

Le stress thermique environnemental dans l'espèce bovine : 3. Effets sur la reproduction

Christian Hanzen ^{1*} Pauline Delhez ² Françoise Lessire ¹
Jean-Luc Hornick ¹ Djalel Eddine Gherissi ³

Mots-clés

Bovin, stress thermique, cycle œstral, fertilité, gestation, spermatogénèse

OPEN ACCESS

© C. Hanzen *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: Research article

Submitted: 26 February 2024

Accepted: 10 December 2024

Online: 28 February 2025

DOI: 10.19182/remvt.37381

Résumé

Contexte : L'augmentation régulière depuis plusieurs décennies de la température environnementale s'est accompagnée dans l'espèce bovine, notamment d'une diminution de la fertilité dans différentes régions du monde. **Objectifs** : Cette revue de littérature passe en revue les divers effets et leurs mécanismes sur les divers aspects de la reproduction du mâle et de la femelle bovine. **Méthode** : À partir de la base PubMed, cette revue de littérature s'est concentrée dans un premier temps sur les articles de synthèse puis a été complétée par les références des articles identifiés. **Résultats** : La diminution de la fertilité résulte des effets du stress thermique sur la croissance folliculaire ovarienne, avec une incidence plus marquée sur les follicules pré-antraux que sur les follicules antraux, l'ovocyte et le corps jaune. Ces effets sont la conséquence d'une réduction de la synthèse d'œstradiol, de la progestérone, de l'inhibine et de l'hormone lutéotrope (LH) ainsi que de l'augmentation de celle de l'hormone folliculostimulante (FSH), une modification des gradients de température au niveau du système génital n'étant pas non plus à exclure. Le stress thermique est également responsable d'une augmentation de la fréquence de la mortalité embryonnaire particulièrement durant la première semaine de la gestation. L'exposition des vaches à un stress thermique durant la gestation raccourcit la durée, affecte le placenta, modifie le métabolisme de la vache lors de sa lactation, altère son immunité et exerce des effets négatifs sur la croissance pondérale, le développement mammaire et folliculaire, la longévité et les performances de reproduction du veau. Chez le mâle, le stress thermique se traduit par une réduction de la motilité et une augmentation des anomalies morphologiques des spermatozoïdes. **Conclusions** : La reconnaissance croissante des effets du stress thermique sur les performances reproductives de bovins souligne la nécessité pour les responsables de la santé animale de les intégrer dans leurs approches. Il est essentiel de mettre en place des stratégies visant à en atténuer les impacts sur la rentabilité des élevages, d'autant plus que son influence épigénétique sur les performances de la descendance est de mieux en mieux documentée.

■ Comment citer cet article : 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, 37381. <https://doi.org/10.19182/remvt.37381>

■ INTRODUCTION

Les effets négatifs sur la fertilité et la fécondité de périodes prolongées ou brutales d'augmentation de la température environnementale sont reconnus depuis de nombreuses années (Erb *et al.*, 1940 ; Badinga *et al.*, 1985 ; Bouraoui *et al.*, 2002 ; Boni *et al.*, 2014 ; Eulmi *et al.*, 2023). Ils concernent des environnements aussi différents que

ceux rencontrés en Allemagne (Schüller *et al.*, 2014) en Égypte (El Tarabany & El Tarabany, 2015), en Espagne (Lopez-Gatiu, 2003), en Algérie (Feraï *et al.*, 2024) ou aux États-Unis (Jordan, 2003 ; Hansen, 2019).

Les effets du stress thermique et leurs mécanismes sur la reproduction bovine tant mâle que femelle chez *Bos taurus*, *Bos indicus* et *Bubalus* ont fait l'objet de multiples synthèses (Wolfenson *et al.*, 2000 ; Dash *et al.*, 2016 ; Boni, 2019 ; Hansen, 2019 ; Rhoads, 2020 ; Roth, 2020 ; De Rensis *et al.*, 2021 ; Chawichaab & Mummé, 2022 ; Cartwright *et al.*, 2023 ; Da Silva *et al.*, 2023 ; Dovolou *et al.*, 2023 ; Jasinski *et al.*, 2023). Ils concernent les différentes étapes d'obtention d'une gestation, à savoir la croissance folliculaire et la maturation ovocytaire (Roth *et al.*, 2001b ; Schüller *et al.*, 2017 ; Roth, 2017 ; Dovolou *et al.*, 2023), les manifestations et la durée de l'œstrus (Stott & Williams,

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

2. RumeXperts, Faimes, Belgique

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

* Auteur pour la correspondance

Tél. : +32 4 3664142 ; email : christian.hanzen@uliege.be

1962 ; Collier *et al.*, 1982a), la fonction utérine (Collier *et al.*, 1982b), la lutéolyse (Wilson *et al.*, 1998a), le développement embryonnaire (Biggers *et al.*, 1987 ; Putney *et al.*, 1988 ; Edwards & Hansen, 1997 ; Wolfenson *et al.*, 2000) et fœtal (Wolfenson *et al.*, 1988), mais également la fonction testiculaire (Lucio *et al.*, 2016 ; Malama *et al.*, 2017 ; Rahman *et al.*, 2018 ; Sabés-Alsina *et al.*, 2019 ; Da Silva *et al.*, 2023). Dans un premier article, nous avons décrit les caractéristiques générales et les méthodes d'évaluation du stress thermique (Hanzen *et al.*, 2024a). Un deuxième article a été consacré aux effets physiologiques, pathologiques, comportementaux, alimentaires, immunitaires et sur la production laitière du stress thermique (Hanzen *et al.*, 2024b). Ce troisième article se propose de décrire de manière plus spécifique les effets du stress thermique sur la fonction testiculaire et chez la femelle sur les différentes étapes préalables à l'obtention d'un veau vivant et viable, à savoir la croissance folliculaire et de l'ovocyte, le développement de l'embryon et du placenta et la gestation.

■ LA FOLLICULOGENESE

Par folliculogénèse, on entend le développement d'un follicule jusqu'au stade pré-ovulatoire. Il comprend successivement les stades de follicule primordial, primaire, secondaire, tertiaire et pré-ovulatoire. Le follicule est la structure ovarienne qui assure le développement et la maturation de l'ovocyte, processus appelé ovogénèse. La croissance folliculaire dure une centaine de jours. Au cours du cycle, elle se manifeste sous forme le plus souvent de deux, voire parfois de trois vagues. Au plan fonctionnel, les follicules sont classés en dominants et dominés. Sur les plans histologique et anatomique, on distingue les follicules non cavitaires (pré-antraux) (primordial, primaire et secondaire) et cavitaires (antraux) (tertiaire et pré-ovulatoire) (figure 1) (Hanzen *et al.*, 2000 ; Hansen, 2013).

Les effets du stress thermique sont différents selon le stade de développement du follicule. Ils résultent d'altérations de son contrôle

hormonal, mais également de modifications de la température de l'une ou l'autre partie du système génital.

Nature des effets

Les effets du stress thermique s'exercent moins sur les follicules pré-antraux (follicules primaires et secondaires) qu'antraux (follicules tertiaires, dominants et pré-ovulatoires) (Wolfenson & Roth, 2019 ; Roth, 2020 ; De Rensis *et al.*, 2021 ; Da Silva *et al.*, 2023 ; Dovolou *et al.*, 2023 ; Gómez-Guzmán *et al.*, 2024). Certaines études n'excluent cependant pas un effet négatif d'un stress thermique sur les follicules pré-antraux (Paes *et al.*, 2016 ; Aguiar *et al.*, 2020). La sensibilité des follicules au stress thermique augmente lors de la transition au stade antral, c'est-à-dire lorsque leur diamètre devient supérieur à 0,5 voire 1 mm (Roth *et al.*, 2000). Ils deviennent alors plus sensibles à la FSH et à la LH, respectivement avant et après le stade de la déviation (stade d'acquisition d'un diamètre de 7 à 8 mm) du follicule sélectionné parmi les follicules recrutés, du fait de l'apparition de leurs récepteurs sur la granuleuse (Hyttel *et al.*, 2001 ; Cortvrindt & Smitz, 2010).

Le stress thermique entraîne une réduction du diamètre du follicule dominant et s'accompagne de celle de sa dominance physiologique (Roth *et al.*, 2000 ; Guzeloglu *et al.*, 2001). Elle se traduit par une augmentation du nombre de follicules de diamètre compris entre 6 et 9 mm ou supérieur à 10 mm au sein de la première ou de la deuxième vague de croissance folliculaire (Wolfenson *et al.*, 1997 ; Roth *et al.*, 2001a ; Sartori *et al.*, 2002).

Elle entraîne également l'apparition plus rapide, au cours du cycle, de la seconde vague de croissance folliculaire (Wolfenson *et al.*, 1995), ce qui en allonge la période de dominance et l'expulsion d'un ovocyte plus âgé (Austin *et al.*, 1999). Il en résulte une augmentation du risque d'infertilité (Mihm *et al.*, 1994 ; Cerri *et al.*, 2009).

Le stress thermique peut aussi induire une réduction du diamètre du follicule pré-ovulatoire. Cette réduction est estimée à 0,1 mm par

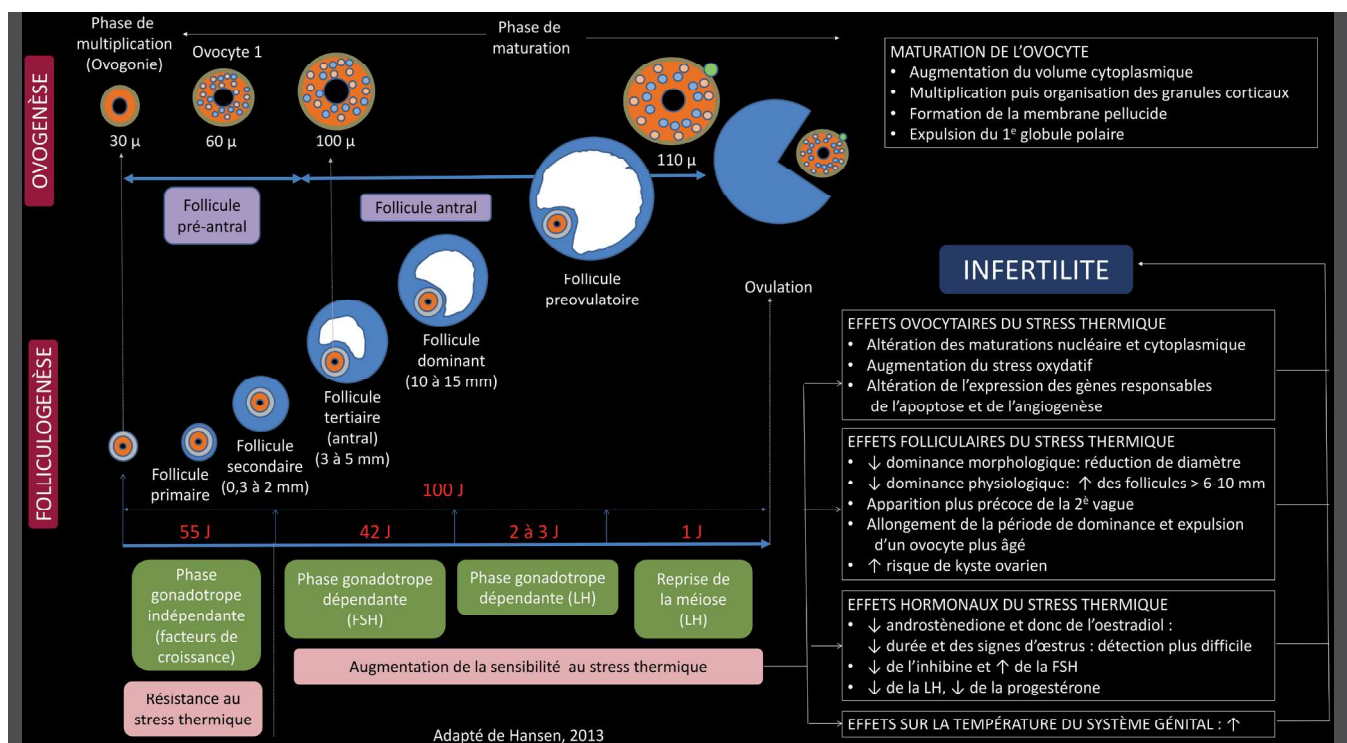


Figure 1 : Effets du stress thermique sur la croissance folliculaire et le développement de l'ovocyte (adapté de Hansen, 2013) /// Effects of heat stress on follicular growth and oocyte development (adapted from Hansen, 2013)

point d'augmentation du THI le jour de l'œstrus (Schüller *et al.*, 2017 ; Jitjumnong *et al.*, 2020).

Mécanismes hormonaux

La croissance des follicules pré-antraux est davantage liée aux facteurs de croissance qu'aux hormones gonadotropes folliculo (FSH : Follicle Stimulating Hormone) et lutéo-stimulante (LH : *Luteinizing Hormone*) (Roth, 2017 ; Wolfenson & Roth, 2019). À partir du stade antral, la croissance folliculaire est largement orchestrée par les hormones hypophysaires LH et FSH, l'activine mais aussi ovariennes, l'œstradiol et la progestérone tout comme l'inhibine et la follistatine. Cette régulation est également influencée par d'autres métabolites et hormones comme le glucose (Clarke, 2014), le cortisol, l'hormone de croissance, la prolactine, la ghréline (Ioannis *et al.*, 2021) ou la kisspeptine (Kadokawa *et al.*, 2008). Ces facteurs ont des effets sur l'hypothalamus et l'hypophyse mais également sur l'ovaire (Dovolou *et al.*, 2023).

Le stress thermique est responsable d'une diminution de la concentration de l'androstènedione dans le follicule pré-ovulatoire (Wolfenson *et al.*, 1997). Il en résulte une diminution de l'œstradiol (Gwazdauskas *et al.*, 1981 ; Hansen & Arechiga, 1999 ; Bridges *et al.*, 2005) au niveau du follicule dominant mais également pré-ovulatoire (Wolfenson *et al.*, 1993 ; Palta *et al.*, 1997). Cet effet peut persister jusqu'à 28 jours après une période de stress thermique (Roth *et al.*, 2001a et 2001b ; Biran *et al.*, 2015). Cette réduction de la synthèse de l'œstradiol se traduit par une réduction de la LH plasmatique (Gilad *et al.*, 1993), une diminution des signes d'œstrus (Nebel *et al.*, 1997 ; Hansen & Arechiga, 1999) et de sa durée (Dransfield *et al.*, 1998 ; Orihuela, 2000 ; White *et al.*, 2002). Cela rend plus difficiles la détection de l'œstrus et le choix du moment optimal pour l'insémination.

Le stress thermique s'accompagne également d'une réduction de la synthèse d'inhibine et par conséquent d'une augmentation de la FSH plasmatique, favorisant ainsi l'augmentation du nombre de follicules de diamètre supérieur à 6-10 mm (Wolfenson *et al.*, 1997 ; Wilson *et al.*, 1998a ; Roth *et al.*, 2000).

