est un indice qui exprime la proportion de la variation d'un caractère dans une population qui est attribuable à des facteurs génétiques plutôt qu'à des influences environnementales. Une héritabilité de 0,17 à 0,30 pour la température rectale chez la vache laitière (Dikmen *et al.*, 2013) et de 0,19 chez les bovins à viande (Riley *et al.*, 2012) signifie qu'une partie de la variabilité individuelle de ce trait est due à la génétique, tandis que le reste est influencé par l'environnement. Elle est nettement plus élevée que celle de la fréquence respiratoire (0,06) et du score de bave (0,03) (Luo *et al.*, 2022). Ce dernier est un indicateur comportemental utilisé pour évaluer l'impact du stress thermique chez les bovins. Il est basé sur l'observation de l'accumulation de salive autour de la bouche de l'animal, un phénomène qui augmente avec la chaleur excessive. Une faible héritabilité de ce score (0,03 selon Luo *et al.*, 2022) signifie que ce caractère est principalement influencé par l'environnement plutôt que par des facteurs génétiques. Concernant le taux protéique et le seuil de THI mentionnés, le THI est un indice combinant température et humidité pour quantifier le stress thermique ressenti par les bovins. Une héritabilité du taux protéique entre 0,14 et 0,16 lorsque le THI est supérieur à 62 indique que la variabilité de cette caractéristique est en partie génétique, mais également influencée par le stress thermique. Ainsi, la sélection génétique pourrait permettre d'améliorer la tolérance des vaches à la chaleur tout en maintenant leur production laitière et sa composition.

Le rendement en matières grasses, dont l'héritabilité reste stable à 0,17 (Campos *et al.*, 2022), montre que ce caractère est modérément transmissible et moins sensible aux variations environnementales. En revanche, chez les races laitières tropicales, l'héritabilité de la production laitière et des indicateurs de santé comme le nombre de cellules somatiques diminue sous stress thermique (Sungkhapreecha *et al.*, 2022), ce qui souligne l'importance des conditions climatiques sur les performances des animaux.

Les méthodes de modélisation par régression linéaire (Carabaño *et al.*, 2019 ; Ravagnolo & Misztal, 2000) permettent de déterminer le seuil de thermoneutralité ainsi que la pente de déclin de la production laitière au-delà d'un seuil de stress thermique (Bernabucci *et al.*, 2014 ; Carabaño *et al.*, 2019). Une sélection basée sur la thermotolérance dans la race Holstein entraîne une augmentation de la production laitière de 0,004 kg par unité de THI, ainsi qu'une augmentation de la production de matières grasses et de protéines de l'ordre de 0,013 kg par unité de THI (Nguyen *et al.*, 2016). Cependant, il peut y avoir une relation antagoniste entre le niveau de production laitière et la tolérance à la chaleur (Campos *et al.*, 2022). Ainsi, la sélection pour la tolérance au stress thermique s'accompagnerait d'une réduction de performances économiquement importantes, notamment la production laitière et de viande, mais aussi la croissance, la fertilité et l'efficacité (Nguyen *et al.*, 2016). L'orientation de la sélection à partir de caractères de robustesse globale (Nardone *et al.*, 2010) ou de modèles multitraits incluant les indicateurs généraux de résistance, dont la tolérance à la chaleur, aux maladies, aux parasites et la capacité d'adaptation aux conditions d'élevage, constituerait une alternative intéressante (Cheruiyot *et al.*, 2022).

Sélection assistée par marqueurs génétiques

La sélection assistée par marqueurs génétiques (SAM) repose sur l'identification et l'utilisation de marqueurs génétiques spécifiques liés à la thermotolérance. Elle permet de surmonter les difficultés des évaluations phénotypiques, offrant ainsi une sélection plus précise et réduisant le temps nécessaire pour obtenir des résultats.

Des découvertes récentes ont permis d'identifier des parties spécifiques du génome des vaches laitières qui jouent un rôle essentiel dans leur capacité à tolérer la chaleur (Kim *et al.*, 2022). Les gènes impliqués dans la régulation de la réponse au stress thermique concernent les stress oxydatif ou osmotique, la transpiration, la couleur du poil ou de la peau, la capacité d'ingestion, la reproduction ou encore les protéines de choc thermique (*heat-shock proteins* ou HSP), les interleukines, les chimiokines et les facteurs de croissance des fibroblastes, toutes ces protéines étant largement impliquées dans les réponses immunologiques et inflammatoires des animaux aux environnements difficiles (Osei-Amponsah *et al.*, 2019 ; Taye *et al.*, 2017).

Le gène *Slick* a particulièrement suscité l'intérêt des chercheurs. Situé sur le chromosome 20 chez des races spécifiques comme la Sénépol et le Red Angus, il se distingue par son rôle majeur dans la régulation de la tolérance à la chaleur (Olson *et al.*, 2003). Associé à des caractéristiques physiques favorables telles qu'un pelage lisse et des poils plus courts que ceux des bovins ne possédant pas le gène *Slick*, ce gène est lié à une synthèse accrue de HSP, améliorant ainsi la thermorégulation chez les bovins (Souza-Cacares *et al.*, 2019). Ses implications positives s'étendent à d'autres traits, notamment l'efficacité alimentaire, le persillage du bœuf, la production laitière et l'intervalle entre vêlages (de Camargo *et al.*, 2022 ; Dikmen *et al.*, 2014 ; Patiño Chaparro, 2016). Le sperme de taureaux porteurs de ce gène est disponible. Des croisements ont été réalisés aux USA et en Nouvelle-Zélande entre des taureaux homozygotes pour le gène *Slick* et des races locales laitières ou à viande (Hansen, 2020 ; Davis *et al.*, 2017 ; Sanchez *et al.*, 2009). Les descendants de ces croisements ont présenté des températures corporelles plus stables et une baisse moins prononcée de la production laitière en conditions chaudes (Ortiz-Colón *et al.*, 2018). Dans le cadre de la Sélection Assistée par Marqueurs (SAM), il reste cependant à trouver le meilleur compromis entre une résistance accrue à la chaleur et une productivité optimale (Berman, 2011 ; Carabaño *et al.*, 2019).

Les HSP jouent un rôle crucial dans la préservation de l'homéostasie cellulaire face au stress thermique (Bagath *et al.*, 2019 ; Efimova *et al.*, 2020 ; Mariana *et al.*, 2020). Leurs effets protecteurs de la cellule sont susceptibles d'améliorer la tolérance à la chaleur et la productivité des bovins laitiers.

D'autres gènes, tels que ceux codant pour la sous-unité alpha-1 of the sodium/potassium-transporting ATPase (Na⁺/K⁺ pump)(ATP1A1), Eukaryotic translation initiation factor 2-alpha kinase 4 (EIF2AK4), Heat shock protein family A (Hsp70) member 1A (HSPA1A), Peroxisome proliferator-activated receptor alpha (PPAR- α) et Acetyl-CoA carboxylase (ACACA), sont également impliqués dans la régulation de la tolérance à la chaleur chez les bovins, ce qui permet d'enrichir notre compréhension des mécanismes moléculaires de cette adaptation (Do Amaral *et al.*, 2009 ; Bionaz *et al.*, 2013 ; Kerekoppa *et al.*, 2015 ; Wang *et al.*, 2019).

Il est important de souligner que la recherche dans ce domaine évoluant constamment, de nouvelles découvertes sont à prévoir. La mise en œuvre réussie de la SAM pour la thermotolérance chez les bovins dépendra de la disponibilité de données génomiques, des ressources humaines et financières allouées, et de l'engagement de l'industrie de l'élevage à adopter ces approches innovantes. Ces découvertes ouvrent la voie à des stratégies de sélection prometteuses combinant l'évaluation des performances pendant des périodes de chaleur intense avec l'utilisation de la sélection assistée par des marqueurs génétiques.

Flux génétique

L'introgession génomique naturelle est le processus par lequel des gènes de tolérance à la chaleur sont échangés entre les populations de bovins dont la thermotolérance est différente. Ce phénomène a été observé chez les bovins de race Hereford dans différentes régions écologiques aux États-Unis, incluant les zones arides, chaudes et humides, fraîches et arides, fraîches et humides, ainsi que les zones de transition. Il est apparu que les taux d'introgession les plus élevés s'observent entre les bovins des régions fraîches et arides et les bovins des régions fraîches et humides (Blackburn *et al.*, 2017).

Génie génétique

La technique *Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats/Cas9* (CRISPR/Cas9) permet de modifier une séquence spécifique de l'ADN du génome en la coupant au moyen d'une enzyme (Cas9). Cette technique offre des opportunités remarquables pour améliorer la production laitière, la reproduction, la résistance aux maladies, et le bien-être animal dans des conditions environnementales spécifiques (Tyagi *et al.*, 2020 ; Laible *et al.*, 2021). Elle a permis de désactiver le gène NANOS2 (NANOS2-knockout), essentiel à la différenciation des cellules germinales mâles. Cette modification (NANOS2-knockout) engendre des mâles dépourvus de spermatogonies tout en préservant le développement testiculaire, ce qui ouvre des perspectives en sélection et en reproduction assistée. Les animaux ainsi modifiés sont reconnus par les associations d'élevage (RAAA 2021 ; Camargo *et al.*, 2022).