Le stress thermique induit une réduction de la synthèse de la LH (Wise *et al.*, 1988 ; Gilad *et al.*, 1993) qui, combinée à l'augmentation de celle de la FSH, expliquerait l'augmentation de la prévalence des kystes et du risque de double ovulation et donc de gémellité en été (Lopez-Diaz & Bosu, 1992 ; Wolfenson *et al.*, 2000 ; Lopez-Gatius *et al.*, 2005). Lors de stress thermique, le traitement des vaches au moyen d'un analogue de la GnRH (diphéréline) réduit le risque d'anovulation et augmente le pourcentage de gestation par rapport à un traitement effectué en l'absence de stress thermique (García-Ispuerto *et al.*, 2019).

Bien que parfois contradictoires, la majorité des études tendent à démontrer une réduction de la concentration plasmatique de la progestérone lors de stress thermique, conséquence vraisemblable de la réduction de la concentration de la LH (Wolfenson *et al.*, 2000 ; Wolfenson *et al.*, 2002) (figure 2). Cette réduction de la progestéronémie s'observerait davantage lors de stress chronique et concernerait plus les cellules thécales que les cellules de la granuleuse (Wolfenson *et al.*, 1997 et 2002). Cette réduction de la progestéronémie entrave la synthèse optimale de l'interféron et le développement de l'embryon (Mann & Lamming, 2001) (figure 2).

Les observations contradictoires observées relèvent de facteurs multiples. La synthèse de la progestérone mais également sa sécrétion est fonction du degré de vascularisation du corps jaune qui peut être altéré par un stress thermique (Lublin & Wolfenson, 1996). Cette concentration dépend en outre du catabolisme hépatique de la progestérone qui est proportionnelle à la production laitière (Bech-Sabat

et al., 2008), de la nature aiguë ou chronique du stress, de l'âge de l'animal, de son stade de lactation et de son type d'alimentation. Le stress thermique peut également induire une synthèse prématurée de la prostaglandine F2 alpha (PGF2α) (Wolfenson *et al.*, 1997), ce qui peut contribuer au retard de développement de l'embryon et à l'augmentation du risque de mortalité embryonnaire (Ealy *et al.*, 1993 ; Lopez-Gatius *et al.*, 2005).

Le stress thermique s'accompagne d'une augmentation de la concentration du cortisol (Christison & Johnson, 1972), proportionnelle à l'augmentation de la température (Yadav *et al.*, 2015). Cette synthèse de cortisol est moindre chez les animaux thermotolérants que thermosensibles (Nanas *et al.*, 2020). Une augmentation de la cortisolémie altère la capacité de synthèse des hormones stéroïdiennes par les cellules de la granuleuse et la libération pulsatile de la GnRH (Schreiber *et al.*, 1982).

Une augmentation de la prolactinémie est couramment observée lors de stress thermique (do Amaral *et al.*, 2011 ; Scharf *et al.*, 2011 ; Ouellet *et al.*, 2021). Elle semble indépendante de la réduction de la capacité d'ingestion (Ronchi *et al.*, 2001). Elle contribue à inhiber le développement folliculaire et à augmenter le risque d'anœstrus chez la vache allaitante (Lupoli *et al.*, 2001).

Au cours du post-partum, on a observé que les concentrations en insuline, *insuline like growth factor 1* (IGF-1) et glucose étaient inférieures en période estivale (Jonsson *et al.*, 1997 ; Chacha *et al.*, 2022), conséquence possible d'une réduction de l'ingestion alimentaire et d'un bilan énergétique négatif.

Altérations de la température du système génital

Une température rectale supérieure à 39,1°C laisse supposer que l'animal a été exposé à un stress thermique (Toledo *et al.*, 2020). Des valeurs de THI (*Température Humidity Index*) comprises entre 72 et 92 s'accompagnent de températures rectales qui dans la majorité des cas demeurent inférieures à 39,1 voire 40,8°C (Djelailia *et al.*, 2021 ; Cartwright *et al.*, 2022). La température vaginale normale est comprise entre 38,5 et 38,6°C (Wrenn *et al.*, 1958). Des valeurs égales à 39,0 voire 41,1°C ou comprises entre 39,5 et 41,4°C peuvent être observées durant l'œstrus (Suthar *et al.*, 2011 ; Mills *et al.*, 2024) ou lors de phénomènes inflammatoires en post-partum (Vickers *et al.*, 2010). Lors de stress thermique, les températures vaginales augmentent dans

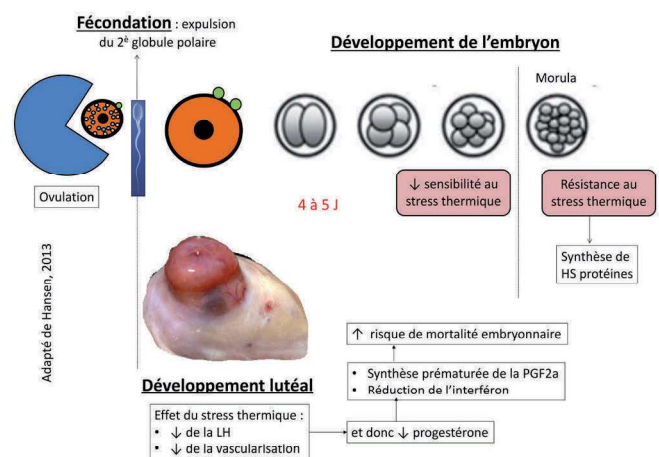


Figure 2 : Effets du stress thermique sur le développement du corps jaune et de l'embryon (adapté de Hansen, 2013) /// *Effects of heat stress on corpus luteum and embryo development (adapted from Hansen, 2013)*

les mêmes proportions que celles enregistrées pour les températures rectales mais restent inférieures à 39,5 voire 40,5°C.

Les températures relevées au niveau des différentes portions du système génital ne sont pas uniformes. Ainsi, celle du vagin (37,7°C) est inférieure à celle des cornes utérines (37,9°C) (El-Sheikh *et al.*, 2013).

La température du follicule pré-ovulatoire est 0,5 à 1,5°C inférieure à celle du stroma ovarien (Greve *et al.*, 1996 ; Lopez-Gatius & Hunter, 2017 ; Lopez-Gatius & Hunter, 2019b), et celle-ci est inférieure à la température rectale (Greve *et al.*, 1996 ; López-Gatius & Hunter, 2019a).

Un stress thermique induit une augmentation de la température ovarienne, qui est habituellement moindre que celle de la température rectale (López-Gatius & Hunter, 2017 ; 2019a et 2019b). L'augmentation de la fertilité implique une diminution de la température du système génital. Ainsi, la température du col au moment de l'insémination est significativement plus basse que celles du rectum en cas de gestation. Il en est de même au 7^e jour suivant l'insémination, en cas d'absence de gestation (Lopez-Gatius *et al.*, 2021). Une réduction de la différence de température entre le stroma ovarien et le rectum s'accompagne d'un risque accru d'absence d'ovulation, la température du follicule pré-ovulatoire devant être comprise entre 36,8 et 37,6°C (Lopez-Gatius & Hunter, 2017 ; Lopez-Gatius & Hunter, 2019b). Les mécanismes de ces effets restent à préciser. Il est possible qu'une augmentation de la température ovarienne se traduise par un changement du métabolisme intrafolliculaire (Pollock *et al.*, 2023) voire une réduction de sa vascularisation (Honig *et al.*, 2016) et donc une altération des apports nutritifs et hormonaux nécessaires à la compétence de l'ovocyte (Da Broi *et al.*, 2018). De même, un stress thermique serait de nature à modifier l'environnement utérin (Gómez-Guzmán *et al.*, 2024).

■ L'OVOGENESE

Par ovogenèse, on entend le processus de développement de l'ovocyte au sein du follicule. L'ovocyte est la cellule germinale femelle. Il acquiert progressivement une triple compétence nucléaire, membranaire et développementale qui le rend apte à être fécondé et à assurer les premiers stades du développement embryonnaire. Ce développement se réalise au sein d'une assise de cellules folliculaires, visible après la formation de l'antrum, l'ensemble étant appelé COC (*Cumulus Oophorus Complex*) (Hanzen *et al.*, 2000 ; Denicol & Siqueira, 2023).

Plusieurs synthèses ont été consacrées aux effets du stress thermique sur les différentes phases de l'ovogenèse (Hansen, 2013 ; Roth, 2018 ; Gómez-Guzmán *et al.*, 2024). Un stress thermique altère les processus de la maturation nucléaire et cytoplasmique de l'ovocyte. Ces processus concernent l'activation des gènes (transcription) impliqués dans la maturation ovocytaire et les premiers stades de développement de l'embryon mais également le système mitochondrial impliqué dans la compétence ovocytaire (Roth, 2018 ; Boni, 2019). Les ovocytes récoltés en été à l'abattoir ou par ovum pick-up (OPU) témoignent d'une compétence moindre et d'une capacité plus faible à se développer jusqu'au stade de blastocyste (Sa *et al.*, 2018 ; Báez *et al.*, 2022).

Les études de fécondation menées *in vitro* confirment que d'une manière générale, des températures de maturation des ovocytes comprises entre 39,5 et 43°C durant des périodes de 6 à 24 heures, un minimum de 6 heures étant nécessaire, s'accompagnent le plus souvent d'une réduction des pourcentages de la maturation des ovocytes, de leur fécondation et de blastocystes obtenus (Roth & Hansen, 2004 ; Gómez-Guzmán *et al.*, 2024 ; Feng *et al.*, 2024).

La température n'est pas le seul facteur d'influence du développement de l'ovocyte. Celui-ci évolue dans un environnement cellulaire qu'est le COC. Un stress thermique est susceptible d'altérer l'expression des gènes impliqués dans la régulation de l'activité mitochondriale de l'ovocyte ou la synthèse par le COC des diverses hormones et facteurs de croissance intervenant dans l'ovulation, l'angiogenèse et la formation du collagène (Vanselow *et al.*, 2016 ; Klabnik *et al.*, 2022). Les blastocystes provenant d'ovocytes exposés à un stress thermique, la durée de ce stress semblant plus conséquente que son importance, présentent diverses modifications de la transcription de leurs gènes impliqués notamment dans la synthèse de diverses protéines du choc thermique (HSP : *Heat Shock Protein*). Un stress thermique est également susceptible de modifier le nombre des cellules et de favoriser ou non l'apoptose par la synthèse des espèces réactives de l'oxygène (ROS) (Edwards & Hansen, 1997 ; Stamperna *et al.*, 2021).

Un effet de la race n'est pas à négliger. La production *in vitro* d'embryons dans les pays tropicaux et subtropicaux est meilleure lorsqu'elle concerne des races de type *Bos indicus* que les races de type *Bos taurus* (Rocha *et al.*, 1998 ; Barros *et al.*, 2006 ; Paula-Lopes *et al.*, 2013). L'exposition des ovocytes à un stress thermique induit une plus grande synthèse de HSP chez des Holstein (*Bos taurus*) que des Gyr (*Bos indicus*) ce qui impliquerait une thermorésistance plus grande de ces dernières (Camargo *et al.*, 2007). Des différences de thermotolérance ont également été observées entre races de *Bos taurus*. Ainsi, les ovocytes et les blastocystes de vaches Holstein seraient plus résistants au stress thermique que les vaches Limousines (Stamperna *et al.*, 2021). L'existence d'espèces voire de races plus thermotolérantes n'exclut pas nécessairement une absence totale de sensibilité au stress thermique, celle-ci pouvant être différente selon les individus (Gómez-Guzmán *et al.*, 2024).

■ L'EMBRYON ET LE FŒTUS

Par embryon, il faut entendre l'organisme en cours de développement, depuis le stade de zygote, structure résultant de la fécondation de l'ovule par un spermatozoïde, jusqu'à la fin de l'organogenèse à savoir la formation des principaux organes acquise vers le 45^e jour de gestation. Ce développement correspond à la période embryonnaire, lui succède la période fœtale. L'embryon entre dans la cavité utérine au 4^e jour suivant la fécondation au stade de jeune morula. Au cours de ses divisions successives, l'embryon passe par différents stades : 2, 4, 8 cellules puis jeune morula (J4), morula (J5), jeune blastocyste (J6), blastocyste (J7), blastocyste expansé (J8) et blastocyste libre (J9) une fois sorti de sa membrane pellucide. Cette période se traduit par une prévalence élevée de mortalité embryonnaire qualifiée de précoce avant le 17^e jour (30 %) ou tardive après le 16^e jour (10 %). Les facteurs responsables sont multiples mais le stress thermique a un effet de plus en plus conséquent (Hanzen *et al.*, 1999 ; Andrade *et al.*, 2024).

La période embryonnaire précoce

Les effets négatifs du stress thermique sur le développement d'embryons obtenus *in vivo* ou *in vitro* s'exercent surtout au cours de la première semaine suivant la fécondation c'est-à-dire avant la 4^e division cellulaire (Edwards *et al.*, 1997 ; De Sousa *et al.*, 1998 ; Hansen, 2007 ; Vieira *et al.*, 2014), stade auquel le génome de l'embryon est activé (Frei *et al.*, 1989) (figure 2). Une synthèse récente a dressé un état des lieux des résultats de 25 publications consacrées à l'évaluation d'une augmentation de la température (39,5 à 41,0°C vs 38,5 à 39,0°C) du milieu de culture des embryons avant le stade morula ou blastocyste durant le plus souvent 6 à 12 heures. Elle confirme que les embryons au stade de deux cellules sont plus sensibles que ceux au stade de 4, 8 voire 16 cellules (Gómez-Guzmán *et al.*, 2024).

Les altérations cellulaires et moléculaires observées chez des embryons produits *in vitro* tout comme leurs mécanismes ont été synthétisés (Boni, 2019 ; Gómez-Guzmán *et al.*, 2024).

Le stress thermique augmente la production de ROS (Sakatani *et al.*, 2003) mais réduit celle de glutathion (GSH) (Edwards *et al.*, 2001). Il augmente l'expression de la cathepsine, une protéase (Yamanaka *et al.*, 2018). Il provoque des altérations du cytosquelette et des mitochondries (Rivera *et al.*, 2003). Il s'accompagne d'une augmentation de la production des protéines du choc thermique (HSP) (Edwards *et al.*, 2001), la résistance à ce choc des morulas s'exerçant également par leur capacité à synthétiser des antioxydants (Sakatani *et al.*, 2013).