La technique est mise à profit pour créer des embryons homozygotes *Slick*. Les animaux issus de ces embryons peuvent ensuite être choisis pour s'accoupler avec des vaches élevées dans des régions où le stress thermique est élevé (Camargo, 2022).

■ GESTION DE LA REPRODUCTION

Diverses revues de littérature ont analysé les effets potentiels du transfert d'embryons et des traitements hormonaux pour compenser les effets négatifs du stress thermique sur les performances de reproduction (da Silva *et al.*, 2023 ; Ferag *et al.*, 2024a ; 2024b ; Ahmad Para *et al.*, 2020 ; Sammad *et al.*, 2019). Ces méthodes constituent des stratégies complémentaires à celles visant à améliorer la qualité de la détection des chaleurs ou les conditions de logement des animaux.

Transfert d'embryons

Le transfert d'embryons a été envisagé pour cirvenir les effets négatifs du stress thermique sur les ovocytes, l'ovulation et les embryons âgés de moins d'une semaine (Drost *et al.*, 1999 ; Hansen, 2007 ; Krininger *et al.*, 2002 ; Sakatani *et al.*, 2003). Il trouve également un autre champ d'application dans le traitement des vaches infertiles (Nowicki *et al.*, 2021).

D'une manière générale, les pourcentages de gestation observés après le transfert d'un embryon sont comparables en saison froide et en saison chaude, conséquence logique du fait que les embryons, une fois atteint le stade de blastocyste, sont davantage capables de résister à un stress thermique (Drost *et al.*, 1999 ; Stewart *et al.*, 2011 ; Vasconcelos *et al.*, 2011 ; Vieira *et al.*, 2014). De même, les pourcentages de gestation sont plus élevés en saison chaude après le transfert d'un embryon qu'après une insémination (Rodrigues *et al.*, 2010 ; Stewart *et al.*, 2011).

Le recours au transfert d'embryons comme stratégie de lutte contre l'infertilité des vaches durant les périodes de stress thermique implique la prise en compte de plusieurs facteurs, tels que l'état physiologique des animaux (vaches en lactation ou non, génisses), les

capacités thermorégulatrices et l'impact du métabolisme sur la reproduction. Tout d'abord, la production *in vivo* d'embryons de qualité est généralement plus faible chez les vaches laitières en lactation que chez celles qui ne le sont pas ou chez les génisses (Chebel *et al.*, 2008 ; Vieira *et al.*, 2014). Ensuite, cette différence pourrait s'expliquer par l'augmentation du métabolisme des vaches en lactation, qui modifie leurs capacités thermorégulatrices (Berman *et al.*, 1985 ; Ferreira *et al.*, 2011 ; Sartori *et al.*, 2002). Enfin, l'impact négatif de la production laitière sur la fertilité s'observe davantage après une insémination qu'après un transfert d'embryon (Al-Katanani *et al.*, 2002 ; Chebel *et al.*, 2008 ; Demetrio *et al.*, 2007).

La meilleure résistance au stress thermique des zébus par rapport aux taurins explique les meilleurs résultats observés lors de production d'embryons *in vivo* et *in vitro* (Hansen, 2004 ; Paula-Lopes *et al.*, 2003 ; Silva *et al.*, 2013 ; Watanabe *et al.*, 2017). Ces différences entre taurins et zébus s'expliqueraient par la présence de gènes spécifiques qui contribuent à renforcer la thermotolérance du zébu (Hansen, 2019a). La sélection plus spécifique de vaches porteuses de ces gènes impliqués dans la thermotolérance constituerait une solution alternative intéressante (Barendse, 2017 ; Baruselli *et al.*, 2020).

La production d'embryons *in vitro* multiplie par 4,4 le nombre d'embryons transférables obtenus sur une période de 60 jours par rapport à la production d'embryons *in vivo*, ce nombre passant de 4,3 à 18,8 (Bousquet *et al.*, 1999). Cela représente une solution pour constituer un stock d'embryons pouvant être transférés en période de stress thermique. Une étude récente sur le transfert d'embryons obtenus *in vitro* a montré que le stress thermique avait un impact moindre sur le taux de gestation des génisses par rapport aux vaches. Après transfert d'embryons, le taux de gestation observé chez les génisses variait de 23,8 % à 74,1 %, tandis que chez les vaches, il fluctuait entre 16,3 % et 46,7 %, en fonction des conditions expérimentales et des niveaux de stress thermique (Nishisozu *et al.*, 2023).

Le transfert durant la saison chaude d'embryons récoltés durant la saison froide s'accompagne d'une augmentation du pourcentage de gestation, surtout si l'embryon est transféré au stade de blastocyste plutôt que de morula. Cependant, la congélation nécessaire à cette stratégie peut atténuer ces bénéfices (Bo *et al.*, 2019 ; Negron-Pérez *et al.*, 2019 ; Sakatani, 2017). De même, le transfert d'embryons obtenus *in vitro* présente également certaines limites, notamment en raison de leur sensibilité aux conditions de congélation et de transfert (Mogas, 2018). La production d'embryons *in vitro* offre un intérêt supplémentaire par le fait que le recours à du sperme sexé engendre dans ce cas davantage d'embryons transférables que si ce sperme est utilisé pour assurer la fécondation d'embryons produits *in vivo* (Soares *et al.*, 2011). Les effets d'un recours à des antioxydants lors de la production d'embryons *in vitro* (vitamine E) ou *in vivo* (bêta-carotène, mélatonine) mériteraient des analyses complémentaires (Hansen, 2019b).

Considérant les effets négatifs du stress thermique sur les manifestations œstrales (Nebel *et al.*, 1997) et la cyclicité des vaches receveuses (Torres-Junior *et al.*, 2008), il est envisageable d'optimiser leur nombre en recourant à un protocole de synchronisation à base de progestérone, de gonadolibérine (GnRH), de gonadotrophine chorionique équine (eCG) et de prostaglandine F2 α (PGF2 α) (Baruselli *et al.*, 2010 ; Bo *et al.*, 2002). Ce protocole permet d'augmenter sensiblement le pourcentage de gestation (29,3 % vs 16,2 %) (Rodrigues *et al.*, 2010).

Traitements hormonaux

L'utilisation de traitements hormonaux de synchronisation pour réaliser des inséminations programmées constitue une alternative afin de compenser les effets négatifs du stress thermique sur la qualité de la détection des chaleurs, la croissance folliculaire et la libération de

l'hormone lutéinisante (LH) (Negron-Pérez *et al.*, 2019 ; Carvalho *et al.*, 2018 ; de la Sota *et al.*, 1998).

Une injection de GnRH 2 à 3 heures après le début de l'œstrus (Kaim, 2003 ; Ullah *et al.*, 1996) ou 5 à 15 jours après l'insémination (Lopez-Gatius *et al.*, 2006 ; Willard *et al.*, 2003) augmente le pourcentage de gestation chez les vaches soumises à un stress thermique. L'absence d'effets a cependant été rapportée par plusieurs études lors d'inséminations (Franco *et al.*, 2006 ; Santos *et al.*, 2016 ; Schmitt *et al.*, 1996) ou de transfert d'embryons (Vasconcelos *et al.*, 2011). L'induction de trois vagues folliculaires successives au moyen d'une association de GnRH et de PGF2 α , permet d'éliminer le stock de follicules de moindre qualité formés durant une période de stress thermique et assure une récupération plus rapide d'une folliculogénèse normale. C'est précisément cet effet qui constitue l'objectif des programmes hormonaux de pré-synchronisation (Friedman *et al.*, 2012 ; 2014) ou de la ponction répétée des follicules dominants qui induit l'émergence plus rapide de follicules n'ayant pas subi les effets du stress thermique (Roth *et al.*, 2001).

L'injection d'hCG au 5^e jour suivant l'insémination n'a pas d'effet (Schmitt *et al.*, 1996) ou se traduit par une augmentation du pourcentage de gestation à la fois en été et en hiver (Shabankareh *et al.*, 2010), voire uniquement en été (Beltran & Vasconcelos, 2008), mais cet effet ne concerne que les primipares (Zolini *et al.*, 2019).

L'administration de somatotropine, connue pour augmenter la concentration en « insulin-like growth factor 1 » (IGF1) dont on sait qu'elle est capable d'augmenter la résistance des embryons au choc thermique (Jousan & Hansen, 2007), n'a cependant pas d'effet sur la fertilité en période estivale (Wolfenson & Roth, 2018).

L'administration de progestérone au moyen d'un dispositif de libération contrôlée (controlled internal drug release dispenser CIDR) améliore la fertilité de vaches inséminées en période de stress thermique (Friedman *et al.*, 2012 ; 2014 ; Garcia-Ispuerto *et al.*, 2014 ; Pancarci *et al.*, 2002 ; Roth *et al.*, 2022). Cette amélioration s'observe davantage chez les vaches présentant un score corporel moindre ou des pathologies du postpartum (Shiff *et al.*, 2018).

■ CONCLUSION

Dans cette revue de littérature, nous avons exploré les principales stratégies à envisager pour atténuer les effets du stress thermique sur les vaches laitières. Ces stratégies se déclinent en plusieurs axes complémentaires : protéger les animaux en améliorant leur environnement avec des infrastructures adaptées, telles que l'ombrage et la ventilation ; adopter de bonnes pratiques d'élevage pour réduire le stress thermique, comme l'ajustement des rations et des horaires d'alimentation ; atténuer les conséquences du stress thermique sur la santé et la productivité des animaux par des compléments alimentaires et des soins appropriés ; et pallier les perturbations reproductives grâce à des interventions techniques, notamment hormonales. À plus long terme, il est essentiel d'adapter les systèmes d'élevage en intégrant des objectifs de production durable, la sélection génétique d'animaux plus résistants et des modes d'élevage résilients. La combinaison de ces stratégies, accompagnée d'analyses coût-bénéfice, est indispensable pour garantir la durabilité et la rentabilité des élevages face aux changements climatiques.

Remerciements

Nos remerciements s'adressent aux collègues qui ont participé à la rédaction de cet article ainsi qu'au personnel de la *Revue d'élevage et 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

DEG, JFC, JLH et CH ont participé à la conception et à la rédaction du présent travail.

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

- Abreu, A. S., Fischer, V., Stumpf, M. T., McManus, C. M., González, F. H. D., Da Silva, J. B. S., & Heisler, G. (2020). Natural tree shade increases milk stability of lactating dairy cows during the summer in the subtropics. *Journal of Dairy Research*, 87(4), 444–447. <https://doi.org/10.1017/S002202920000916>
- Aggarwal, A., & Upadhyay, R. (2012). Shelter management for alleviation of heat stress in cows and buffaloes. *Heat Stress and Animal Productivity*, 169-183. https://doi.org/10.1007/978-81-322-0879-2_7
- Ahmad Para, I., Ahmad Dar, P., Ahmad Malla, B., Punetha, M., Rautela, A., Maqbool, I., Mohd, A., *et al.* (2018). Impact of heat stress on the reproduction of farm animals and strategies to ameliorate it. *Biological Rhythm Research*, 51(4), 616-632. <https://doi.org/10.1080/09291016.2018.1548870>
- Al-Katanani, Y., Drost, M., Monson, R., Rutledge, J., Krininger, C., Block, J., Thatcher, W., & Hansen, P. (2002). Pregnancy rates following timed embryo transfer with fresh or vitrified in vitro produced embryos in lactating dairy cows under heat stress conditions. *Theriogenology*, 58(1), 171-182. [https://doi.org/10.1016/S0093-691X\(02\)00916-0](https://doi.org/10.1016/S0093-691X(02)00916-0)
- Alamer, M. (2009). Effect of water restriction on lactation performance of Aardi goats under heat stress conditions. *Small Ruminant Research*, 84(1-3), 76-81. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2009.06.009>
- An-Qiang, L., Zhi-Sheng, W., & An-Guo, Z. (2009). Effect of chromium picolinate supplementation on early lactation performance, rectal temperatures, respiration rates and plasma biochemical response of Holstein cows under heat stress. *Pakistan Journal of Nutrition*, 8, 940-945.
- Avendaño-Reyes, L., Álvarez-Valenzuela, F., Correa-Calderón, A., Algáandar-Sandoval, A., Rodríguez-González, E., Pérez-Velázquez, R., Macías-Cruz, U., *et al.* (2010). Comparison of three cooling management systems to reduce heat stress in lactating Holstein cows during hot and dry ambient conditions. *Livestock Science*, 132(1-3), 48-52. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2010.04.020>
- Bagath, M., Krishnan, G., Devaraj, C., Rashamol, V., Pragna, P., Lees, A., & Sejian, V. (2019). The impact of heat stress on the immune system in dairy cattle: A review. *Research in Veterinary Science*, 126, 94-102. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2019.08.011>
- Barendse, W. (2017). Climate adaptation of tropical cattle. *Annual Review of Animal Biosciences*, 5(1), 133-150. <https://doi.org/10.1146/annurev-animal-022516-022921>
- Baruselli, P. S., Ferreira, R. M., Filho, M. F., Nasser, L. F., Rodrigues, C. A., & Bó, G. A. (2010). Bovine embryo transfer recipient synchronisation and management in tropical environments. *Reproduction, Fertility and Development*, 22(1), 67. <https://doi.org/10.1071/rd09214>

- Baruselli, P. S., Ferreira, R. M., Vieira, L. M., Souza, A. H., Bó, G. A., & Rodrigues, C. A. (2020). Use of embryo transfer to alleviate infertility caused by heat stress. *Theriogenology*, 155, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2020.04.028>
- Bastian, K. R., Gebremedhin, K. G., & Scott, N. R. (2003). A finite difference model to determine conduction heat loss to a water-filled mattress for dairy cows. *Transactions of the ASAE*, 46(3). <https://doi.org/10.13031/2013.13592>
- Becker, C., & Stone, A. (2020). Graduate student literature review: Heat abatement strategies used to reduce negative effects of heat stress in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 103(10), 9667-9675. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-18536>
- Beltran, M., & Vasconcelos, J. (2008). Conception rate in Holstein cows treated with GnRH or hCG on the fifth day post artificial insemination during summer. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, 60(3), 580-586. <https://doi.org/10.1590/s0102-09352008000300009>
- Berman, A., & Horovitz, T. (2012). Radiant heat loss, an unexploited path for heat stress reduction in shaded cattle. *Journal of Dairy Science*, 95(6), 3021-3031. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4844>
- Berman, A. (2011). Invited review: Are adaptations present to support dairy cattle productivity in warm climates? *Journal of Dairy Science*, 94(5), 2147-2158. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-3962>
- 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. *Journal of Dairy Science*, 68(6), 1488-1495. [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(85\)80987-5](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(85)80987-5)
- Bernabucci, U., Biffani, S., Buggiotti, L., Vitali, A., Lacetera, N., & Nardone, A. (2014). The effects of heat stress in Italian Holstein dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 97(1), 471-486. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-6611>
- Bionaz, M., Chen, S., Khan, M. J., & Loor, J. J. (2013). Functional role of PPARs in ruminants: Potential targets for fine-tuning metabolism during growth and lactation. *PPAR Research*, 684159, 1-28. <https://doi.org/10.1155/2013/684159>
- Bin-Jumah, M., Abd El-Hack, M. E., Abdelnour, S. A., Hendy, Y. A., Ghanem, H. A., Alsafy, S. A., Khafaga, A. F., et al. (2020). Potential use of chromium to combat thermal stress in animals: A review. *Science of The Total Environment*, 707, 135996. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135996>
- Blackburn, H. D., Krehbiel, B., Ericsson, S. A., Wilson, C., Caetano, A. R., & Paiva, S. R. (2017). A fine structure genetic analysis evaluating ecoregional adaptability of a *Bos Taurus* breed (Hereford). *PLOS ONE*, 12(5), e0176474. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176474>
- Blackshaw, J., & Blackshaw, A. (1994). Heat stress in cattle and the effect of shade on production and behaviour: A review. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 34(2), 285-295. <https://doi.org/10.1071/ea9940285>
- Bland, I. M., DiGiacomo, K., Williams, S. R. O., Leury, B. J., Dunshea, F. R., Moate, P. J. (2013, April 17). The use of infra-red thermography to measure flank temperatures of dairy cows fed wheat- or maize-based diets. In: Proceedings of the British Society of Animal Science Annual Conference; Nottingham, UK, 182 p.
- Block, J., Chase, C. C. Jr., Hansen, P. J. 2002. Inheritance of resistance of bovine preimplantation embryos to heat shock: relative importance of the maternal vs paternal contribution. *Molecular Reproduction and Development*, 63, 32-37. <https://doi.org/10.1002/mrd.10160>
- Bó, G., Baruselli, P., Moreno, D., Cutaia, L., Caccia, M., Tríbulo, R., Tríbulo, H., et al. (2002). The control of follicular wave development for self-appointed embryo transfer programs in cattle. *Theriogenology*, 57(1), 53-72. [https://doi.org/10.1016/s0093-691x\(01\)00657-4](https://doi.org/10.1016/s0093-691x(01)00657-4)
- Bonnefoy, J. M., & Noordhuizen, J. (2011). Maîtriser le stress thermique chez la vache laitière. *Bulletin des groupements techniques vétérinaires*, 60(1), 77-86.
- Bouglé, L. (2022). Rrafraichissement des vaches en période chaude à l'aide d'un matelas de logette à eau refroidie : effets sur l'incidence et la persistance des boiteries et la production laitière de vaches laitières hautes productrices. [Thèse de doctorat, Oniris - École nationale vétérinaire de Nantes, agroalimentaire et de l'alimentation], HAL open science. <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03857898v1/file/N-2022-061.pdf>
- Bousquet, D., Twagiramungu, H., Morin, N., Brisson, C., Carboneau, G., & Durocher, J. (1999). *In vitro* embryo production in the cow: An effective alternative to the conventional embryo production approach. *Theriogenology*, 51(1), 59-70. [https://doi.org/10.1016/s0093-691x\(98\)00231-3](https://doi.org/10.1016/s0093-691x(98)00231-3)
- Camargo, L. S., Saraiva, N. Z., Oliveira, C. S., Carmickle, A., Lemos, D. R., Siqueira, L. G., & Denicol, A. C. (2022). Perspectives of gene editing for cattle farming in tropical and subtropical regions. *Animal Reproduction*, 19(4). <https://doi.org/10.1590/1984-3143-ar2022-0108>
- Campos, I. L., Chud, T. C., Junior, G. A., Baes, C. F., Cánovas, Á., & Schenkel, F. S. (2022). Estimation of genetic parameters of heat tolerance for production traits in Canadian holsteins cattle. *Animals*, 12(24), 3585. <https://doi.org/10.3390/ani12243585>
- Carvalho, P., Santos, V., Giordano, J., Wiltbank, M., & Fricke, P. (2018). Development of fertility programs to achieve high 21-day pregnancy rates in high-producing dairy cows. *Theriogenology*, 114, 165-172. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2018.03.037>
- Carabaño, M. J., Ramón, M., Menéndez-Buxadera, A., Molina, A., & Díaz, C. (2019). Selecting for heat tolerance. *Animal Frontiers*, 9(1), 62-68. <https://doi.org/10.1093/af/vfy033>
- Chaiyabutr, N., Buranakarl, C., Muangcharoen, V., Loypetjra, P., & Pichaicharnarong, A. (1987). Effects of acute heat stress on changes in the rate of liquid flow from the rumen and turnover of body water of swamp buffalo. *The Journal of Agricultural Science*, 108(3), 549-553. <https://doi.org/10.1017/s0021859600079934>
- Chebel, R., Demétrio, D., & Metzger, J. (2008). Factors affecting success of embryo collection and transfer in large dairy herds. *Theriogenology*, 69(1), 98-106. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2007.09.008>
- Chen, S., Wang, J., Peng, D., Li, G., Chen, J., & Gu, X. (2018). Exposure to heat-stress environment affects the physiology, circulation levels of cytokines, and microbiome in dairy cows. *Scientific Reports*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32886-1>
- Cheruiyot, E. K., Haile-Mariam, M., Cocks, B. G., & Pryce, J. E. (2022). Improving Genomic selection for heat tolerance in dairy cattle: Current opportunities and future directions. *Frontiers in Genetics*, 13. <https://doi.org/10.3389/fgene.2022.894067>
- Collier, R., Eley, R., Sharma, A., Pereira, R., & Buffington, D. (1981). Shade management in subtropical environment for milk yield and composition in Holstein and Jersey cows. *Journal of Dairy Science*, 64(5), 844-849. [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(81\)82656-2](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(81)82656-2)
- Coon, R., Duffield, T., & DeVries, T. (2018). Effect of straw particle size on the behavior, health, and production of early-lactation dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 101(7), 6375-6387. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13920>
- Cummins, K. (1998). Bedding plays role in heat abatement. *Dairy Herd Management*, 35(6), 20.
- CVB Table Booklet Feeding of Ruminants. 2022. Nutrient requirements for cattle, sheep and goats and nutritional values of feeding ingredients for ruminants. CVB-series no 66; Stichting CVB, Lelystad, the Netherlands, 2022. Consulté en janvier 2024 sur <https://fr.scribd.com/document/735837153/Cvb-Table-Booklet-Feeding-of-Ruminants-2022>
- Da Silva, W. C., Silva, J. A., Camargo-Júnior, R. N., Silva, É. B., Santos, M. R., Viana, R. B., Silva, A. G., et al. (2023). Animal welfare and effects of per-female stress on male and cattle reproduction—A review. *Frontiers in Veterinary Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1083469>
- Das, R., Sailo, L., Verma, N., Bharti, P., Saikia, J., Imtiwati, & Kumar, R. (2016). Impact of heat stress on health and performance of dairy animals: A review. *Veterinary World*, 9(3), 260-268. <https://doi.org/10.14202/vet-world.2016.260-268>
- Davis, S. R., Spelman, R. J., & Littlejohn, M. D. (2017). Breeding and genetics Symposium: Breeding heat tolerant dairy cattle: The case for introgression of the "Slick" prolactin receptor variant into *Bos Taurus* dairy breeds. *Journal of Animal Science*, 95(4), 1788-1800. <https://doi.org/10.2527/jas.2016.0956>
- De la Sota, R., Burke, J., Risco, C., Moreira, F., DeLorenzo, M., & Thatcher, W. (1998). Evaluation of timed insemination during summer heat stress in lactating dairy cattle. *Theriogenology*, 49(4), 761-770. [https://doi.org/10.1016/s0093-691x\(98\)00025-9](https://doi.org/10.1016/s0093-691x(98)00025-9)
- Demétrio, D., Santos, R., Demétrio, C., & Vasconcelos, J. M. (2007). Factors affecting conception rates following artificial insemination or embryo transfer in lactating Holstein cows. *Journal of Dairy Science*, 90(11), 5073-5082. <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0223>
- Dikmen, S., Cole, J. B., Null, D. J., & Hansen, P. J. (2013). Genome-wide association mapping for identification of quantitative trait loci for rectal temperature during heat stress in Holstein cattle. *PLoS ONE*, 8(7), e69202. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0069202>