A contrario, les morulas et blastocystes seraient moins sensibles du fait de leur capacité à synthétiser des antioxydants mais également des protéines qui contribuent à augmenter sa résistance au choc thermique (HSP : Heat shock proteins) (Hansen 2007, 2019 ; Paes *et al.*, 2016 ; Edwards & Hansen, 1997). Les mécanismes génétiques de ces synthèses ont été précisés tant chez *Bos indicus* (Hansen, 2004) que *Bos taurus* (Hansen & Arechiga, 1999 ; Basirico *et al.*, 2011 ; Hansen, 2007 ; Zhang *et al.*, 2011). La capacité de synthèse de la HSP70 en particulier augmente progressivement jusqu'au 17^e jour (Frei *et al.*, 1989 ; Yaniz *et al.*, 2009), moment de synthèse par la vésicule embryonnaire de l'interféron tau. Cette observation permet d'envisager le transfert d'embryon comme méthode de lutte contre le stress thermique (Baruselli *et al.*, 2011 ; Stewart *et al.*, 2011 ; Vasconcelos *et al.*, 2011). Cette stratégie est cependant moins efficace quand elle recourt à des embryons congelés (Sakatani, 2017). Un effet à moyen terme ne peut être exclu. Un stress thermique réduit le poids de la vésicule embryonnaire après une exposition à un stress thermique entre les jours 8 et 16 de gestation (Biggers *et al.*, 1987). On ne peut par ailleurs exclure les effets potentiels du stress thermique sur l'oviducte et par conséquent sur les relations entre ses cellules et l'embryon (Kölle *et al.*, 2020 ; Dovolou *et al.*, 2023) voire sur le transport des spermatozoïdes et de l'embryon (Kobayashi *et al.*, 2013).

Un stress thermique serait de nature à réduire l'effet négatif de l'interféron sur la synthèse de la PGF2 α . Cette conséquence aurait davantage d'effet sur la régularité du cycle que sur l'embryon (Sakai

et al., 2021). Un stress thermique s'accompagnerait d'une réduction de la synthèse endométriale de l'*Epidermal Growth Factor* (EGF) (Kawano *et al.*, 2022). Un stress thermique n'induit pas ou peu de modifications du protéome de l'oviducte (Assel *et al.*, 2024).

La période embryonnaire tardive

Le stress thermique est un facteur de risque de mortalité embryonnaire tardive survenant au cours du 2^e mois de gestation (Santolaria *et al.*, 2010 ; El-Tarabany & El-Tarabany, 2015). D'une manière générale, l'interruption de la gestation a lieu dans 44 à 50 % des cas au cours du premier mois et dans 5 à 15 % des cas au cours du mois suivant (Reese *et al.*, 2020 ; Wiltbank *et al.*, 2016). Les pourcentages de mortalité embryonnaire entre le 35^e et le 90^e jour de gestation sont respectivement de 2 % en période froide et 12 % en période chaude (García-Ispuerto *et al.*, 2013). Entre le 24^e et le 32^e jour de gestation, la mortalité embryonnaire serait trois fois plus élevée (18,8 vs 5,5 %) en période estivale qu'hivernale (Nanas *et al.*, 2021). De même, le risque d'avortement est 3,7 et 5,4 fois plus élevé en cas de stress thermique selon que la gestation est simple ou double (Lopez-Gatius *et al.*, 2005). Il s'avère également être deux fois plus élevé (7,2 vs 3,6 %) lorsque le THI est compris entre 80 et 85 (El-Tarabany & El-Tarabany, 2015).

Le fœtus est incapable de contrôler sa température indépendamment de sa mère (Knobel, 2014). Son métabolisme par gramme de tissu est plus élevé que celui de sa mère ; 85 % de l'excès de la température fœtale se dissipe via la circulation placentaire, et le reste au travers des membranes placentaires et de la paroi utérine (Asakura, 2004).

La programmation du développement

La notion de programmation du développement (*developmental programming*) implique que les facteurs responsables ou influençant la croissance embryonnaire et fœtale ont également des effets sur la physiologie du nouveau-né après sa naissance (Wu *et al.*, 2006 ; Ghaffari 2022) (figure 3). Ces effets concernent la croissance mais également le métabolisme, l'immunité, la production laitière ou encore la reproduction de la descendance. Diverses études ont démontré l'impact

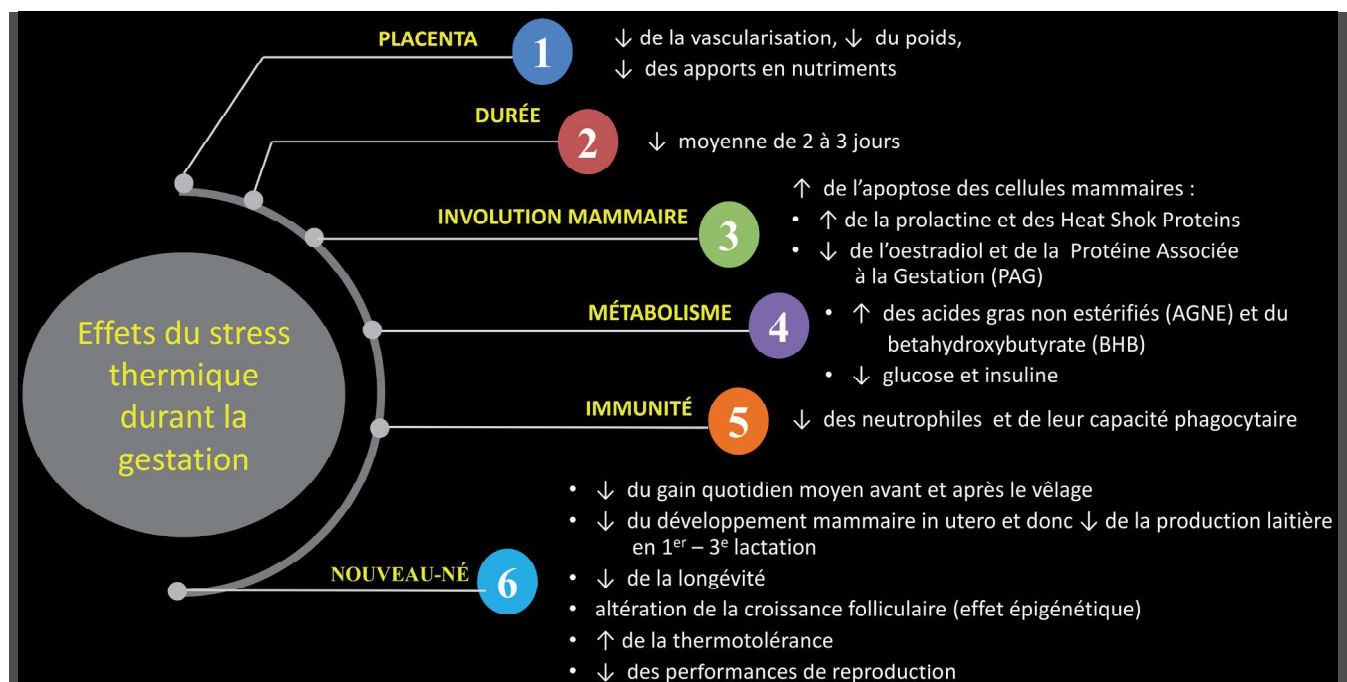


Figure 3 : Effets d'un stress thermique durant la gestation sur la vache et le veau /// Effects of heat stress during gestation on the cow and the calve

négalif d'une restriction alimentaire durant la gestation. Elles ont montré une diminution de 60 % du nombre de follicules antraux chez les veaux (Mossa *et al.*, 2013) et une réduction de l'expression du gène de la FSH au niveau hypophysaire chez les fœtus (Weller *et al.*, 2016). L'impact du niveau de production laitière des mères sur celle des primipares est controversé, conséquence vraisemblable de la multiplicité de leurs facteurs d'influence (Banos *et al.*, 2007 ; Berry *et al.*, 2008 ; Astiz *et al.*, 2014 ; Van Eetvelde *et al.*, 2017). Le cas échéant, les effets d'un stress thermique pourraient s'ajouter à ceux de la production laitière (Recce *et al.*, 2021).

■ LE PLACENTA

Sur le plan hormonal, un stress thermique engendre une réduction de la synthèse de la protéine spécifique de la gestation (PAG) (Thompson *et al.*, 2013) et en milieu de lactation d'une hyperinsulinémie dont on sait qu'elle favorise la lipogenèse dans les tissus graisseux (Wheelock *et al.*, 2010).

Il peut également y avoir des effets sur la vascularisation du placenta. Il induit une réduction de l'apport sanguin au niveau utérin (Oakes *et al.*, 1976) en raison de la vasodilatation périphérique qu'il provoque. Ce phénomène peut entraîner une augmentation des anomalies et de la mortalité fœtales (Graham *et al.*, 1998), qui sont potentiellement renforcées par une réduction du poids placentaire (Alexander & Williams, 1971). Par ailleurs, l'exposition des vaches à un stress thermique contribue à réduire les apports de nutriments nécessaires au développement du veau, en raison de la réduction (1,4 kg/J) de l'ingestion de la matière sèche (Wallace *et al.*, 2002 ; Ouellett *et al.*, 2020). Une augmentation compensatrice de la surface des cotylédons a cependant été constatée. Une étude a montré que les surfaces des cotylédons étaient supérieures chez les vaches accouchant durant les mois d'été plutôt qu'en hiver ou au printemps (Van Eetvelde *et al.*, 2016).

■ LE TARISSEMENT

Effets sur la mère

Sur la base de différentes études, il ressort que la durée moyenne de la gestation se trouve réduite de 2 à 3 jours en moyenne chez les vaches exposées à un stress thermique durant leur période de tarissement (Dado-Senn *et al.*, 2020 ; Ouellett *et al.*, 2020).

La période du tarissement se caractérise par l'involution mammaire, un processus qui assure dans un premier temps l'apoptose des cellules, suivi de leur multiplication, puis par le renouvellement des cellules mammaires, élément indispensable à une production laitière optimale (Capuco *et al.*, 1997 ; Grummer & Rastani, 2004). Un stress thermique contribue à augmenter l'apoptose et à réduire le renouvellement des cellules mammaires (Tao *et al.*, 2011). Diverses hormones sont impliquées dans ce processus. La concentration en prolactine, hormone mammogène et lactogène augmente chez les vaches exposées durant le tarissement à un stress thermique (do Amaral *et al.*, 2010). Cette hormone contribue à réduire l'apoptose (Zarzynska *et al.*, 2007). Il en est de même des HSP dont la synthèse est stimulée par un choc thermique (Collier *et al.*, 2006). La concentration plasmatique en sulfate d'œstrone, un marqueur de la fonction placentaire, est diminuée en cas d'exposition à un stress thermique, ce qui pourrait entraîner une réduction de la prolifération des cellules mammaires (Connor *et al.*, 2007).

La réduction de l'ingestion alimentaire induite par un stress thermique au cours du tarissement s'accompagne de conséquences métaboliques en début de lactation. Ainsi, les vaches non exposées à un stress thermique ont des concentrations plus élevées en acides gras non estérifiés

(AGNE) (Wheelock *et al.*, 2010) et en bêtahydroxybutyrate BHB mais plus faibles en glucose et en insuline (Tao *et al.*, 2012).

Le tarissement est également une période à risque de dysfonctionnement immunitaire (Mallard *et al.*, 1998 ; Tao & Dahl, 2013) dont les effets ont été développés de manière plus spécifique dans le deuxième article consacré aux effets du stress thermique (Hanzen *et al.*, 2024b).

Effets sur le fœtus

Le stress thermique subi par la mère avant son accouchement induit au cours de la dernière semaine de gestation une réduction de 400 à 600 g par jour du poids du fœtus. Cette réduction de poids concernerait également des organes tels que le cœur, le foie, les reins, le thymus et la rate (Muller *et al.*, 1975). Ce stress thermique subi par la mère en pré-partum contribue également à réduire le poids du nouveau-né (do Amaral *et al.*, 2011 ; Tao & Dahl, 2013 ; Monteiro *et al.*, 2016a & 2016b ; Dahl *et al.*, 2019) et sa croissance (Laporta *et al.*, 2017 ; Tao *et al.*, 2012 ; do Amaral *et al.*, 2011). D'une synthèse de 12 études, il ressort qu'un stress thermique en fin de gestation réduit de 12,4 % (4,6 kg) le poids du veau à la naissance et de 10,4 % (7,1 kg) ce poids au sevrage (Ouellett *et al.*, 2020). Lors de leur 1^{re} lactation, les veaux femelles exposés *in utero* à un stress thermique produisent 5 kg de lait en moins par jour au cours de leurs 35 premières semaines de lactation (Monteiro *et al.*, 2016b), cet effet réducteur pouvant également s'observer en 2^e et 3^e lactation (Laporta *et al.*, 2020). Une réduction de 32 % de la longévité a par ailleurs été observée (Monteiro *et al.*, 2016b).

Ces différents effets sont encore en grande partie inexpliqués. La réduction du poids du nouveau-né est en partie attribuable à la diminution de 1,4 kg de MS par jour de l'apport alimentaire de la mère pendant le tarissement (Ouellett *et al.*, 2020), période cruciale pendant laquelle le veau acquiert environ 60 % de son poids de naissance (Bauman & Currie, 1980). La réduction du flux sanguin placentaire n'est pas à exclure (Oakes *et al.*, 1976). La réduction de la durée de la gestation doit également être prise en considération pour expliquer celle du poids du nouveau-né (3,2 jours en moyenne en cas d'exposition à un stress thermique selon une synthèse de 8 études, Ouellett *et al.*, 2020). Ce facteur est important puisqu'un veau Holstein accroît son poids de 500 g en moyenne par jour au cours de la dernière semaine de la gestation (Muller *et al.*, 1975). Ce retard de croissance a également été imputé à l'augmentation de la température du fœtus (Bell *et al.*, 1989).

Un stress thermique encouru par la mère en fin de gestation peut également influencer le développement mammaire *in utero* du fœtus et par conséquent sa production laitière ultérieure, une réduction du nombre d'alvéoles ayant été observé (Skibiël *et al.*, 2018a). Cette conséquence a été observée par certains auteurs (Dahl *et al.*, 2017 ; Tao *et al.*, 2019) mais pas par d'autres (Recce *et al.*, 2021).

Le stress thermique influencerait également le métabolisme du nouveau-né, avec une résistance accrue à l'insuline au niveau de ses tissus périphériques (Monteiro *et al.*, 2016a). Un stress thermique s'accompagnerait également d'une augmentation plasmatique des concentrations en insuline, une diminution de celle des hormones thyroïdiennes, une diminution de la réponse à l'insuline et une altération de ses défenses immunitaires (Tao *et al.*, 2012 ; Tao & Dahl 2013 ; Tao *et al.*, 2014). Compte tenu du rôle de l'insuline dans l'inhibition de la mobilisation du tissu adipeux (Baumgard *et al.*, 2013), une intensification compensatrice de défaut de mobilisation du tissu adipeux, du catabolisme des protéines au niveau de la glande mammaire et des muscles peut en résulter, avec pour conséquence un possible retard de croissance (Magdub *et al.*, 1982). Les génisses nées au printemps et en été témoigneraient d'une sensibilité à l'insuline

plus élevée qui contribuerait à leur plus grande production laitière (Van Eetvelde *et al.*, 2017). Cette réduction de la production laitière pourrait également être imputée à une plus grande résistance à l'insuline au moment du premier vêlage (Bell *et al.*, 2006). Toutefois, on observe que la thermotolérance des veaux dont les mères ont été exposées à un stress thermique au moment de leur fécondation est augmentée. Il en résulte un maintien de leur capacité de production laitière (Brown *et al.*, 2016) et une température rectale moindre lors de leur exposition à un stress thermique (Ahmed *et al.*, 2017).