- Dikmen, S., Khan, F., Huson, H., Sonstegard, T., Moss, J., Dahl, G., & Hansen, P. (2014). The SLICK hair locus derived from Senepol cattle confers thermotolerance to intensively managed lactating Holstein cows. *Journal of Dairy Science*, 97(9), 5508-5520. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8087>
- Do Amaral, B., Connor, E., Tao, S., Hayen, J., Bubolz, J., & Dahl, G. (2009). Heat-stress abatement during the dry period: Does cooling improve transition into lactation? *Journal of Dairy Science*, 92(12), 5988-5999. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2343>
- Drost, M., Ambrose, J., Thatcher, M., Cantrell, C., Wolfsdorf, K., Hasler, J., & Thatcher, W. (1999). Conception rates after artificial insemination or embryo transfer in lactating dairy cows during summer in Florida. *Theriogenology*, 52(7), 1161-1167. [https://doi.org/10.1016/s0093-691x\(99\)00208-3](https://doi.org/10.1016/s0093-691x(99)00208-3)
- Durosaro, S., Iyasere, O., Ilori, B., Oyeniran, V., & Ozoje, M. (2023). Molecular regulation, breed differences and genes involved in stress control in farm animals. *Domestic Animal Endocrinology*, 82, 106769. <https://doi.org/10.1016/j.domaniend.2022.106769>
- Eberhardt, B. G., Satrapa, R. A., Capinzaiki, C. R., Trinca, L. A., & Barros, C. M. (2009). Influence of the breed of bull (*Bos Taurus indicus* vs. *Bos Taurus Taurus*) and the breed of cow (*Bos Taurus indicus*, *Bos Taurus Taurus* and crossbred) on the resistance of bovine embryos to heat. *Animal Reproduction Science*, 114(1-3), 54-61. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2008.09.008>
- Efimova, I. O., Zagidullin, L. R., Khisamov, R. R., Akhmetov, T. M., Shaidullin, R. R., Tyulkin, S. V., & Gilmanov, K. K. (2020). Assessment on milk productivity and milk quality in cattle with different genotypes by HSP70.1 gene. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 604(1), 012016. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/604/1/012016>
- EFSA, European Food Safety Authority. (2024). Qualified presumption of safety (QPS): Microorganisms (MOs) in QPS. <https://www.efsa.europa.eu/en/applications/qps-assessment#:~:text=What%20does%20it%20mean%20if,have%20the%20same%20QPS%20status>
- Farooq, U., Samad, H. A., Shehzad, F., Qayyum, A. (2010). Physiological responses of cattle to heat stress. *World Applied Sciences Journal*, 8, 38-43.
- Ferag, A., Gherissi, D. E., Khenenou, T., Boughanem, A., Moussa, H. H., & Maamour, A. (2024a). Reproduction efficiency of native and imported Algerian cattle under challenging climatic conditions. *The 9th International Seminar (MCIBR) Management and Genetic Improvement of Biological Resources*, 13. <https://doi.org/10.3390/blsf2024036013>
- Ferag, A., Gherissi, D. E., Khenenou, T., Boughanem, A., Moussa, H. H., Kechroud, A. A., & Fares, M. A. (2024b). Heat stress effect on fertility of two imported dairy cattle breeds from different Algerian agro-ecological areas. *International Journal of Biometeorology*, 68(12), 2515-2529. <https://doi.org/10.1007/s00484-024-02761-y>
- Ferreira, R., Ayres, H., Chiaratti, M., Ferraz, M., Araújo, A., Rodrigues, C., Watanabe, Y., et al. (2011). The low fertility of repeat-breeder cows during summer heat stress is related to a low oocyte competence to develop into blastocysts. *Journal of Dairy Science*, 94(5), 2383-2392. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-3904>
- Fisher, A. D., Roberts, N., Bluett, S. J., Verkerk, G. A., & Matthews, L. R. (2008). Effects of shade provision on the behaviour, body temperature and milk production of grazing dairy cows during a New Zealand summer. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 51(2), 99-105. <https://doi.org/10.1080/00288230809510439>
- Fontoura, A., Javid, A., Sáinz de la Maza-Escolà, V., Salandy, N., Fubini, S., Grilli, E., & McFadden, J. (2022). Heat stress develops with increased total-tract gut permeability, and dietary organic acid and pure botanical supplementation partly restores lactation performance in Holstein dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 105(9), 7842-7860. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-21820>
- Fournel, S., Ouellet, V., & Charbonneau, E. (2017). Practices for alleviating heat stress of dairy cows in humid continental climates: A literature review. *Animals*, 7(5), 37. <https://doi.org/10.3390/ani7050037>
- Franco, M., Thompson, P., Brad, A., & Hansen, P. (2006). Effectiveness of administration of gonadotropin-releasing hormone at days 11, 14 or 15 after anticipated ovulation for increasing fertility of lactating dairy cows and non-lactating heifers. *Theriogenology*, 66(4), 945-954. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2005.12.014>
- Friedman, E., Roth, Z., Voet, H., Lavon, Y., & Wolfenson, D. (2012). Progesterone supplementation postinsemination improves fertility of cooled dairy cows during the summer. *Journal of Dairy Science*, 95(6), 3092-3099. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-5017>
- Friedman, E., Voet, H., Reznikov, D., Wolfenson, D., & Roth, Z. (2014). Hormonal treatment before and after artificial insemination differentially improves fertility in subpopulations of dairy cows during the summer and Autumn. *Journal of Dairy Science*, 97(12), 7465-7475. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-7900>
- García-Isperto, I., Tutusaús, J., & López-Gatius, F. (2014). Does *Coxiella burnetii* affect reproduction in cattle? A clinical update. *Reproduction in Domestic Animals*, 49(4), 529-535. <https://doi.org/10.1111/rda.12333>
- Garner, J. B., Douglas, M. L., Williams, S. R., Wales, W. J., Marett, L. C., Nguyen, T. T., Reich, C. M., et al. (2016). Genomic selection improves heat tolerance in dairy cattle. *Scientific Reports*, 6(1). <https://doi.org/10.1038/srep34114>
- Gessner, D. K., Ringseis, R., & Eder, K. (2016). Potential of plant polyphenols to combat oxidative stress and inflammatory processes in farm animals. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 101(4), 605-628. <https://doi.org/10.1111/jpn.12579>
- Ghassemi Nejad, J., Lohakare, J., Son, J., Kwon, E., West, J., & Sung, K. (2014). Wool cortisol is a better indicator of stress than blood cortisol in ewes exposed to heat stress and water restriction. *Animal*, 8(1), 128-132. <https://doi.org/10.1017/s1751731113001870>
- Gonzalez-Rivas, P. A., DiGiacomo, K., Giraldo, P. A., Leury, B. J., Cottrell, J. J., & Dunshea, F. R. (2017). Reducing rumen starch fermentation of wheat with three percent sodium hydroxide has the potential to ameliorate the effect of heat stress in grain-fed wethers. *Journal of Animal Science*, 95(12), 5547-5562. <https://doi.org/10.2527/jas2017.1843>
- Gonzalez-Rivas, P. A., Sullivan, M., Cottrell, J. J., Leury, B. J., Gaughan, J. B., & Dunshea, F. R. (2018). Effect of feeding slowly fermentable grains on productive variables and amelioration of heat stress in lactating dairy cows in a sub-tropical summer. *Tropical Animal Health and Production*, 50(8), 1763-1769. <https://doi.org/10.1007/s11250-018-1616-5>
- Guo, J., Gao, S., Quan, S., Zhang, Y., Bu, D., & Wang, J. (2018). Blood amino acids profile responding to heat stress in dairy cows. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 31(1), 47-53. <https://doi.org/10.5713/ajas.16.0428>
- Habimana, V., Nguluma, A. S., Nziku, Z. C., Ekine - Dzivenu, C. C., Morota, G., Mrode, R., & Chenyambuga, S. W. (2024). Heat stress effects on physiological and milk yield traits of lactating Holstein Friesian cross-breeds reared in Tanga region, Tanzania. *Animals*, 14(13), 1914. <https://doi.org/10.3390/ani14131914>
- Hansen, P. (2004). Physiological and cellular adaptations of zebu cattle to thermal stress. *Animal Reproduction Science*, 82-83, 349-360. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2004.04.011>
- Hansen, P. (2007). Exploitation of genetic and physiological determinants of embryonic resistance to elevated temperature to improve embryonic survival in dairy cattle during heat stress. *Theriogenology*, 68, S242-S249. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2007.04.008>
- Hansen, P. J. (2019). Reproductive physiology of the heat-stressed dairy cow: Implications for fertility and assisted reproduction. *Animal Reproduction*, 16(3), 497-507. <https://doi.org/10.21451/1984-3143-ar2019-0053>
- Hansen, P. J. (2020). Prospects for gene introgression or gene editing as a strategy for reduction of the impact of heat stress on production and reproduction in cattle. *Theriogenology*, 154, 190-202. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2020.05.010>
- Hansen, P. J., & Aréchiga, C. F. (1997). Strategies for managing reproduction in the heat-stressed dairy cow. *Journal of Animal Science*, 77(suppl_2), 36. https://doi.org/10.2527/1997.77suppl_236x
- 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. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, 77, 1-8. <https://doi.org/10.19182/remvt.37379>
- 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. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, 77, 1-13. <https://doi.org/10.19182/remvt.37380>
- Hanzen, C., Delhez, P., Lessire, F., Hornick, J.-L., & Gherissi, D. E. (2025). Le stress thermique environnemental dans l'espèce bovine : 3. Effets sur la reproduction. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, 78, 1-15. <https://doi.org/10.19182/remvt.37381>

- Harris, Jr., B. (1992). Feeding and managing cows in warm weather. *Fact Sheet DS 48 of the Dairy Production Guide, Florida Cooperative Extension Service*. Harris Jr., Barney, 1992. Feeding and managing cows in warm weather. Fact Sheet DS 48 of the Dairy Production Guide, Florida Cooperative Extension Service
- House, H. K. 2015. Dairy Housing-ventilation options for free stall barns. <https://files.ontario.ca/omafra-ventilation-options-free-stall-barns-15-017-en-aoda-2020-04-27.pdf>
- Huang, L., & Xu, Y. (2018). Effective reduction of antinutritional factors in soybean meal by acetic acid-catalyzed processing. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(11), e13775. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13775>
- INRA. (2018). *INRA feeding system for ruminants*. INRA. <https://doi.org/10.3920/978-90-8686-292-4>
- Jousan, F. D., & Hansen, P. J. (2007). Insulin-like growth factor-I promotes resistance of bovine preimplantation embryos to heat shock through actions independent of its anti-apoptotic actions requiring PI3K signaling. *Molecular Reproduction and Development*, 74(2), 189-196. <https://doi.org/10.1002/mrd.20527>
- Kaim, M., Bloch, A., Wolfenson, D., Braw-Tal, R., Rosenberg, M., Voet, H., & Folman, Y. (2003). Effects of GnRH administered to cows at the onset of Estrus on timing of ovulation, endocrine responses, and conception. *Journal of Dairy Science*, 86(6), 2012-2021. [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(03\)73790-4](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(03)73790-4)
- Kassube, K., Kaufman, J., Pohler, K., McFadden, J., & Rius, A. (2017). Jugular-infused methionine, lysine and branched-chain amino acids does not improve milk production in Holstein cows experiencing heat stress. *Animal*, 11(12), 2220-2228. <https://doi.org/10.1017/s1751731117001057>
- Kerekoppa, R. P., Rao, A., Basavaraju, M., Geetha, G. R., Krishnamurthy, L., Rao, T. V., Das, D. N., et al. (2015). Molecular characterization of the HSPA1A gene by single-strand conformation polymorphism and sequence analysis in Holstein-friesiancrossbred and Deoni cattle raised in India. *Turkish Journal of Veterinary and Animal Sciences*, 39, 128-133. <https://doi.org/10.3906/vet-1212-3>
- Khan, I. M., Khan, A., Liu, H., & Khan, M. Z. (2023). Editorial: Genetic markers identification for animal production and disease resistance. *Frontiers in Genetics*, 14. <https://doi.org/10.3389/fgene.2023.1243793>
- Khare, A., Thorat, G., Yadav, V., Bhimte, A., & Purwar, V. (2018). Role of mineral and vitamin in heat stress. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(4), 229-231.
- Kim, J., Hanotte, O., Mwai, O. A., Dessie, T., Bashir, S., Diallo, B., Agaba, M., et al. (2017). The genome landscape of Indigenous African cattle. *Genome Biology*, 18(1). <https://doi.org/10.1186/s13059-017-1153-y>
- Kim, S. H., Ramos, S. C., Valencia, R. A., Cho, Y. I., & Lee, S. S. (2022). Heat stress: Effects on rumen microbes and host physiology, and strategies to alleviate the negative impacts on lactating dairy cows. *Frontiers in Microbiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.804562>
- Krinninger III, C., Stephens, S., & Hansen, P. (2002). Developmental changes in inhibitory effects of arsenic and heat shock on growth of pre-implantation bovine embryos. *Molecular Reproduction and Development*, 63(3), 335-340. <https://doi.org/10.1002/mrd.90017>
- Kroukamp, H., den Haan, R., van Zyl, J. H., & van Zyl, W. H. 2013. Rational strain engineering interventions to enhance cellulase secretion by *Saccharomyces cerevisiae*. *Biotechnology and Bioengineering*, 110(3), 738-752.
- Laible, G., Cole, S., Brophy, B., Wei, J., Leath, S., Jivanji, S., Littlejohn, M. D., et al. (2021). Holstein Friesian dairy cattle edited for diluted coat color as a potential adaptation to climate change. *BMC Genomics*, 22(1). <https://doi.org/10.1186/s12864-021-08175-z>
- Landaeta-Hernández, A., Zambrano-Nava, S., Hernández-Fonseca, J. P., Godoy, R., Calles, M., Iragorri, J. L., Añez, L., et al. (2011). Variability of hair coat and skin traits as related to adaptation in Criollo Limonero cattle. *Tropical Animal Health and Production*, 43(3), 657-663. <https://doi.org/10.1007/s11250-010-9749-1>
- Lemal, P., May, K., König, S., Schroyen, M., & Gengler, N. (2023). Invited review: From heat stress to disease—Immune response and candidate genes involved in cattle thermotolerance. *Journal of Dairy Science*, 106(7), 4471-4488. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22727>
- Liu, Y., Offler, C. E., & Ruan, Y. (2013). Regulation of fruit and seed response to heat and drought by sugars as nutrients and signals. *Frontiers in Plant Science*, 4. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00282>
- Liu, J., Ye, G., Zhou, Y., Liu, Y., Zhao, L., Liu, Y., Chen, X., et al. (2014). Feeding glycerol-enriched yeast culture improves performance, energy status, and heat shock protein gene expression of lactating Holstein cows under heat stress1. *Journal of Animal Science*, 92(6), 2494-2502. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-7152>
- Lomander, H., Frössling, J., Ingvarsen, K., Gustafsson, H., & Svensson, C. (2012). Supplemental feeding with glycerol or propylene glycol of dairy cows in early lactation—Effects on metabolic status, body condition, and milk yield. *Journal of Dairy Science*, 95(5), 2397-2408. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4535>
- López-Gatius, F., Santolaria, P., Martino, A., Delétang, F., & De Rensis, F. (2006). The effects of GnRH treatment at the time of AI and 12 days later on reproductive performance of high producing dairy cows during the warm season in northeastern Spain. *Theriogenology*, 65(4), 820-830. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2005.07.002>
- Luo, H., Hu, L., Brito, L. F., Dou, J., Sammad, A., Chang, Y., Ma, L., et al. (2022). Weighted single-step GWAS and RNA sequencing reveals key candidate genes associated with physiological indicators of heat stress in Holstein cattle. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 13(1). <https://doi.org/10.1186/s40104-022-00748-6>
- Mariana, E., Sumantri, C., Astuti, D. A., Anggraeni, A., & Gunawan, A. (2020). Association of HSP70 gene with milk yield and milk quality of Friesian Holstein in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 425(1), 012045. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/425/1/012045>
- Min, L., Li, D., Tong, X., Nan, X., Ding, D., Xu, B., & Wang, G. (2019). Nutritional strategies for alleviating the detrimental effects of heat stress in dairy cows: A review. *International Journal of Biometeorology*, 63(9), 1283-1302. <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01744-8>
- Moallem, U., Altmark, G., Lehrer, H., & Arieli, A. (2010). Performance of high-yielding dairy cows supplemented with fat or concentrate under hot and humid climates. *Journal of Dairy Science*, 93(7), 3192-3202. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2979>
- Mogas, T. (2018). Update on the vitrification of bovine oocytes and invitro-produced embryos. *Reproduction, Fertility and Development*, 31(1), 105. <https://doi.org/10.1071/rd18345>
- Morgado, J. N., Lamonaca, E., Santeramo, F. G., Caroprese, M., Albenzio, M., & Ciliberti, M. G. (2023). Effects of management strategies on animal welfare and productivity under heat stress: A synthesis. *Frontiers in Veterinary Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1145610>
- Muller, C. J. C., Botha, J. A., Coetzer, W. A., Smith, W. A. (1994). Effect of shade on various parameters of Friesian cows in a Mediterranean climate in South Africa. 2. Physiological responses. *South African Journal of Animal Science*, 24(2), 56-60. <https://www.ajol.info/index.php/sajas/article/view/138378>
- Naderi, N., Ghorbani, G., Sadeghi-Sefidmazgi, A., Nasrollahi, S., & Beauchemin, K. (2016). Shredded beet pulp substituted for corn silage in diets fed to dairy cows under ambient heat stress: Feed intake, total-tract digestibility, plasma metabolites, and milk production. *Journal of Dairy Science*, 99(11), 8847-8857. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11029>
- Nardone, A., Ronchi, B., Lacetera, N., Ranieri, M., & Bernabucci, U. (2010). Effects of climate changes on animal production and sustainability of livestock systems. *Livestock Science*, 130(1-3), 57-69. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2010.02.011>
- Nebel, R. L., Jobst, S. M., Dransfield, M. B. G., Pandolfi, S. M., Bailey, T. L. (1997). Use of radio frequency data communication system Heat Watch to describe behavioural estrus in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 80, 179. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(98\)75849-7](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(98)75849-7)
- Negrón-Pérez, V., Fausnacht, D., & Rhoads, M. (2019). Invited review: Management strategies capable of improving the reproductive performance of heat-stressed dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 102(12), 10695-10710. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16718>
- Nguyen, T. T., Bowman, P. J., Haile-Mariam, M., Pryce, J. E., & Hayes, B. J. (2016). Genomic selection for tolerance to heat stress in Australian dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 99(4), 2849-2862. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-9685>
- Nielsen, P. P., & Wredle, E. (2023). How does the provision of shade during grazing affect heat stress experienced by dairy cows in Sweden? *Animals*, 13(24), 3823. <https://doi.org/10.3390/ani13243823>
- Nishisozu, T., Singh, J., Abe, A., Okamura, K., & Dochi, O. (2023). Effects of the temperature-humidity index on conception rates in Holstein heifers and cows receiving *in vitro*-produced Japanese Black cattle embryos. *Journal of Reproduction and Development*, 69(2), 72-77. <https://doi.org/10.1262/jrd.2022-112>
- Nowicki, A. (2021). Embryo transfer as an option to improve fertility in repeat breeder dairy cows. *Journal of Veterinary Research*, 65(2), 231-237. <https://doi.org/10.2478/jvetres-2021-0018>
- NRC. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2021). *Nutrient Requirements of Dairy Cattle: Eighth Revised Edition*. The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25806>