L'épigénétique offre d'autres perspectives d'explication des effets du stress thermique. Par épigénétique, il faut entendre la discipline de la biologie qui étudie la nature des mécanismes modifiant de manière réversible, transmissible et adaptative l'expression des gènes qui n'interviennent pas dans la séquence nucléotidique de l'ADN (Wu & Sirard 2020). Ces modifications aussi appelées marques génétiques ou encore épigénome sont imputables à des groupes chimiques tels les méthyles. Elles sont partiellement héréditaires au cours des divisions cellulaires. Elles peuvent être activatrices ou inhibitrices de l'expression d'un gène. Les modifications induites par les marques peuvent avoir des conséquences à moyen et long terme et donc se transmettre d'une génération à l'autre. Ces effets sont observables durant la gamétogenèse ou l'ovogenèse mais également durant l'embryogenèse ou la vie néonatale (Wu & Sirard, 2020 ; Beaujean *et al.*, 2020).

Ainsi, l'environnement nutritionnel, l'exposition aux pesticides et herbicides mais aussi les interactions sociales ou encore le stress thermique peuvent avoir des effets sur les gènes impliqués dans le développement fœtal (Reynolds *et al.*, 2019 ; Skibiël *et al.*, 2018b ; Recce *et al.*, 2021 ; Van Niekerk *et al.*, 2021). Un stress thermique peut induire une altération des gènes contrôlant leur développement, les effets pouvant encore se manifester après la puberté (Huber *et al.*, 2020).

Une étude a été conduite en Argentine sur 10 790 vaches laitières et leur descendance. Elle a démontré, après analyse des effets de 12 variables indépendantes en relation avec le THI, que l'exposition des vaches au cours de leur premier trimestre de gestation à un THI ≥ 72 était négativement associée à l'intervalle entre vêlages et à la période d'attente des veaux femelles à qui elles avaient donné naissance (Recce *et al.*, 2021). Des effets similaires sur les performances de croissance des veaux (Monteiro *et al.*, 2016a ; Laporta *et al.*, 2017), sur l'acquisition d'une meilleure résistance au stress thermique (Ahmed *et al.*, 2017) et sur la production laitière (Monteiro *et al.*, 2016b) avaient déjà été observés après exposition des vaches à un stress thermique en fin de gestation durant leur période de tarissement. Les veaux nés après exposition de leur mère à un stress thermique avaient plus de chances de quitter le troupeau avant leur puberté, de présenter des retards de croissance et des malformations. Par ailleurs, leur production laitière en première lactation était moindre, tout comme leur fertilité (Monteiro *et al.*, 2016b). Une autre étude conduite sur 206 vaches a également mis en évidence qu'une exposition des vaches à un stress thermique (THI > 72) durant plus de 2,5 mois au cours des 2^e et 3^e trimestres de gestation avait un effet négatif sur la longévité des vaches, leur fertilité et leur population folliculaire (Akbarinejad *et al.*, 2017).

Les effets à long terme d'un stress thermique subi durant la gestation ont également été étudiés (Dado-Senn *et al.*, 2020 ; Laporta *et al.*, 2020). Les petites filles de vaches exposées à un stress thermique en fin de gestation ont montré une survie réduite avant leur puberté, ainsi qu'une production laitière moindre en 1^{re} lactation (Laporta *et al.*, 2020). Cependant, une étude a rapporté que les veaux ayant subi un stress thermique *in utero* démontrent une plus grande capacité de résistance face à un excès de température (Dado-Senn *et al.*, 2020). Ils présentent des températures rectales et cutanées plus basses, ainsi qu'une transpiration réduite (Ahmed *et al.*, 2017). Leur épaisseur cutanée est moindre, le nombre de glandes sébacées est plus faible,

et leurs glandes sudoripares sont plus éloignées de la surface cutanée par rapport aux veaux qui ont été refroidis durant leur développement utérin (Davidson *et al.*, 2022).

■ LE MALE

La thermorégulation testiculaire conditionne la fertilité du taureau, la température du testicule étant 2 à 6°C inférieure à celle du rectum (Kastelic *et al.*, 1996). Elle est proportionnelle à l'augmentation du nombre de glandes sudoripares scrotales (Mishra *et al.*, 2013). Elle dépend également de la vascularisation du testicule mais également des muscles dartos et crémaster, de la membrane séreuse de la tunique vaginale (Kastelic *et al.*, 1995 ; Makker *et al.*, 2009 ; Mete *et al.*, 2012 ; Morrell, 2020).

Les effets de la saison sur la qualité du sperme sont fort contrastés compte tenu des conditions et méthodes d'examen voire de la race des animaux (Morrell, 2020).

La majorité des auteurs s'accordent à reconnaître un effet délétère d'une augmentation de la température extérieure (> 37 à 40°C) sur la fonction testiculaire des taureaux *Bos taurus* et de *Bos indicus*, les premiers étant plus sensibles que les seconds (Capela *et al.*, 2022 ; Da Silva *et al.*, 2023). Une augmentation de la température durant 2 à 5 jours peut exercer divers effets négatifs durant 6 à 49 jours (Sabés-Alsina *et al.*, 2019 ; Da Silva *et al.*, 2023). Les effets du stress thermique s'exercent le plus souvent au moment de la méiose, de la spermiogenèse et de la phase de maturation épидидymaire que lors de la spermatocytogenèse (Rahman *et al.*, 2018).

Ils se traduisent par une augmentation des formes anormales et une diminution de la concentration et de la motilité des spermatozoïdes (Skinner & Louw, 1996 ; Brito *et al.*, 2004 ; Rahman *et al.*, 2018 ; Boni, 2019 ; Seifi-Jamidi *et al.*, 2020 ; Gloria *et al.*, 2021). La nature des anomalies observées a fait l'objet d'une revue exhaustive (Da Silva *et al.*, 2023). Ces effets seraient davantage observés chez les taureaux plus jeunes (Koivisto *et al.*, 2009).

Un stress thermique est responsable d'une augmentation de la synthèse des protéines du choc thermique (HSP : *Heat shock proteins*) (Collier *et al.*, 2019) et des dérivés réactifs de l'oxygène (ROS : *Reactive oxygen species*) qui sont des espèces chimiques oxygénées telles que des radicaux libres, des ions oxygénés et des peroxydes (Rhoads *et al.*, 2013). On observe également une augmentation des mutations de l'ADN (Perez-Crespo *et al.*, 2008). Ces divers effets s'exerçant sur les spermatozoïdes se traduisent par une réduction de la qualité des blastocystes (Seifi-Jamadi *et al.*, 2020).

Les études relatives aux conséquences hormonales du stress thermique chez le mâle sont peu nombreuses, certaines en mentionnent l'effet négatif sur la synthèse de la testostérone (Rhynes & Ewing, 1973 ; Alves *et al.*, 2016). Les effets du stress thermique sur les spermatozoïdes lors de la fécondation n'ont pour des raisons pratiques pas été étudiés. Une fécondation *in vitro* conduite à $40-41^{\circ}\text{C}$ durant 6 heures n'augmente pas le risque de polyspermie. On observe néanmoins une augmentation de la production de ROS et de protéines du choc thermique (Sakatani *et al.*, 2015). On constate néanmoins une réduction du nombre de blastocystes obtenus sans que pour autant une réduction du nombre de cellules ou de l'apoptose ne soient observées (Amaral *et al.*, 2020 ; Yamanaka *et al.*, 2018). Lorsqu'ils sont soumis durant 4 heures à une température de $40-42^{\circ}\text{C}$, la mobilité des spermatozoïdes est diminuée mais ne s'accompagne pas d'une réduction du nombre de blastocystes ou de polyspermie (Chandolia *et al.*, 1999 ; Hendricks *et al.*, 2009). Lors de la fertilisation, le stress thermique affecterait davantage l'ovocyte que les spermatozoïdes (Paula-Lopes *et al.*, 2013).

■ CONCLUSION

Étant donné le réchauffement climatique global, le stress thermique constitue de plus en plus un facteur de risque majeur d'infertilité et donc d'infécondité. En témoigne le nombre croissant de publications qui leur sont consacrées. Elles ont permis de mieux caractériser les différentes étapes de la reproduction sensibles au stress thermique et dans une certaine mesure ses mécanismes d'effets. Ainsi, les follicules antraux sont davantage concernés que les follicules pré-antraux. L'effet d'un stress thermique altère leur croissance mais également la maturation de l'ovocyte. Il en résulte une augmentation du risque de mortalité embryonnaire précoce. Ces deux effets laissent entrevoir la possibilité de recourir davantage à une reproduction plus saisonnière, voire au transfert d'embryon pour surmonter cette période à risque. Les effets négatifs d'un stress thermique durant la gestation et le tarissement s'ajoutent à ceux de la production laitière et de l'alimentation dans ce qu'il est convenu d'appeler la programmation du développement. L'épigénétique offre un champ d'explication en plein développement des effets du stress thermique durant la gestation et le tarissement. Ces effets sont susceptibles d'altérer les performances de croissance, de production et de reproduction des nouveau-nés. L'importance de ces effets à court et moyen termes, nous invite à réfléchir aux stratégies possibles à mettre en place pour les limiter. Enfin, il apparaît que les effets du stress thermique sur la reproduction du mâle mériteraient d'être davantage investigués.

Remerciements

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

Financement

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

Conflits d'intérêts

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

Contributions des auteurs

CH et DEG ont participé à la conception et à la rédaction du présent travail. PD, JLH, FL ont révisé l'article.

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 étaient 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

- Aguiar, L. H., Hyde, K. A., Pedroza, G. H., & Denicol, A. C. (2020). Heat stress impairs in vitro development of preantral follicles of cattle. *Animal Reproduction Science*, 213, 106277. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2020.106277>
- Ahmed, B. M., Younas, U., Asar, T. O., Dikmen, S., Hansen, P. J., & Dahl, G. E. (2017). Cows exposed to heat stress during fetal life exhibit improved thermal tolerance. *Journal of Animal Science*, 95(8), 3497-3503. <https://doi.org/10.2527/jas.2016.1298>
- Akbarinejad, V., Gharagozlou, F., & Voigani, M. (2017). Temporal effect of maternal heat stress during gestation on the fertility and anti-müllerian hormone concentration of offspring in bovine. *Theriogenology*, 99, 69-78. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2017.05.018>
- Alexander, G., & Williams, D. (1971). Heat stress and development of the conceptus in domestic sheep. *The Journal of Agricultural Science*, 76(1), 53-72. <https://doi.org/10.1017/s0021859600015616>
- Alves, M. B., Andrade, A. F., Arruda, R. P., Batissaco, L., Florez-Rodriguez, S. A., Oliveira, B. M., Torres, M. A., et al. (2016). Recovery of normal testicular temperature after scrotal heat stress in rams assessed by infrared thermography and its effects on seminal characteristics and testosterone blood serum concentration. *Theriogenology*, 86(3), 795-805. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2016.02.034>
- Amaral, C. S., Koch, J., Correa Júnior, E. E., Bertolin, K., Mujica, L. K., Fiorenza, M. F., Rosa, S. G., et al. (2020). Heat stress on oocyte or zygote compromises embryo development, impairs interferon tau production and increases reactive oxygen species and oxidative stress in bovine embryos produced in vitro. *Molecular Reproduction and Development*, 87(8), 899-909. <https://doi.org/10.1002/mrd.23407>
- Andrade, M. F., & Simões, J. (2024). Embryonic and fetal mortality in dairy cows: Incidence, relevance, and diagnosis approach in field conditions. *Dairy*, 5(3), 526-541. <https://doi.org/10.3390/dairy5030040>
- Asakura, H. (2004). Fetal and neonatal Thermoregulation. *Journal of Nippon Medical School*, 71(6), 360-370. <https://doi.org/10.1272/jnms.71.360>
- Assel, A., Besenfelder, U., Wagener, K., Allram, J., Tekin, M., Vogl, C., Drillich, M., et al. (2023). 64 Is the proteome of the oviductal fluid in dairy cows affected by heat stress? *Reproduction, Fertility and Development*, 36(2), 183-183. <https://doi.org/10.1071/rdv36n2ab64>
- Astiz, S., Gonzalez-Bulnes, A., Sebastian, F., Fargas, O., Cano, I., & Cuesta, P. (2014). Maternal aging affects life performance of progeny in a Holstein dairy cow model. *Journal of Developmental Origins of Health and Disease*, 5(5), 374-384. <https://doi.org/10.1017/s2040174414000361>
- Austin, E. J., Mihm, M., Ryan, M. P., Williams, D. H., & Roche, J. F. (1999). Effect of duration of dominance of the ovulatory follicle on onset of oestrus and fertility in heifers. *Journal of Animal Science*, 77(8), 2219. <https://doi.org/10.2527/1999.7782219x>
- Badinga, L., Collier, R., Thatcher, W., & Wilcox, C. (1985). Effects of climatic and management factors on conception rate of dairy cattle in sub-tropical environment. *Journal of Dairy Science*, 68(1), 78-85. [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(85\)80800-6](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(85)80800-6)
- Báez, F., López Darriulat, R., Rodríguez-Orsorio, N., & Viñoles, C. (2022). Effect of season on Germinal vesicle stage, quality, and subsequent in vitro developmental competence in bovine cumulus-oocyte complexes. *Journal of Thermal Biology*, 103, 103171. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2021.103171>
- Banos, G., Brotherstone, S., & Coffey, M. (2007). Prenatal maternal effects on body condition score, female fertility, and milk yield of dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 90(7), 3490-3499. <https://doi.org/10.3168/jds.2006-809>
- Barros, C. M., Pegorer, M. F., Vasconcelos, J. L., Eberhardt, B. G., & Monteiro, F. M. (2006). Importance of sperm genotype (indicus versus Taurus) for fertility and embryonic development at elevated temperatures. *Theriogenology*, 65(1), 210-218. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2005.09.024>
- Baruselli, P., Ferreira, R., Sales, J., Gimenes, L., Sá Filho, M., Martins, C., Rodrigues, C., et al. (2011). Timed embryo transfer programs for management of donor and recipient cattle. *Theriogenology*, 76(9), 1583-1593. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2011.06.006>
- Basiricò, L., Morera, P., Primi, V., Lacetera, N., Nardone, A., & Bernabucci, U. (2011). Cellular thermotolerance is associated with heat shock protein 70.1 genetic polymorphisms in Holstein lactating cows. *Cell Stress and Chaperones*, 16(4), 441-448. <https://doi.org/10.1007/s12192-011-0257-7>
- Bauman, D. E., & Bruce Currie, W. (1980). Partitioning of nutrients during pregnancy and lactation: A review of mechanisms involving homeostasis and Homeorhesis. *Journal of Dairy Science*, 63(9), 1514-1529. [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(80\)83111-0](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(80)83111-0)