- Olson, T. A., Lucena, C., Chase, C. C., & Hammond, A. C. (2003). Evidence of a major gene influencing hair length and heat tolerance in *Bos Taurus* cattle. *Journal of Animal Science*, 81(1), 80-90. <https://doi.org/10.2527/2003.81180x>
- Ortiz-Colón, G., Fain, S. J., Parés, I. K., Curbelo-Rodríguez, J., Jiménez-Cabán, E., Pagán-Morales, M., & Gould, W. A. (2018). Assessing climate vulnerabilities and adaptive strategies for resilient beef and dairy operations in the tropics. *Climatic Change*, 146(1-2), 47-58. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-2110-1>
- Osei-Amponsah, R., Chauhan, S. S., Leury, B. J., Cheng, L., Cullen, B., Clarke, I. J., & Dunshea, F. R. (2019). Genetic selection for Thermotolerance in ruminants. *Animals*, 9(11), 948. <https://doi.org/10.3390/ani9110948>
- Palacio, S., Bergeron, R., Lachance, S., & Vasseur, E. (2015). The effects of providing portable shade at pasture on dairy cow behavior and physiology. *Journal of Dairy Science*, 98(9), 6085-6093. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8932>
- Pancarci, S., Jordan, E., Risco, C., Schouten, M., Lopes, F., Moreira, F., & Thatcher, W. (2002). Use of Estradiol Cypionate in a Presynchronized timed artificial insemination program for lactating dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 85(1), 122-131. [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(02\)74060-5](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(02)74060-5)
- Park, T., Ma, L., Gao, S., Bu, D., & Yu, Z. (2022). Heat stress impacts the multi-domain ruminal microbiota and some of the functional features independent of its effect on feed intake in lactating dairy cows. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 13(1). <https://doi.org/10.1186/s40104-022-00717-z>
- Patiño Chaparro, J. M. (2016). Comparison of genetic variations related to productive efficiency of Slick Holstein cattle versus non-Slick. [Master's thesis, University of Puerto Rico, Mayaguez Campus].
- Patra, A. K., & Kar, I. (2021). Heat stress on microbiota composition, barrier integrity, and nutrient transport in gut, production performance, and its amelioration in farm animals. *Journal of Animal Science and Technology*, 63(2), 211-247. <https://doi.org/10.5187/jast.2021.e48>
- Paula-Lopes, F., Chase, C. C., Al-Katanani, Y., Krininger, C. E., Rivera, R., Tekin, S., Majewski, A., et al. (2003). Genetic divergence in cellular resistance to heat shock in cattle: Differences between breeds developed in temperate versus hot climates in responses of preimplantation embryos, reproductive tract tissues and lymphocytes to increased culture temperatures. *Reproduction*, 125(2), 285-294. <https://doi.org/10.1530/rep.0.1250285>
- Perano, K., Usack, J., Angenent, L., & Gebremedhin, K. (2015). Corrigendum to "Production and physiological responses of heat-stressed lactating dairy cattle to conductive cooling". *Journal of Dairy Science*, 98(12), 9060. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-98-12-9060>
- RAAA. (2021). Red Angus Association of America. Red Angus Approves Gene-Edited Traits for Animal Registration. By: Drovers news source, September 15, 2021. <https://www.drovers.com/news/industry/red-angus-approves-gene-edited-traits-animal-registration>
- Ravagnolo, O., & Misztal, I. (2000). Genetic component of heat stress in dairy cattle, parameter estimation. *Journal of Dairy Science*, 83(9), 2126-2130. [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(00\)75095-8](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(00)75095-8)
- Renaudeau, D., Collin, A., Yahav, S., De Basilio, V., Gourdière, J., & Collier, R. (2012). Adaptation to hot climate and strategies to alleviate heat stress in livestock production. *Animal*, 6(5), 707-728. <https://doi.org/10.1017/s175173111002448>
- Riley, D., Chase, C., Coleman, S., & Olson, T. (2012). Genetic assessment of rectal temperature and coat score in Brahman, Angus, and Romosinuano crossbred and straightbred cows and calves under subtropical summer conditions. *Livestock Science*, 148(1-2), 109-118. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2012.05.017>
- Rius, A. (2019). Invited review: Adaptations of protein and amino acid metabolism to heat stress in dairy cows and other livestock species. *Applied Animal Science*, 35(1), 39-48. <https://doi.org/10.15232/aas.2018-01805>
- Rodrigues, C., Teixeira, A., Ferreira, R., Ayres, H., Mancilha, R., Souza, A., & Baruselli, P. (2010). Effect of fixed-time embryo transfer on reproductive efficiency in high-producing repeat-breeder Holstein cows. *Animal Reproduction Science*, 118(2-4), 110-117. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2009.06.020>
- Roman-Ponce, H., Thatcher, W., Buffington, D., Wilcox, C., & Van Horn, H. (1977). Physiological and production responses of dairy cattle to a shade structure in a subtropical environment. *Journal of Dairy Science*, 60(3), 424-430. [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(77\)83882-4](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(77)83882-4)
- Roth, Z., Arav, A., Bor, A., Zeron, Y., Braw-Tal, R., & Wolfenson, D. (2001). Improvement of quality of oocytes collected in the Autumn by enhanced removal of impaired follicles from previously heat-stressed cows. *Reproduction*, 122(5), 737-744. <https://doi.org/10.1530/rep.0.1220737>
- Roth, Z., Shiff, O., Lavon, Y., Kalo, D., & Wolfenson, D. (2022). Progesterone supplementation to improve fertility of selected subgroups of lactating cows during the summer and fall. *Reproduction in Domestic Animals*, 57(8), 943-946. <https://doi.org/10.1111/rda.14157>
- Ruiz-González, A., Suissi, W., Baumgard, L., Martel-Kennes, Y., Chouinard, P., Gervais, R., & Rico, D. (2023). Increased dietary vitamin D3 and calcium partially alleviate heat stress symptoms and inflammation in lactating Holstein cows independent of dietary concentrations of vitamin E and selenium. *Journal of Dairy Science*, 106(6), 3984-4001. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22345>
- Sakatani, M., Kobayashi, S., & Takahashi, M. (2003). Effects of heat shock on in vitro development and intracellular oxidative state of bovine preimplantation embryos. *Molecular Reproduction and Development*, 67(1), 77-82. <https://doi.org/10.1002/mrd.20014>
- Sakatani, M. (2017). Effects of heat stress on bovine preimplantation embryos produced in vitro. *Journal of Reproduction and Development*, 63(4), 347-352. <https://doi.org/10.1262/jrd.2017-045>
- Salvati, G., Morais Júnior, N., Melo, A., Vilela, R., Cardoso, F., Aronovich, M., Pereira, R., et al. (2015). Response of lactating cows to live yeast supplementation during summer. *Journal of Dairy Science*, 98(6), 4062-4073. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-9215>
- Sammad, A., Umer, S., Shi, R., Zhu, H., Zhao, X., & Wang, Y. (2019). Dairy cow reproduction under the influence of heat stress. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 104(4), 978-986. <https://doi.org/10.1111/jpn.13257>
- Sanchez, W., McGuire, M., & Beede, D. (1994). Macromineral nutrition by heat stress interactions in dairy cattle: Review and original research. *Journal of Dairy Science*, 77(7), 2051-2079. [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(94\)77150-2](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(94)77150-2)
- Sánchez, J., Misztal, I., Aguilar, I., Zumbach, B., & Rekaya, R. (2009). Genetic determination of the onset of heat stress on daily milk production in the US Holstein cattle. *Journal of Dairy Science*, 92(8), 4035-4045. <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1626>
- Santos, J., Bisinotto, R., & Ribeiro, E. (2016). Mechanisms underlying reduced fertility in anovular dairy cows. *Theriogenology*, 86(1), 254-262. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2016.04.038>
- Sartori, R., Sartor-Bergfeldt, R., Mertens, S., Guenther, J., Parrish, J., & Wiltbank, M. (2002). Fertilization and early embryonic development in heifers and lactating cows in summer and lactating and dry cows in winter. *Journal of Dairy Science*, 85(11), 2803-2812. [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(02\)74367-1](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(02)74367-1)
- Schmitt, E. J., Diaz, T., Barros, C. M., De la Sota, R. L., Drost, M., Fredriksson, E. W., Staples, C. R., et al. (1996). Differential response of the luteal phase and fertility in cattle following ovulation of the first-wave follicle with human chorionic gonadotropin or an agonist of gonadotropin-releasing hormone. *Journal of Animal Science*, 74(5), 1074. <https://doi.org/10.2527/1996.7451074x>
- Schütz, K., Rogers, A., Poulouin, Y., Cox, N., & Tucker, C. (2010). The amount of shade influences the behavior and physiology of dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 93(1), 125-133. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2416>
- Sejian, V., Maurya, V. P., & Naqvi, S. M. (2010). Adaptability and growth of Malpura ewes subjected to thermal and nutritional stress. *Tropical Animal Health and Production*, 42(8), 1763-1770. <https://doi.org/10.1007/s11250-010-9633-z>
- Shabankareh, H. K., Habibzad, J., Sarsaifi, K., Cheghamirza, K., & Jasemi, V. K. (2010). The effect of the absence or presence of a corpus luteum on the ovarian follicular population and serum oestradiol concentrations during the estrous cycle in Sanjabi ewes. *Small Ruminant Research*, 93(2-3), 180-185. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2010.06.002>
- Shen, J., Hanif, Q., Cao, Y., Yu, Y., Lei, C., Zhang, G., & Zhao, Y. (2020). Whole genome scan and selection signatures for climate adaption in Yanbian cattle. *Frontiers in Genetics*, 11. <https://doi.org/10.3389/fgene.2020.00094>
- Silanikove, N. (2000). Effects of heat stress on the welfare of extensively managed domestic ruminants. *Livestock Production Science*, 67(1-2), 1-18. [https://doi.org/10.1016/s0301-6226\(00\)00162-7](https://doi.org/10.1016/s0301-6226(00)00162-7)

- Silva, C., Sartorelli, E., Castilho, A., Satrapa, R., Puelker, R., Razza, E., Ticianelli, J., et al. (2013). Effects of heat stress on development, quality and survival of *Bos indicus* and *Bos Taurus* embryos produced in vitro. *Theriogenology*, 79(2), 351-357. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2012.10.003>
- Smith, J. R., & Harner, J. P. (2012). Strategies to reduce the impact of heat and cold stress in dairy cattle facilities. *Environmental Physiology of Livestock*, 267-288. <https://doi.org/10.1002/9781119949091.ch15>
- Soares, J., Martins, C., Carvalho, N., Nicacio, A., Abreu-Silva, A., Campos Filho, E. P., Torres Júnior, J., et al. (2011). Timing of insemination using sex-sorted sperm in embryo production with *Bos indicus* and *Bos Taurus* super-ovulated donors. *Animal Reproduction Science*, 127(3-4), 148-153. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2011.08.003>
- Souza-Cácares, M., Fialho, A., Silva, W., Cardoso, C., Pöhland, R., Martins, M., & Melo-Sterza, F. (2019). Oocyte quality and heat shock proteins in oocytes from bovine breeds adapted to the tropics under different conditions of environmental thermal stress. *Theriogenology*, 130, 103-110. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2019.02.039>
- Stermer, R., Brasington, C., Coppock, C., Lanham, J., & Milam, K. (1986). Effect of drinking water temperature on heat stress of dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 69(2), 546-551. [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(86\)80436-2](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(86)80436-2)
- Stewart, B., Block, J., Morelli, P., Navarette, A., Amstalden, M., Bonilla, L., Hansen, P., et al. (2011). Efficacy of embryo transfer in lactating dairy cows during summer using fresh or vitrified embryos produced in vitro with sex-sorted semen. *Journal of Dairy Science*, 94(7), 3437-3445. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-4008>
- St-Pierre, N., Cobanov, B., & Schnitkey, G. (2003). Economic losses from heat stress by US livestock industries. *Journal of Dairy Science*, 86, E52-E77. [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(03\)74040-5](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(03)74040-5)
- Sun, L., Gao, S., Wang, K., Xu, J., Sanz-Fernandez, M., Baumgard, L., & Bu, D. (2019). Effects of source on bioavailability of selenium, antioxidant status, and performance in lactating dairy cows during oxidative stress-inducing conditions. *Journal of Dairy Science*, 102(1), 311-319. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-14974>
- Sungkhapreecha, P., Chankitisakul, V., Duangjinda, M., Buaban, S., & Boonkum, W. (2022). Determining heat stress effects of multiple genetic traits in tropical dairy cattle using single-step Genomic BLUP. *Veterinary Sciences*, 9(2), 66. <https://doi.org/10.3390/vetsci9020066>
- Taye, M., Lee, W., Caetano-Anolles, K., Dessie, T., Hanotte, O., Mwai, O. A., Kemp, S., et al. (2017). Whole genome detection of signature of positive selection in African cattle reveals selection for thermotolerance. *Animal Science Journal*, 88(12), 1889-1901. <https://doi.org/10.1111/asj.12851>
- Torres-Júnior, J. D., Pires, M. D., De Sá, W., Ferreira, A. D., Viana, J., Camargo, L., Ramos, A., et al. (2008). Effect of maternal heat-stress on follicular growth and oocyte competence in *BOS indicus* cattle. *Theriogenology*, 69(2), 155-166. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2007.06.023>
- Tourillon, M. (2022). Comportement et physiologie de vaches laitières hautes productrices en période chaude : effets d'un matelas de logettes à eau refroidie. Sciences du Vivant [q-bio]. (dumas-03857862)
- Tucker, C. B., Rogers, A. R., & Schütz, K. E. (2008). Effect of solar radiation on dairy cattle behaviour, use of shade and body temperature in a pasture-based system. *Applied Animal Behaviour Science*, 109(2-4), 141-154. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2007.03.015>
- Tyagi, S., Kesiraju, K., Saakre, M., Rathinam, M., Raman, V., Pattanayak, D., & Sreevathsa, R. (2020). Genome editing for resistance to insect pests: An emerging tool for crop improvement. *ACS Omega*, 5(33), 20674-20683. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c01435>
- Tyson, J., McFarland, D., Graves, R. (2014). Tunnel ventilation for tie stall dairy barns. <https://extension.psu.edu/tunnel-ventilation-for-tie-stall-dairy-barns>
- Ullah, G., Fuquay, J., Keawkhong, T., Clark, B., Pogue, D., & Murphey, E. (1996). Effect of gonadotropin-releasing hormone at Estrus on subsequent luteal function and fertility in lactating holsteins during heat stress. *Journal of Dairy Science*, 79(11), 1950-1953. [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(96\)76565-7](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(96)76565-7)
- Uyeno, Y., Sekiguchi, Y., Tajima, K., Takenaka, A., Kurihara, M., & Kamagata, Y. (2010). An rRNA-based analysis for evaluating the effect of heat stress on the rumen microbial composition of Holstein heifers. *Anaerobe*, 16(1), 27-33. <https://doi.org/10.1016/j.anaerobe.2009.04.006>
- Vasconcelos, J., Jardina, D., Sá Filho, O., Aragon, F., & Veras, M. (2011). Comparison of progesterone-based protocols with gonadotropin-releasing hormone or estradiol benzoate for timed artificial insemination or embryo transfer in lactating dairy cows. *Theriogenology*, 75(6), 1153-1160. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2010.11.027>
- Vieira, L., Rodrigues, C., Mendanha, M., Sá Filho, M., Sales, J., Souza, A., Santos, J., et al. (2014). Donor category and seasonal climate associated with embryo production and survival in multiple ovulation and embryo transfer programs in Holstein cattle. *Theriogenology*, 82(2), 204-212. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2014.03.018>
- Wallage, A. L., Johnston, S. D., Lisle, A. T., Beard, L., Lees, A. M., Collins, C. W., & Gaughan, J. B. (2017). Thermoregulation of the bovine scrotum 1: Measurements of free-range animals in a Paddock and pen. *International Journal of Biometeorology*, 61(8), 1381-1387. <https://doi.org/10.1007/s00484-017-1315-3>
- Wang, B., Wang, C., Guan, R., Shi, K., Wei, Z., Liu, J., & Liu, H. (2019). Effects of dietary rumen-protected betaine supplementation on performance of postpartum dairy cows and immunity of newborn calves. *Animals*, 9(4), 167. <https://doi.org/10.3390/ani9040167>
- Wang, J., Bu, D., Wang, J., Huo, X., Guo, T., Wei, H., Zhou, L., et al. (2010). Effect of saturated fatty acid supplementation on production and metabolism indices in heat-stressed mid-lactation dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 93(9), 4121-4127. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2635>
- Watanabe, Y. F., Souza, H. A., Mingoti, R. D., Ferreira, R. M., Batista, E. O., Dayan, A., Watanabe, O. Y., et al. (2017). Number of oocytes retrieved per donor during OPU and its relationship with in vitro embryo production and field fertility following embryo transfer. *Animal Reproduction*, 14(3), 635-644. <https://doi.org/10.21451/1984-3143-ar1008>
- West, J., Hill, G., Fernandez, J., Mandevbu, P., & Mullinix, B. (1999). Effects of dietary fiber on intake, milk yield, and digestion by lactating dairy cows during cool or hot, humid weather. *Journal of Dairy Science*, 82(11), 2455-2465. [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(99\)75497-4](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(99)75497-4)
- Willard, S., Gandy, S., Bowers, S., Graves, K., Elias, A., & Whisnant, C. (2003). The effects of GnRH administration postinsemination on serum concentrations of progesterone and pregnancy rates in dairy cattle exposed to mild summer heat stress. *Theriogenology*, 59(8), 1799-1810. [https://doi.org/10.1016/s0093-691x\(02\)01232-3](https://doi.org/10.1016/s0093-691x(02)01232-3)
- Wolfenson, D., & Roth, Z. (2018). Impact of heat stress on cow reproduction and fertility. *Animal Frontiers*, 9(1), 32-38. <https://doi.org/10.1093/af/vfy027>
- Zhang, X., Liang, H., Xu, L., Zou, B., Zhang, T., Xue, F., & Qu, M. (2022). Rumen fermentative metabolomic and blood insights into the effect of yeast culture supplement on growing bulls under heat stress conditions. *Frontiers in Microbiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.947822>
- Zhao, S., Min, L., Zheng, N., & Wang, J. (2019). Effect of heat stress on bacterial composition and metabolism in the rumen of lactating dairy cows. *Animals*, 9(11), 925. <https://doi.org/10.3390/ani9110925>
- Zolini, A., Ortiz, W., Estrada-Cortes, E., Ortega, M., Dikmen, S., Sosa, F., Giordano, J., et al. (2019). Interactions of human chorionic gonadotropin with genotype and parity on fertility responses of lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 102(1), 846-856. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15358>