- Baumgard, L. H., & Rhoads, R. P. (2013). Effects of heat stress on Postabsorptive metabolism and energetics. *Annual Review of Animal Biosciences*, 1(1), 311-337. <https://doi.org/10.1146/annurev-animal-031412-103644>
- Beaujean, N., Boutinaud, M., Devinoy, E., Jammes, H., Le Guillou, S., Le Provost, F., Leroux, C., et al. (2020). L'épigénétique et la construction du phénotype chez le bovin. *INRAE Productions Animales*, 33(2). <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2020.33.2.4477>
- Bech-Sabat, G., López-Gatius, F., Yáñez, J., García-Ispuerto, I., Santolaria, P., Serrano, B., Sulon, J., et al. (2008). Factors affecting plasma progesterone in the early fetal period in high producing dairy cows. *Theriogenology*, 69(4), 426-432. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2007.10.012>
- Bell, A. W. (2006). Prenatal programming of postnatal productivity and health of livestock: A brief review. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 46(7), 725. <https://doi.org/10.1071/ea06006>
- Bell, A. W., McBride, B. W., Slepatis, R., Early, R. J., & Currie, W. B. (1989). Chronic heat stress and prenatal development in sheep: I. Conceptus growth and maternal plasma hormones and metabolites. *Journal of Animal Science*, 67(12), 3289. <https://doi.org/10.2527/jas1989.67123289x>
- Berry, D., Lonergan, P., Butler, S., Cromie, A., Fair, T., Mossa, F., & Evans, A. (2008). Negative influence of high maternal milk production before and after conception on offspring survival and milk production in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 91(1), 329-337. <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0438>
- Biggers, B. G., Geisert, R. D., Wetteman, R. P., & Buchanan, D. S. (1987). Effect of heat stress on early embryonic development in the beef cow. *Journal of Animal Science*, 64(5), 1512-1518. <https://doi.org/10.2527/jas1987.6451512x>
- Biran, D., Braw-Tal, R., Gendelman, M., Lavon, Y., & Roth, Z. (2015). ACTH administration during formation of preovulatory follicles impairs steroidogenesis and angiogenesis in association with ovulation failure in lactating cows. *Domestic Animal Endocrinology*, 53, 52-59. <https://doi.org/10.1016/j.domaniend.2015.05.002>
- Boni, R. (2019). Heat stress, a serious threat to reproductive function in animals and humans. *Molecular Reproduction and Development*, 86(10), 1307-1323. <https://doi.org/10.1002/mrd.23123>
- Boni, R., Perrone, L., & Cecchini, S. (2014). Heat stress affects reproductive performance of high producing dairy cows bred in an area of southern Apennines. *Livestock Science*, 160, 172-177. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2013.11.016>
- Bouraoui, R., Lahmar, M., Majdoub, A., Djemali, M., & Belyea, R. (2002). The relationship of temperature-humidity index with milk production of dairy cows in a Mediterranean climate. *Animal Research*, 51(6), 479-491. <https://doi.org/10.1051/animres:2002036>
- Bridges, P., Brusie, M., & Fortune, J. (2005). Elevated temperature (heat stress) in vitro reduces androstenedione and estradiol and increases progesterone secretion by follicular cells from bovine dominant follicles. *Domestic Animal Endocrinology*, 29(3), 508-522. <https://doi.org/10.1016/j.domaniend.2005.02.017>
- Brito, L. F., Silva, A. E., Barbosa, R. T., & Kastelic, J. P. (2004). Testicular thermoregulation in *Bos indicus*, crossbred and *Bos Taurus* bulls: Relationship with scrotal, testicular vascular cone and testicular morphology, and effects on semen quality and sperm production. *Theriogenology*, 61(2-3), 511-528. [https://doi.org/10.1016/s0093-691x\(03\)00231-0](https://doi.org/10.1016/s0093-691x(03)00231-0)
- Brown, B. M., Stallings, J. W., Clay, J. S., & Rhoads, M. L. (2015). Periconceptional heat stress of Holstein dams is associated with differences in daughter milk production and composition during multiple lactations. *PLOS ONE*, 10(10), e0133574. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133574>
- Camargo, L., Viana, J., Ramos, A., Serapião, R., De Sa, W., Ferreira, A., Guimarães, M., et al. (2007). Developmental competence and expression of the Hsp 70.1 gene in oocytes obtained from *Bos indicus* and *Bos Taurus* dairy cows in a tropical environment. *Theriogenology*, 68(4), 626-632. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2007.03.029>
- Capela, L., Leites, I., Romão, R., Lopes-da-Costa, L., & Pereira, R. M. (2022). Impact of heat stress on bovine sperm quality and competence. *Animals*, 12(8), 975. <https://doi.org/10.3390/ani12080975>
- Capuco, A., Akers, R., & Smith, J. (1997). Mammary growth in Holstein cows during the dry period: Quantification of nucleic acids and histology. *Journal of Dairy Science*, 80(3), 477-487. [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(97\)75960-5](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(97)75960-5)
- Cartwright, S., Schmied, J., Livernois, A., & Mallard, B. A. (2022). Physiological response to heat stress in immune Phenotyped Canadian Holstein dairy cattle in free-stall and tie-stall management systems. *Frontiers in Animal Science*, 3. <https://doi.org/10.3389/fanim.2022.852958>
- Cartwright, S. L., Schmied, J., Karrow, N., & Mallard, B. A. (2023). Impact of heat stress on dairy cattle and selection strategies for thermotolerance: A review. *Frontiers in Veterinary Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1198697>
- Cerri, R. L., Rutigliano, H. M., Chebel, R. C., & Santos, J. E. (2009). Period of dominance of the ovulatory follicle influences embryo quality in lactating dairy cows. *Reproduction*, 137(5), 813-823. <https://doi.org/10.1530/rep-08-0242>
- Chacha, F., Gherissi, D. E., Lamraoui, R., Afri-Bouzebda, F., & Bouzebda, Z. (2022). Evaluation of body condition, daily milk production and biochemical parameters during the postpartum period according to calving season in Montbeliard dairy cows reared in the semi-arid region – Algeria. *Veterinarska stanica*, 53(6), 677-687. <https://doi.org/10.46419/vs.53.6.3>
- Chandolia, R., Reinertsen, E., & Hansen, P. (1999). Short communication: Lack of breed differences in responses of bovine spermatozoa to heat shock. *Journal of Dairy Science*, 82(12), 2617-2619. [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(99\)75517-7](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(99)75517-7)
- Chawicha, T. G., & Mummied, Y. Y. (2022). An overview of how heat stress impacts dairy cattle fertility. *Multidisciplinary Reviews*, 5(3), 1-10. <https://doi.org/10.31893/multirev.2022014>
- Christison, G. I., & Johnson, H. D. (1972). Cortisol turnover in heat-stressed cows. *Journal of Animal Science*, 35(5), 1005-1010. <https://doi.org/10.2527/jas1972.3551005x>
- Clarke, I. J. (2014). Interface between metabolic balance and reproduction in ruminants: Focus on the hypothalamus and pituitary. *Hormones and Behavior*, 66(1), 15-40. <https://doi.org/10.1016/j.yhbeh.2014.02.005>
- Collier, R., Beede, D., Thatcher, W., Israel, L., & Wilcox, C. (1982). Influences of environment and its modification on dairy animal health and production. *Journal of Dairy Science*, 65(11), 2213-2227. [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(82\)82484-3](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(82)82484-3)
- Collier, R. J., Doelger, S. G., Head, H. H., Thatcher, W. W., & Wilcox, C. J. (1982). Effects of heat stress during pregnancy on maternal hormone concentrations, calf birth weight and postpartum milk yield of Holstein cows. *Journal of Animal Science*, 54(2), 309-319. <https://doi.org/10.2527/jas1982.542309x>
- Collier, R. J., Stiening, C. M., Pollard, B. C., VanBaale, M. J., Baumgard, L. H., Gentry, P. C., & Coussens, P. M. (2006). Use of gene expression microarrays for evaluating environmental stress tolerance at the cellular level in cattle. *Journal of Animal Science*, 84(suppl_13), E1-E13. https://doi.org/10.2527/2006.8413_supple1x
- Collier, R. J., Baumgard, L. H., Zimelman, R. B., & Xiao, Y. (2018). Heat stress: Physiology of acclimation and adaptation. *Animal Frontiers*, 9(1), 12-19. <https://doi.org/10.1093/af/vfy031>
- Connor, E., Meyer, M., Li, R., Van Amburgh, M., Boisclair, Y., & Capuco, A. (2007). Regulation of gene expression in the bovine mammary gland by ovarian steroids. *Journal of Dairy Science*, 90, E55-E65. <https://doi.org/10.3168/jds.2006-466>
- Cortvrindt, R., & Smitz, J. (2001). In vitro follicle growth: Achievements in mammalian species. *Reproduction in Domestic Animals*, 36(1), 3-9. <https://doi.org/10.1046/j.1439-0531.2001.00261.x>
- Da Broi, M. G., Giorgi, V. S., Wang, F., Keefe, D. L., Albertini, D., & Navarro, P. A. (2018). Influence of follicular fluid and cumulus cells on oocyte quality: Clinical implications. *Journal of Assisted Reproduction and Genetics*, 35(5), 735-751. <https://doi.org/10.1007/s10815-018-1143-3>
- 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>
- Dado-Senn, B., Laporta, J., & Dahl, G. (2020). Carry over effects of late-gestational heat stress on dairy cattle progeny. *Theriogenology*, 154, 17-23. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2020.05.012>
- Dahl, G. E., Tao, S., & Laporta, J. (2017). Triennial lactation symposium/Bolfa: Late gestation heat stress of dairy cattle programs dam and daughter milk production1. *Journal of Animal Science*, 95(12), 5701-5710. <https://doi.org/10.2527/jas2017.2006>
- Dahl, G. E., Skibiell, A. L., & Laporta, J. (2019). In utero heat stress programs reduced performance and health in calves. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 35(2), 343-353. <https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2019.02.005>
- Dash, S., Chakravarty, A. K., Singh, A., Upadhyay, A., Singh, M., & Yousuf, S. (2016). Effect of heat stress on reproductive performances of dairy cattle and buffaloes: A review. *Veterinary World*, 9(3), 235-244. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2016.235-244>

- Davidson, B., Sarlo Davila, K., Mateescu, R., Dahl, G., & Laporta, J. (2022). Effect of in utero exposure to hyperthermia on postnatal hair length, skin morphology, and thermoregulatory responses. *Journal of Dairy Science*, 105(11), 8898-8910. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22202>
- Denicol, A. C., & Siqueira, L. G. (2023). Maternal contributions to pregnancy success: From gamete quality to uterine environment. *Animal Reproduction*, 20(2). <https://doi.org/10.1590/1984-3143-ar2023-0085>
- De Rensis, F., Saleri, R., Garcia-Ispuerto, I., Scaramuzzi, R., & López-Gatius, F. (2021). Effects of heat stress on follicular physiology in dairy cows. *Animals*, 11(12), 3406. <https://doi.org/10.3390/ani11123406>
- De Sousa, P., Caveney, A., Westhusin, M., & Watson, A. (1998). Temporal patterns of embryonic gene expression and their dependence on oogenetic factors. *Theriogenology*, 49(1), 115-128. [https://doi.org/10.1016/s0093-691x\(97\)00406-8](https://doi.org/10.1016/s0093-691x(97)00406-8)
- Djelailia, H., M'Hamdi, N., Bouraoui, R., & Najar, T. (2021). Effects of thermal stress on physiological state and hormone concentrations in Holstein cows under arid climatic conditions. *South African Journal of Animal Science*, 51(4), 452-459. <https://doi.org/10.4314/sajas.v51i4.5>
- Amaral, B. D., Connor, E., Tao, S., Hayen, J., Bubolz, J., & Dahl, G. (2010). Heat stress abatement during the dry period influences prolactin signaling in lymphocytes. *Domestic Animal Endocrinology*, 38(1), 38-45. <https://doi.org/10.1016/j.domaniend.2009.07.005>
- Do Amaral, B., Connor, E., Tao, S., Hayen, M., Bubolz, J., & Dahl, G. (2011). Heat stress abatement during the dry period influences metabolic gene expression and improves immune status in the transition period of dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 94(1), 86-96. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-3004>
- Dovolou, E., Giannoulis, T., Nanas, I., & Amiridis, G. S. (2023). Heat stress: A serious disruptor of the reproductive physiology of dairy cows. *Animals*, 13(11), 1846. <https://doi.org/10.3390/ani13111846>
- Dransfield, M., Nebel, R., Pearson, R., & Warnick, L. (1998). Timing of insemination for dairy cows identified in Estrus by a Radiotelemetric Estrus detection system. *Journal of Dairy Science*, 81(7), 1874-1882. [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(98\)75758-3](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(98)75758-3)
- Ealy, A. D., Drost, M., & Hansen, P. J. (1993). Developmental changes in embryonic resistance to adverse effects of maternal heat stress in cows. *Journal of Dairy Science*, 76(10), 2899-2905. [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(93\)77629-8](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(93)77629-8)
- Edwards, J. L., & Hansen, P. J. (1997). Differential responses of bovine oocytes and preimplantation embryos to heat shock. *Molecular Reproduction and Development*, 46(2), 138-145. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1098-2795\(199702\)46:2<138::aid-mrd4>3.0.co;2-r](https://doi.org/10.1002/(sici)1098-2795(199702)46:2<138::aid-mrd4>3.0.co;2-r)
- Edwards, J. L., Ealy, A. D., Monterroso, V. H., & Hansen, P. J. (1997). Ontogeny of temperature-regulated heat shock protein 70 synthesis in preimplantation bovine embryos. *Molecular Reproduction and Development*, 48(1), 25-33. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1098-2795\(199709\)48:1<25::aid-mrd4>3.0.co;2-r](https://doi.org/10.1002/(sici)1098-2795(199709)48:1<25::aid-mrd4>3.0.co;2-r)
- Edwards, J., King, W., Kawarsky, S., & Ealy, A. (2001). Responsiveness of early embryos to environmental insults: Potential protective roles of HSP70 and glutathione. *Theriogenology*, 55(1), 209-223. [https://doi.org/10.1016/s0093-691x\(00\)00455-6](https://doi.org/10.1016/s0093-691x(00)00455-6)
- El-Sheikh Ali, H., Kitahara, G., Tamura, Y., Kobayashi, I., Hemmi, K., Torisu, S., Sameshima, H., et al. (2013). Presence of a temperature gradient among genital tract portions and the thermal changes within these portions over the Estrous cycle in beef cows. *Journal of Reproduction and Development*, 59(1), 59-65. <https://doi.org/10.1262/jrd.2012-017>
- El-Tarabany, M. S., & El-Tarabany, A. A. (2015). Impact of maternal heat stress at insemination on the subsequent reproductive performance of Holstein, Brown Swiss, and their crosses. *Theriogenology*, 84(9), 1523-1529. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2015.07.040>
- Erb, R. E., Wilbur, J. W., & Hilton, J. H. 1940. Some factors affecting breeding efficiency in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 23, 549
- Eulmi, H., Deghrouche, K., & Gherissi, D. E. (2023). Dairy cattle breeding practices, production and constraints in arid and semi-arid Algerian bioclimatic environments. *International Journal of Environmental Studies*, 81(3), 1238-1255. <https://doi.org/10.1080/00207233.2023.2228616>
- Feng, X., Li, C., Zhang, H., Zhang, P., Shahzad, M., Du, W., & Zhao, X. (2024). Heat-stress impacts on developing bovine oocytes: Unraveling epigenetic changes, oxidative stress, and developmental resilience. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(9), 4808. <https://doi.org/10.3390/ijms25094808>
- Ferag, A., Gherissi, D. E., Khenenou, T., Boughanem, A., Moussa, H. H., & Maamour, A. (2024). Reproduction efficiency of native and imported Algerian cattle under challenging climatic conditions. *The 9th International Seminar (MGLBR) Management and Genetic Improvement of Biological Resources*, 13. <https://doi.org/10.3390/blsf2024036013>
- Frei, R. E., Schultz, G. A., & Church, R. B. (1989). Qualitative and quantitative changes in protein synthesis occur at the 8-16-cell stage of embryogenesis in the cow. *Reproduction*, 86(2), 637-641. <https://doi.org/10.1530/jrf.0.0860637>
- Garcia-Ispuerto, I., Abdelfatah, A., & López-Gatius, F. (2012). Melatonin treatment at dry-off improves reproductive performance postpartum in high-producing dairy cows under heat stress conditions. *Reproduction in Domestic Animals*, 48(4), 577-583. <https://doi.org/10.1111/rda.12128>
- Garcia-Ispuerto, I., De Rensis, F., Pérez-Salas, J., Nunes, J., Pradés, B., Serrano-Pérez, B., & López-Gatius, F. (2019). The GnRH analogue depherline given in a fixed-time AI protocol improves ovulation and embryo survival in dairy cows. *Research in Veterinary Science*, 122, 170-174. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2018.11.020>
- Ghaffari, M. H. (2022). Developmental programming: Prenatal and postnatal consequences of hyperthermia in dairy cows and calves. *Domestic Animal Endocrinology*, 80, 106723. <https://doi.org/10.1016/j.domaniend.2022.106723>
- Gilad, E., Meidan, R., Berman, A., Graber, Y., & Wolfenson, D. (1993). Effect of heat stress on tonic and gnRH-induced gonadotrophin secretion in relation to concentration of oestradiol in plasma of cyclic cows. *Reproduction*, 99(2), 315-321. <https://doi.org/10.1530/jrf.0.0990315>
- Gloria, A., Candeloro, L., Wegher, L., Robbe, D., Carluccio, A., & Contri, A. (2021). Correction to: Environmental temperature and relative humidity differently affect the sperm characteristics in Brown Swiss and Belgian blue bulls. *International Journal of Biometeorology*, 65(12), 2201-2201. <https://doi.org/10.1007/s00484-021-02200-2>
- Gómez-Guzmán, J. A., Parra-Bracamonte, G. M., & Velazquez, M. A. (2024). Impact of heat stress on oocyte developmental competence and pre-implantation embryo viability in cattle. *Animals*, 14(15), 2280. <https://doi.org/10.3390/ani14152280>
- Graham, J. M., Edwards, M. J., & Edwards, M. J. (1998). Teratogen update: Gestational effects of maternal hyperthermia due to febrile illnesses and resultant patterns of defects in humans. *Teratology*, 58(5), 209-221. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1096-9926\(199811\)58:5<209::aid-tera8>3.0.co;2-q](https://doi.org/10.1002/(sici)1096-9926(199811)58:5<209::aid-tera8>3.0.co;2-q)
- Greve, T., Grøndahl, C., Schmidt, M., Hunter, R. H. F., & Avery, B. (1996). Bovine preovulatory follicular temperature: Implications for *in vitro* production of embryos. *Archives of Animal Breeding*, 39, 7-14
- Grummer, R., & Rastani, R. (2004). Why reevaluate dry period length? *Journal of Dairy Science*, 87, E77-E85. [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(04\)70063-6](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(04)70063-6)
- Guzeloglu, A., Ambrose, J., Kassa, T., Diaz, T., Thatcher, M., & Thatcher, W. (2001). Long-term follicular dynamics and biochemical characteristics of dominant follicles in dairy cows subjected to acute heat stress. *Animal Reproduction Science*, 66(1-2), 15-34. [https://doi.org/10.1016/s0378-4320\(01\)00082-3](https://doi.org/10.1016/s0378-4320(01)00082-3)
- Gwazdauskas, F., Thatcher, W., Kiddy, C., Paape, M., & Wilcox, C. (1981). Hormonal patterns during heat stress following PGF2 α -Tham salt induced luteal regression in heifers. *Theriogenology*, 16(3), 271-285. [https://doi.org/10.1016/0093-691x\(81\)90012-1](https://doi.org/10.1016/0093-691x(81)90012-1)
- 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. (2013). Antecedents of mammalian fertility: Lessons from the heat-stressed cow regarding the importance of oocyte competence for fertilization and embryonic development. *Animal Frontiers*, 3(4), 34-39. <https://doi.org/10.2527/af.2013-0031>
- 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., & 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., Drion, P., Lourtie, O., Depierreux, C., & Christians, E. (1999). La mortalité embryonnaire. 1. Aspects cliniques et facteurs étiologiques dans l'espèce bovine. *Annales de Médecine Vétérinaire*, 143, 91-118. <https://hdl.handle.net/2268/8978>
- Hanzen, C., Lourtie, O., Derkenne, F., & Drion, P. (2000). Mise au point relative à la croissance folliculaire chez la vache. 1. Aspects morphologiques et cinétiques. *Annales de Médecine Vétérinaire*, 144, 223-235. <https://hdl.handle.net/2268/9206>
- Hanzen, C., Delhez, P., Knapp, E., Hornick, J., & 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, 37379. <https://doi.org/10.19182/remvt.37379>
- Hanzen, C., Delhez, P., Hornick, J., 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, 37380. <https://doi.org/10.19182/remvt.37380>
- Hendricks, K. E., Martins, L., & Hansen, P. J. (2009). Consequences for the bovine embryo of being derived from a spermatozoon subjected to post-ejaculatory aging and heat shock: Development to the blastocyst stage and sex ratio. *Journal of Reproduction and Development*, 55(1), 69-74. <https://doi.org/10.1262/jrd.20097>
- Honig, H., Ofer, L., Kaim, M., Jacobi, S., Shinder, D., & Gershon, E. (2016). The effect of cooling management on blood flow to the dominant follicle and estrous cycle length at heat stress. *Theriogenology*, 86(2), 626-634. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2016.02.017>
- Huber, E., Notaro, U., Recce, S., Rodríguez, F., Ortega, H., Salvetti, N., & Rey, F. (2020). Fetal programming in dairy cows: Effect of heat stress on progeny fertility and associations with the hypothalamic-pituitary-adrenal axis functions. *Animal Reproduction Science*, 216, 106348. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2020.106348>
- Hyttel, P., Viuff, D., Fair, T., Laurincik, J., Thomsen, P., Callesen, H., Vos, P., et al. (2001). Ribosomal RNA gene expression and chromosome aberrations in bovine oocytes and preimplantation embryos. *Reproduction*, 122(1), 21-30. <https://doi.org/10.1530/rep.0.1220021>
- Ioannis, N., Eleni, D., Dimitrios, P., Katerina, D., Thomas-Markos, C., Maria, S., Panagiotis, G., et al. (2021). Age, gestational and heat stress effects on ghrelin secretion in dairy cattle. *Theriogenology*, 176, 82-93. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2021.09.028>
- Petrocchi Jasinski, F., Evangelista, C., Basiricò, L., & Bernabucci, U. (2023). Responses of dairy buffalo to heat stress conditions and mitigation strategies: A review. *Animals*, 13(7), 1260. <https://doi.org/10.3390/ani13071260>
- Jitjumnong, J., Moonmanee, T., Sudwan, P., Mektrirat, R., Osathanunkul, M., Navanukraw, C., Panatuk, J., et al. (2020). Associations among thermal biology, preovulatory follicle diameter, follicular and luteal vascularities, and sex steroid hormone concentrations during preovulatory and postovulatory periods in tropical beef cows. *Animal Reproduction Science*, 213, 106281. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2020.106281>
- Jonsson, N., McGowan, M., McGuigan, K., Davison, T., Hussain, A., Kafi, M., & Matschoss, A. (1997). Relationships among calving season, heat load, energy balance and postpartum ovulation of dairy cows in a subtropical environment. *Animal Reproduction Science*, 47(4), 315-326. [https://doi.org/10.1016/s0378-4320\(97\)00014-6](https://doi.org/10.1016/s0378-4320(97)00014-6)
- Jordan, E. (2003). Effects of heat stress on reproduction. *Journal of Dairy Science*, 86, E104-E114. [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(03\)74043-0](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(03)74043-0)
- Kadokawa, H., Suzuki, S., & Hashizume, T. (2008). Kisspeptin-10 stimulates the secretion of growth hormone and prolactin directly from cultured bovine anterior pituitary cells. *Animal Reproduction Science*, 105(3-4), 404-408. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2007.11.005>
- Kastelic, J., Coulter, G., & Cook, R. (1995). Scrotal surface, subcutaneous, intratesticular, and intraepididymal temperatures in bulls. *Theriogenology*, 44(1), 147-152. [https://doi.org/10.1016/0093-691x\(95\)00155-2](https://doi.org/10.1016/0093-691x(95)00155-2)
- Kastelic, J. P., Cook, R. B., & Coulter, G. H. (1996). Contribution of the scrotum and testes to scrotal and testicular thermoregulation in bulls and rams. *Reproduction*, 108(1), 81-85. <https://doi.org/10.1530/jrf.0.1080081>
- Kawano, K., Yanagawa, Y., Nagano, M., & Katagiri, S. (2022). Effects of heat stress on the endometrial epidermal growth factor profile and fertility in dairy cows. *Journal of Reproduction and Development*, 68(2), 144-151. <https://doi.org/10.1262/jrd.2021-120>
- Klabnik, J. L., Christenson, L. K., Gunewardena, S. S., Pohler, K. G., Rispoli, L. A., Payton, R. R., Moorey, S. E., et al. (2022). Heat-induced increases in body temperature in lactating dairy cows: Impact on the cumulus and granulosa cell transcriptome of the periovulatory follicle. *Journal of Animal Science*, 100(7). <https://doi.org/10.1093/jas/skac121>
- Kobayashi, Y., Wakamiya, K., Kohka, M., Yamamoto, Y., & Okuda, K. (2013). Summer heat stress affects prostaglandin synthesis in the bovine oviduct. *Reproduction*, 146(2), 103-110. <https://doi.org/10.1530/rep-12-0479>
- Koivisto, M., Costa, M., Perri, S., & Vicente, W. (2009). The effect of season on semen characteristics and Freezability in *Bos indicus* and *Bos taurus* bulls in the southeastern region of Brazil. *Reproduction in Domestic Animals*, 44(4), 587-592. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0531.2008.01023.x>
- Kölle, S., Hughes, B., & Steele, H. (2020). Early embryo-maternal communication in the oviduct: A review. *Molecular Reproduction and Development*, 87(6), 650-662. <https://doi.org/10.1002/mrd.23352>
- Knobel, R. B. (2014). Fetal and neonatal thermal physiology. *Newborn and Infant Nursing Reviews*, 14(2), 45-49. <https://doi.org/10.1053/j.nainr.2014.03.003>
- Laporta, J., Fabris, T., Skibieli, A., Powell, J., Hayen, M., Horvath, K., Miller-Cushon, E., et al. (2017). In utero exposure to heat stress during late gestation has prolonged effects on the activity patterns and growth of dairy calves. *Journal of Dairy Science*, 100(4), 2976-2984. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11993>
- Laporta, J., Ferreira, F., Ouellet, V., Dado-Senn, B., Almeida, A., De Vries, A., & Dahl, G. (2020). Late-gestation heat stress impairs daughter and grand-daughter lifetime performance. *Journal of Dairy Science*, 103(8), 7555-7568. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-18154>
- Lopez-Diaz, M., & Bosu, W. (1992). A review and an update of cystic ovarian degeneration in ruminants. *Theriogenology*, 37(6), 1163-1183. [https://doi.org/10.1016/0093-691x\(92\)90173-o](https://doi.org/10.1016/0093-691x(92)90173-o)
- López-Gatius, F. (2003). Is fertility declining in dairy cattle? *Theriogenology*, 60(1), 89-99. [https://doi.org/10.1016/s0093-691x\(02\)01359-6](https://doi.org/10.1016/s0093-691x(02)01359-6)
- López-Gatius, F., & Hunter, R. (2017). Clinical relevance of pre-ovulatory follicular temperature in heat-stressed lactating dairy cows. *Reproduction in Domestic Animals*, 52(3), 366-370. <https://doi.org/10.1111/rda.12916>
- López-Gatius, F., & Hunter, R. H. (2019a). Pre-ovulatory follicular cooling correlates positively with the potential for pregnancy in dairy cows: Implications for human IVF. *Journal of Gynecology Obstetrics and Human Reproduction*, 48(6), 419-422. <https://doi.org/10.1016/j.jogoh.2019.03.005>
- López-Gatius, F., & Hunter, R. H. (2019b). Pre-ovulatory follicular temperature in Bi-ovular cows. *Journal of Reproduction and Development*, 65(2), 191-194. <https://doi.org/10.1262/jrd.2018-111>
- López-Gatius, F., López-Béjar, M., Fenech, M., & Hunter, R. (2005). Ovulation failure and double ovulation in dairy cattle: Risk factors and effects. *Theriogenology*, 63(5), 1298-1307. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2004.06.010>
- López-Gatius, F., García-Ispuerto, I., & Hunter, R. H. (2021). Cervix-rectum temperature differential at the time of insemination is correlated with the potential for pregnancy in dairy cows. *Journal of Reproduction and Development*, 67(4), 251-255. <https://doi.org/10.1262/jrd.2021-022>
- Lublin, A., & Wolfenson, D. (1996). Lactation and pregnancy effects on blood flow to mammary and reproductive systems in heat-stressed rabbits. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*, 115(4), 277-285. [https://doi.org/10.1016/s0300-9629\(96\)00060-6](https://doi.org/10.1016/s0300-9629(96)00060-6)
- Lucio, A. C., Alves, B. G., Alves, K. A., Martins, M. C., Braga, L. S., Miglio, L., Alves, B. G., et al. (2016). Selected sperm traits are simultaneously altered after scrotal heat stress and play specific roles in in vitro fertilization and embryonic development. *Theriogenology*, 86(4), 924-933. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2016.03.015>
- Lupoli, B., Johansson, B., Uvnäs-Moberg, K., & Svennersten-Sjaunja, K. (2001). Effect of suckling on the release of oxytocin, prolactin, cortisol, gastrin, cholecystokinin, somatostatin and insulin in dairy cows and their calves. *Journal of Dairy Research*, 68(2), 175-187. <https://doi.org/10.1017/s0022029901004721>
- Magdub, A., Johnson, H., & Belyea, R. (1982). Effect of environmental heat and dietary fiber on thyroid physiology of lactating cows. *Journal of Dairy Science*, 65(12), 2323-2331. [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(82\)82504-6](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(82)82504-6)
- Makker, K., Agarwal, A., & Sharma, R. (2009). Oxidative stress and male infertility. *Indian Journal of Medical Research*, 129(4), 357-367
- Malama, E., Zeron, Y., Janett, F., Siuda, M., Roth, Z., & Bollwein, H. (2017). Use of computer-assisted sperm analysis and flow cytometry to detect seasonal variations of bovine semen quality. *Theriogenology*, 87, 79-90. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2016.08.002>