Summary

Gherissi D.E., Cabaraux J.-F., Hornick J.-L., Hanzen C. Environmental heat stress in cattle: 4. Control methods

Background: Heat stress significantly impacts the welfare of livestock animals, affecting their physical health and zootecnical parameters such as productivity and yield, leading to direct consequences on farm profitability. Numerous studies have been conducted to evaluate and improve methods for mitigating heat stress. **Aim:** This literature review examines methods to mitigate heat stress, which can be grouped into four categories: improving the animals' physical environment, managing nutrition, genetic approaches, and reproductive management. **Methods:** This literature review was initially based on synthesis articles from the PubMed database and was then enriched by examining the references cited in these articles. **Results:** There is no single solution to mitigate the effects of heat stress in livestock. Instead, these methods appear complementary and should be selected based on the farming context. The first method focuses on environmental adaptations such as ventilation, construction materials, and cooling systems. The second method targets stricter feed management. The third control method relies on several complementary approaches: factorial genetic selection, genomic selection, as well as crossbreeding and hybridization. Finally, the fourth category of solutions explores the use of reproductive biotechnologies and hormonal treatments. **Conclusions:** The main recommendation is to combine multiple methods, prioritizing environmental and nutritional adaptations while progressively integrating a genetic selection strategy tailored to each farming system.

Keywords: Cattle, heat stress, livestock management, feeding, animal housing, selection

Resumen

Gherissi D.E., Cabaraux J.-F., Hornick J.-L., Hanzen C. Estrés térmico ambiental en el ganado bovino: 4. Métodos de control

Contexto: El estrés térmico tiene un impacto significativo en el bienestar del ganado, afectando a su salud física, y también a parámetros zootécnicos tales como la productividad y el rendimiento, lo que tiene consecuencias directas en la rentabilidad de las explotaciones. Se llevan a cabo numerosas investigaciones con el objetivo de evaluar y mejorar los métodos de lucha contra el estrés térmico. **Objetivos:** Esta revisión de la literatura recapitula las metodologías utilizadas contra el estrés térmico. Los métodos pueden agruparse en cuatro categorías: la mejora del entorno físico de los animales, la gestión de la alimentación, la selección genética y la gestión de la reproducción. **Método:** La revisión bibliográfica se basó primeramente en los artículos de síntesis provenientes de la base PubMed, y posteriormente se completó con las referencias citadas en estos artículos. **Resultados:** No existe una solución única para atenuar los efectos del estrés térmico en los animales. Al contrario, las diversas soluciones resultan complementarias y se deben elegir en función del contexto del ganado. El primer método se centra en adaptaciones del entorno de los animales dirigidas a la ventilación, la selección de materiales de construcción y los sistemas de refrigeración. El segundo método se enfoca hacia una gestión más rigurosa de la alimentación. El tercer método se basa en varios planteamientos complementarios: la selección genética factorial, la selección genómica, así como el cruce y la hibridación. Finalmente, la cuarta categoría de soluciones explora la utilización de las biotecnologías de reproducción y de tratamientos hormonales. **Conclusiones:** La recomendación principal es combinar diversos métodos, favoreciendo las adaptaciones ambientales y nutricionales, e integrándolos progresivamente en una estrategia de selección genética adaptada a cada sistema de ganadería.

Palabras clave: Ganado bovino, estrés térmico, manejo del ganado, alimentación, alojamiento del animal, selección