- Mallard, B., Dekkers, J., Ireland, M., Leslie, K., Sharif, S., Lacey Vankampen, C., Wagter, L., et al. (1998). Alteration in immune responsiveness during the Peripartum period and its ramification on dairy cow and calf health. *Journal of Dairy Science*, 81(2), 585-595. [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(98\)75612-7](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(98)75612-7)
- Mann, G., & Lamming, G. (2001). Relationship between maternal endocrine environment, early embryo development and inhibition of the luteolytic mechanism in cows. *Reproduction*, 121(1), 175-180. <https://doi.org/10.1530/rep.0.1210175>
- Mete, F., Kilic, E., Somay, A., & Yilmaz, B. (2012). Effects of heat stress on endocrine functions and behaviour in the pre-pubertal rat. *Indian Journal of Medical Research*, 135, 233-239
- Naranjo-Gómez, J. S., Uribe-García, H. F., Herrera-Sánchez, M. P., Lozano-Villegas, K. J., Rodríguez-Hernández, R., & Rondón-Barragán, I. S. (2021). Heat stress on cattle embryo: Gene regulation and adaptation. *Heliyon*, 7(3), e06570. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06570>
- Mihm, M., Baguisi, A., Boland, M. P., & Roche, J. F. (1994). Association between the duration of dominance of the ovulatory follicle and pregnancy rate in beef heifers. *Reproduction*, 102(1), 123-130. <https://doi.org/10.1530/jrf.0.1020123>
- Mills, M. D., Pollock, A. B., Batey, I. E., O'Neil, M. A., Schrick, F. N., Payton, R. R., Moorey, S. E., et al. (2024). Magnitude and persistence of higher estrus-associated temperatures in beef heifers and suckled cows. *Journal of Animal Science*, 102. <https://doi.org/10.1093/jas/skae079>
- Mishra, S. R., Kundu, A. K., Mahapatra, A. P. K. (2013). Effect of ambient temperature on membrane integrity of spermatozoa in different breeds of bulls. *The Bioscan*, 8, 181-183. <https://thebioscan.com/index.php/pub/article/view/2279>
- Monteiro, A., Guo, J., Weng, X., Ahmed, B., Hayen, M., Dahl, G., Bernard, J., et al. (2016). Effect of maternal heat stress during the dry period on growth and metabolism of calves. *Journal of Dairy Science*, 99(5), 3896-3907. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10699>
- Monteiro, A., Tao, S., Thompson, I., & Dahl, G. (2016). In utero heat stress decreases calf survival and performance through the first lactation. *Journal of Dairy Science*, 99(10), 8443-8450. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11072>
- Morrell, J. M. (2020). Heat stress and bull fertility. *Theriogenology*, 153, 62-67. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2020.05.014>
- Mossa, F., Carter, F., Walsh, S. W., Kenny, D. A., Smith, G. W., Ireland, J. L., Hildebrandt, T. B., et al. (2013). Maternal Undernutrition in cows impairs ovarian and cardiovascular systems in their Offspring1. *Biology of Reproduction*, 88(4). <https://doi.org/10.1095/biolreprod.112.107235>
- Muller, L. D., Beardsley, G. L., Ellis, R. P., Reed, D. E., & Owens, M. J. (1975). Calf response to the initiation of parturition in dairy cows with Dexamethasone or Dexamethasone with Estradiol benzoate. *Journal of Animal Science*, 41(6), 1711-1716. <https://doi.org/10.2527/jas1975.4161711x>
- Nanas, I., Chouzouris, T., Dadouli, K., Dovolou, E., Stamperna, K., Barbagianni, M., Valasi, I., et al. (2020). A study on stress response and fertility parameters in phenotypically thermotolerant and thermosensitive dairy cows during summer heat stress. *Reproduction in Domestic Animals*, 55(12), 1774-1783. <https://doi.org/10.1111/rda.13840>
- Nanas, I., Chouzouris, T., Dovolou, E., Dadouli, K., Stamperna, K., Kateri, I., Barbagianni, M., et al. (2021). Early embryo losses, progesterone and pregnancy associated glycoproteins levels during summer heat stress in dairy cows. *Journal of Thermal Biology*, 98, 102951. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2021.102951>
- Nebel, R. L., Jobst, S. M., Dransfield, M. B. G., Pandolfi, S. M., Bailey, T. L. (1997). Use of radio frequency data communication system, HeatWatch®, to describe behavioral estrus in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 80, 179
- Oakes, G. K., Walker, A. M., Ehrenkranz, R. A., Cefalo, R. C., & Chez, R. A. (1976). Uteroplacental blood flow during hyperthermia with and without respiratory alkalosis. *Journal of Applied Physiology*, 41(2), 197-201. <https://doi.org/10.1152/jappl.1976.41.2.197>
- Orihuela, A. (2000). Some factors affecting the behavioural manifestation of oestrus in cattle: A review. *Applied Animal Behaviour Science*, 70(1), 1-16. [https://doi.org/10.1016/s0168-1591\(00\)00139-8](https://doi.org/10.1016/s0168-1591(00)00139-8)
- Ouellet, V., Laporta, J., & Dahl, G. (2020). Late gestation heat stress in dairy cows: Effects on dam and daughter. *Theriogenology*, 150, 471-479. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2020.03.011>
- Ouellet, V., Negrao, J., Skibieli, A. L., Lantigua, V. A., Fabris, T. F., Marro, M. G., Dado-Senn, B., et al. (2021). Endocrine signals altered by heat stress impact dairy cow mammary cellular processes at different stages of the dry period. *Animals*, 11(2), 563. <https://doi.org/10.3390/ani11020563>
- Paes, V., Vieira, L., Correia, H., Sa, N., Moura, A., Sales, A., Rodrigues, A., et al. (2016). Effect of heat stress on the survival and development of in vitro cultured bovine preantral follicles and on in vitro maturation of cumulus-oocyte complex. *Theriogenology*, 86(4), 994-1003. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2016.03.027>
- Palta, P., Mondal, S., Prakash, B., & Madan, M. (1997). Peripheral inhibin levels in relation to climatic variations and stage of estrous cycle in buffalo. *Theriogenology*, 47(5), 989-995. [https://doi.org/10.1016/s0093-691x\(97\)00055-1](https://doi.org/10.1016/s0093-691x(97)00055-1)
- Paula-Lopes, F. F., Lima, R. S., Satrapa, R. A., & Barros, C. M. (2013). Physiology and endocrinology symposium: Influence of cattle genotype (*BOS indicus* vs. *BOS Taurus*) on oocyte and preimplantation embryo resistance to increased temperature1,2. *Journal of Animal Science*, 91(3), 1143-1153. <https://doi.org/10.2527/jas.2012-5802>
- Pérez-Crespo, M., Pintado, B., & Gutiérrez-Adán, A. (2007). Scrotal heat stress effects on sperm viability, sperm DNA integrity, and the offspring sex ratio in mice. *Molecular Reproduction and Development*, 75(1), 40-47. <https://doi.org/10.1002/mrd.20759>
- Pollock, A. B., Moorey, S. E., Hessock, E. A., Klabnik, J. L., Payton, R. R., Schrick, F. N., Campagna, S. R., et al. (2023). Relationship between higher estrus-associated temperatures and the bovine preovulatory follicular fluid metabolome. *Frontiers in Animal Science*, 4. <https://doi.org/10.3389/fanim.2023.1241033>
- Putney, D., Drost, M., & Thatcher, W. (1988). Embryonic development in superovulated dairy cattle exposed to elevated ambient temperatures between days 1 to 7 post insemination. *Theriogenology*, 30(2), 195-209. [https://doi.org/10.1016/0093-691x\(88\)90169-0](https://doi.org/10.1016/0093-691x(88)90169-0)
- Rahman, M. B., Schellander, K., Luceño, N. L., & Van Soom, A. (2018). Heat stress responses in spermatozoa: Mechanisms and consequences for cattle fertility. *Theriogenology*, 113, 102-112. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2018.02.012>
- Recce, S., Huber, E., Notaro, U. S., Rodríguez, F. M., Ortega, H. H., Rey, F., Signorini, M. L., et al. (2021). Association between heat stress during intra-uterine development and the calving-to-conception and calving-to-first-service intervals in Holstein cows. *Theriogenology*, 162, 95-104. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2021.01.002>
- Reese, S., Franco, G., Poole, R., Hood, R., Fernandez Montero, L., Oliveira Filho, R., Cooke, R., et al. (2020). Pregnancy loss in beef cattle: A meta-analysis. *Animal Reproduction Science*, 212, 106251. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2019.106251>
- Reynolds, L. P., Borowicz, P. P., Caton, J. S., Crouse, M. S., Dahlen, C. R., & Ward, A. K. (2019). Developmental programming of fetal growth and development. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 35(2), 229-247. <https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2019.02.006>
- Rhoads, M. (2020). Effects of periconceptional heat stress on primiparous and multiparous daughters of Holstein dairy cows. *Theriogenology*, 150, 458-463. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2020.03.015>
- Rhoads, R. P., Baumgard, L. H., Suagee, J. K., & Sanders, S. R. (2013). Nutritional interventions to alleviate the negative consequences of heat stress. *Advances in Nutrition*, 4(3), 267-276. <https://doi.org/10.3945/an.112.003376>
- Rhynes, W. E., & Ewing, L. L. (1973). Testicular endocrine function in Hereford bulls exposed to high ambient Temperature1. *Endocrinology*, 92(2), 509-515. <https://doi.org/10.1210/endo-92-2-509>
- Rivera, R. M., Kelley, K. L., Erdos, G. W., & Hansen, P. J. (2003). Alterations in Ultrastructural morphology of two-cell bovine embryos produced in vitro and in vivo following a physiologically relevant heat Shock1. *Biology of Reproduction*, 69(6), 2068-2077. <https://doi.org/10.1095/biolreprod.103.020347>
- Rocha, A., Randel, R., Broussard, J., Lim, J., Blair, R., Roussel, J., Godke, R., et al. (1998). High environmental temperature and humidity decrease oocyte quality in but not in cows. *Theriogenology*, 49(3), 657-665. [https://doi.org/10.1016/s0093-691x\(98\)00016-8](https://doi.org/10.1016/s0093-691x(98)00016-8)
- Ronchi, B., Stradioli, G., Verini Supplizi, A., Bernabucci, U., Lacetera, N., Accorsi, P., Nardone, A., et al. (2001). Influence of heat stress or feed restriction on plasma progesterone, oestradiol-17 β , LH, FSH, prolactin and cortisol in Holstein heifers. *Livestock Production Science*, 68(2-3), 231-241. [https://doi.org/10.1016/s0301-6226\(00\)00232-3](https://doi.org/10.1016/s0301-6226(00)00232-3)
- Roth, Z. (2015). Physiology and endocrinology symposium: Cellular and molecular mechanisms of heat stress related to bovine ovarian function1. *Journal of Animal Science*, 93(5), 2034-2044. <https://doi.org/10.2527/jas.2014-8625>

- Roth, Z. (2017). Effect of heat stress on reproduction in dairy cows: Insights into the cellular and molecular responses of the oocyte. *Annual Review of Animal Biosciences*, 5(1), 151-170. <https://doi.org/10.1146/annurev-animal-022516-022849>
- Roth, Z. (2018). Symposium review: Reduction in oocyte developmental competence by stress is associated with alterations in mitochondrial function. *Journal of Dairy Science*, 101(4), 3642-3654. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13389>
- Roth, Z. (2020). Reproductive physiology and endocrinology responses of cows exposed to environmental heat stress - Experiences from the past and lessons for the present. *Theriogenology*, 155, 150-156. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2020.05.040>
- Roth, Z., & Hansen, P. (2004). Involvement of Apoptosis in disruption of developmental competence of bovine oocytes by heat shock during Maturation1. *Biology of Reproduction*, 71(6), 1898-1906. <https://doi.org/10.1095/biolreprod.104.031690>
- Roth, Z., Meidan, R., Braw-Tal, R., & Wolfenson, D. (2000). Immediate and delayed effects of heat stress on follicular development and its association with plasma FSH and inhibin concentration in cows. *Reproduction*, 120(1), 83-90. <https://doi.org/10.1530/reprod.120.1.83>
- Roth, Z., Arav, A., Bor, A., Zeron, Y., Braw-Tal, R., & Wolfenson, D. (2001a). 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., Meidan, R., Shaham-Albalancy, A., Braw-Tal, R., Wolfenson, D., (2001b). Delayed effect of heat stress on steroid production in medium-sized and preovulatory bovine follicles. *Reproduction*, 121: 745-751.
- Sa, S. J., Jeong, J., Cho, J., Lee, S.-H., Choi, I. (2018). Heat waves impair cytoplasmic maturation of oocytes and preimplantation development in Korean native cattle (Hanwoo). *Korean Journal of Agricultural Science*, 45, 493-498. <https://doi.org/10.7744/kjoas.20180072>
- Sabés-Alsina, M., Lundeheim, N., Johannisson, A., López-Béjar, M., & Morrell, J. (2019). Relationships between climate and sperm quality in dairy bull semen: A retrospective analysis. *Journal of Dairy Science*, 102(6), 5623-5633. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15837>
- Sakai, S., Yagi, M., Fujime, N., Kuse, M., Sakumoto, R., Yamamoto, Y., Okuda, K., et al. (2021). Heat stress influences the attenuation of prostaglandin synthesis by interferon tau in bovine endometrial cells. *Theriogenology*, 165, 52-58. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2021.02.005>
- 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>
- 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., Bonilla, L., Dobbs, K. B., Block, J., Ozawa, M., Shanker, S., Yao, J., & Hansen, P. J. (2013). Changes in the transcriptome of morula-stage bovine embryos caused by heat shock: Relationship to developmental acquisition of thermotolerance. *Reproductive Biology and Endocrinology*, 11(1). <https://doi.org/10.1186/1477-7827-11-3>
- Sakatani, M., Yamanaka, K., Balboul, A. Z., Takenouchi, N., & Takahashi, M. (2014). Heat stress during *in vitro* fertilization decreases fertilization success by disrupting anti-polyspermy systems of the oocytes. *Molecular Reproduction and Development*, 82(1), 36-47. <https://doi.org/10.1002/mrd.22441>
- Santolaria, P., López-Gatius, F., García-Ispuerto, I., Bech-Sabat, G., Angulo, E., Carretero, T., Sánchez-Nadal, J. A., et al. (2009). Effects of cumulative stressful and acute variation episodes of farm climate conditions on late embryo/early fetal loss in high producing dairy cows. *International Journal of Biometeorology*, 54(1), 93-98. <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0258-8>
- 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.0022-0302\(02\)74367-1](https://doi.org/10.3168/jds.0022-0302(02)74367-1)
- Scharf, B., Leonard, M. J., Weaver, R. L., Mader, T. L., Hahn, G. L., & Spillers, D. E. (2010). Determinants of bovine thermal response to heat and solar radiation exposures in a field environment. *International Journal of Biometeorology*, 55(4), 469-480. <https://doi.org/10.1007/s00484-010-0360-y>
- Schreiber, J. R., Nakamura, K., & Erickson, G. F. (1982). Rat ovary glucocorticoid receptor: Identification and characterization. *Steroids*, 39(5), 569-584. [https://doi.org/10.1016/0039-128x\(82\)90057-5](https://doi.org/10.1016/0039-128x(82)90057-5)
- Schüller, L., Burfeind, O., & Heuwieser, W. (2014). Impact of heat stress on conception rate of dairy cows in the moderate climate considering different temperature-humidity index thresholds, periods relative to breeding, and heat load indices. *Theriogenology*, 81(8), 1050-1057. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2014.01.029>
- Schüller, L., Michaelis, I., & Heuwieser, W. (2017). Impact of heat stress on estrus expression and follicle size in estrus under field conditions in dairy cows. *Theriogenology*, 102, 48-53. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2017.07.004>
- Seifi-Jamadi, A., Zhandi, M., Kohram, H., Luceño, N. L., Leemans, B., Henrotte, E., Latour, C., et al. (2020). Influence of seasonal differences on semen quality and subsequent embryo development of Belgian blue bulls. *Theriogenology*, 158, 8-17. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2020.08.037>
- Skibieli, A. L., Dado-Senn, B., Fabris, T. F., Dahl, G. E., & Laporta, J. (2018). In utero exposure to thermal stress has long-term effects on mammary gland microstructure and function in dairy cattle. *PLOS ONE*, 13(10), e0206046. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0206046>
- Skibieli, A. L., Peñagaricano, F., Amorin, R., Ahmed, B. M., Dahl, G. E., & Laporta, J. (2018). In utero heat stress alters the offspring Epigenome. *Scientific Reports*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32975-1>
- Skinner, J. D., & Louw, G. N. (1966). Heat stress and spermatogenesis in *BOS indicus* and *BOS Taurus* cattle. *Journal of Applied Physiology*, 21(6), 1784-1790. <https://doi.org/10.1152/jappl.1966.21.6.1784>
- Stamperna, K., Dovolou, E., Giannoulis, T., Kalemkeridou, M., Nanas, I., Dadouli, K., Moutou, K., et al. (2021). Developmental competence of heat stressed oocytes from Holstein and Limousine cows matured *in vitro*. *Reproduction in Domestic Animals*, 56(10), 1302-1314. <https://doi.org/10.1111/rda.13993>
- 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>
- Stott, G., & Williams, R. (1962). Causes of low breeding efficiency in dairy cattle associated with seasonal high temperatures. *Journal of Dairy Science*, 45(11), 1369-1375. [https://doi.org/10.3168/jds.0022-0302\(62\)89628-3](https://doi.org/10.3168/jds.0022-0302(62)89628-3)
- Suthar, V., Burfeind, O., Patel, J., Dhami, A., & Heuwieser, W. (2011). Body temperature around induced estrus in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 94(5), 2368-2373. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-3858>
- Tao, S., Bubolz, J., Do Amaral, B., Thompson, I., Hayen, M., Johnson, S., & Dahl, G. (2011). Effect of heat stress during the dry period on mammary gland development. *Journal of Dairy Science*, 94(12), 5976-5986. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4329>
- Tao, S., & Dahl, G. (2013). Invited review: Heat stress effects during late gestation on dry cows and their calves. *Journal of Dairy Science*, 96(7), 4079-4093. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-6278>
- Tao, S., Monteiro, A., Thompson, I., Hayen, M., & Dahl, G. (2012). Effect of late-gestation maternal heat stress on growth and immune function of dairy calves. *Journal of Dairy Science*, 95(12), 7128-7136. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5697>
- Tao, S., Monteiro, A., Hayen, M., & Dahl, G. (2014). Short communication: Maternal heat stress during the dry period alters postnatal whole-body insulin response of calves. *Journal of Dairy Science*, 97(2), 897-901. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7323>
- Tao, S., Dahl, G. E., Laporta, J., Bernard, J. K., Orellana Rivas, R. M., & Marins, T. N. (2019). Physiology symposium: Effects of heat stress during late gestation on the dam and its calf. *Journal of Animal Science*, 97(5), 2245-2257. <https://doi.org/10.1093/jas/skz061>
- Thompson, I. M., Tao, S., Branen, J., Ealy, A. D., & Dahl, G. E. (2013). Environmental regulation of pregnancy-specific protein B concentrations during late pregnancy in dairy cattle1. *Journal of Animal Science*, 91(1), 168-173. <https://doi.org/10.2527/jas.2012-5730>
- Toledo, I., Fabris, T., Tao, S., & Dahl, G. (2020). When do dry cows get heat stressed? Correlations of rectal temperature, respiration rate, and performance. *JDS Communications*, 1(1), 21-24. <https://doi.org/10.3168/jdsc.2019-18019>
- Van Eetvelde, M., Kamal, M., Hostens, M., Vandaele, L., Fiems, L., & Opsomer, G. (2016). Evidence for placental compensation in cattle. *Animal*, 10(8), 1342-1350. <https://doi.org/10.1017/s1751731116000318>

- Van Eetvelde, M., Kamal, M., Vandaele, L., & Opsomer, G. (2017). Season of birth is associated with first-lactation milk yield in Holstein Friesian cattle. *Animal*, 11(12), 2252-2259. <https://doi.org/10.1017/s1751731117001021>
- van Niekerk, J., Fischer-Tlustos, A., Wilms, J., Hare, K., Welboren, A., Lopez, A., Yohe, T., et al. (2021). ADSA Foundation scholar award: New frontiers in calf and heifer nutrition—From conception to puberty. *Journal of Dairy Science*, 104(8), 8341-8362. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-20004>
- Vanselow, J., Vernunft, A., Koczan, D., Spitschak, M., & Kuhla, B. (2016). Exposure of lactating dairy cows to acute pre-ovulatory heat stress affects Granulosa cell-specific gene expression profiles in dominant follicles. *PLOS ONE*, 11(8), e0160600. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160600>
- 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>
- Vickers, L., Burfeind, O., Von Keyserlingk, M., Veira, D., Weary, D., & Heuwieser, W. (2010). Technical note: Comparison of rectal and vaginal temperatures in lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 93(11), 5246-5251. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-3388>
- 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>
- Wallace, J. M., Bourke, D. A., Aitken, R. P., Leitch, N., & Hay, W. W. (2002). Blood flows and nutrient uptakes in growth-restricted pregnancies induced by overnourishing adolescent sheep. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 282(4), R1027-R1036. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00465.2001>
- Weller, M., Fortes, M., Marcondes, M., Rotta, P., Gionbeli, T., Valadares Filho, S., Campos, M., et al. (2016). Effect of maternal nutrition and days of gestation on pituitary gland and gonadal gene expression in cattle. *Journal of Dairy Science*, 99(4), 3056-3071. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-9673>
- Wheelock, J., Rhoads, R., VanBaale, M., Sanders, S., & Baumgard, L. (2010). Effects of heat stress on energetic metabolism in lactating Holstein cows. *Journal of Dairy Science*, 93(2), 644-655. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2295>
- White, F. J., Wettemann, R. P., Looper, M. L., Prado, T. M., & Morgan, G. L. (2002). Seasonal effects on estrous behavior and time of ovulation in non-lactating beef cows. *Journal of Animal Science*, 80(12), 3053-3059. <https://doi.org/10.2527/2002.80123053x>
- Wilson, S., Kirby, C., Koenigsfeld, A., Keisler, D., & Lucy, M. (1998). Effects of controlled heat stress on ovarian function of dairy cattle. 2. Heifers. *Journal of Dairy Science*, 81(8), 2132-2138. [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(98\)75789-3](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(98)75789-3)
- Wiltbank, M. C., Baez, G. M., Garcia-Guerra, A., Toledo, M. Z., Monteiro, P. L., Melo, L. F., Ochoa, J. C., et al. (2016). Pivotal periods for pregnancy loss during the first trimester of gestation in lactating dairy cows. *Theriogenology*, 86(1), 239-253. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2016.04.037>
- Wise, M., Armstrong, D., Huber, J., Hunter, R., & Wiersma, F. (1988). Hormonal alterations in the lactating dairy cow in response to thermal stress. *Journal of Dairy Science*, 71(9), 2480-2485. [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(88\)79834-3](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(88)79834-3)
- 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>
- Wolfenson, D., Flamenbaum, I., & Berman, A. (1988). Dry period heat stress relief effects on Prepartum progesterone, calf birth weight, and milk production. *Journal of Dairy Science*, 71(3), 809-818. [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(88\)79621-6](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(88)79621-6)
- Wolfenson, D., Bartol, F., Badinga, L., Barros, C., Marple, D., Cummins, K., Wolfe, D., et al. (1993). Secretion of PGF₂ and oxytocin during hyperthermia in cyclic and pregnant heifers. *Theriogenology*, 39(5), 1129-1141. [https://doi.org/10.1016/0093-691x\(93\)90012-t](https://doi.org/10.1016/0093-691x(93)90012-t)
- Wolfenson, D., Thatcher, W. W., Badinga, L., Savió, J. D., Meidan, R., Lew, B. J., Braw-tal, R., & Berman, A. (1995). Effect of heat stress on follicular development during the Estrous cycle in lactating dairy Cattle. *Biology of Reproduction*, 52(5), 1106-1113. <https://doi.org/10.1095/biolreprod52.5.1106>
- Wolfenson, D., Lew, B., Thatcher, W., Graber, Y., & Meidan, R. (1997). Seasonal and acute heat stress effects on steroid production by dominant follicles in cows. *Animal Reproduction Science*, 47(1-2), 9-19. [https://doi.org/10.1016/s0378-4320\(96\)01638-7](https://doi.org/10.1016/s0378-4320(96)01638-7)
- Wolfenson, D., Roth, Z., & Meidan, R. (2000). Impaired reproduction in heat-stressed cattle: Basic and applied aspects. *Animal Reproduction Science*, 60-61, 535-547. [https://doi.org/10.1016/s0378-4320\(00\)00102-0](https://doi.org/10.1016/s0378-4320(00)00102-0)
- Wolfenson, D., Sonego, H., Bloch, A., Shaham-Albalancy, A., Kaim, M., Folman, Y., & Meidan, R. (2002). Seasonal differences in progesterone production by luteinized bovine thecal and granulosa cells. *Domestic Animal Endocrinology*, 22(2), 81-90. [https://doi.org/10.1016/s0739-7240\(01\)00127-8](https://doi.org/10.1016/s0739-7240(01)00127-8)
- Wrenn, T., Bitman, J., & Sykes, J. (1958). Body temperature variations in dairy cattle during the Estrous cycle and pregnancy. *Journal of Dairy Science*, 41(8), 1071-1076. [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(58\)91053-1](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(58)91053-1)
- Wu, C., & Sirard, M. (2020). Parental effects on epigenetic programming in gametes and embryos of dairy cows. *Frontiers in Genetics*, 11. <https://doi.org/10.3389/fgene.2020.557846>
- Wu, G., Bazer, F. W., Wallace, J. M., & Spencer, T. E. (2006). Board-invited review: Intrauterine growth retardation: Implications for the animal sciences. *Journal of Animal Science*, 84(9), 2316-2337. <https://doi.org/10.2527/jas.2006-156>
- Yadav, B., Singh, G., & Wankar, A. (2015). Adaptive capability as indicated by redox status and endocrine responses in crossbred cattle exposed to thermal stress. *Journal of Animal Research*, 5(1), 67. <https://doi.org/10.5958/2277-940x.2015.00011.x>
- Yamanaka, K., Khatun, H., Egashira, J., Balboula, A. Z., Tatemoto, H., Sakatani, M., Takenouchi, N., et al. (2018). Heat-shock-induced cathepsin B activity during IVF and culture compromises the developmental competence of bovine embryos. *Theriogenology*, 114, 293-300. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2018.04.005>
- Yániz, J., López-Gatius, F., Almería, S., Carretero, T., García-Ispuerto, I., Serano, B., Smith, R., et al. (2009). Dynamics of heat shock protein 70 concentrations in peripheral blood lymphocyte lysates during pregnancy in lactating Holstein-Friesian cows. *Theriogenology*, 72(8), 1041-1046. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2009.06.019>
- Zarzynska, J., Gajkowska, B., Wojewodzka, U., Dymnicki, E., & Motyl, T. (2007). Apoptosis and autophagy in involuting bovine mammary gland is accompanied by upregulation of TGF-beta1 and suppression of somatotrophic pathway. *Polish Journal of Veterinary Sciences*, 10(1), 1-9
- Zhang, B., Peñagaricano, F., Driver, A., Chen, H., & Khatib, H. (2011). Differential expression of heat shock protein genes and their splice variants in bovine preimplantation embryos. *Journal of Dairy Science*, 94(8), 4174-4182. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-4137>

Summary

Hanzen, C., Delhez, P., Lessire, F., Hornick, J.-L., & Gherissi, D.E. Environmental heat stress in cattle: 3. Effects on reproduction

Background: The decline in cattle fertility observed in various parts of the world is partly related to the steady rise in environmental temperature over the past few decades. **Aim:** This literature review examines the various effects and their mechanisms on the various aspects of male and female bovine reproduction. **Methods:** Using the PubMed database, this literature review initially focused on review articles, and was then supplemented by references to identified articles. **Results:** The observed infertility is a consequence of the effects of heat stress on ovarian follicular growth, with pre-antral follicles being more affected than antral follicles, oocyte and corpus luteum. These effects result from a reduction in the synthesis of oestradiol, progesterone, inhibin and luteinizing hormone (LH), along with an increase in follicle stimulating hormone (FSH). Changes in temperature gradients within the genital system should not be discounted. Heat stress is responsible for an increased frequency of embryonic mortality, particularly during the 1st week of pregnancy. Exposure of cows to heat stress during gestation and drying off shortens the duration of gestation, affects the placenta, modifies the cow's metabolism during lactation, alters her immunity and has negative effects on the calf's weight growth, mammary and follicular development, longevity, and reproductive performance. In males, heat stress results in reduced sperm motility and an increase in abnormal forms. **Conclusions:** Growing recognition of the effects of heat stress on the reproductive performance of cattle underscores the need for animal health managers to integrate it into their approaches. It is essential to implement strategies to mitigate the impact of heat stress on farm profitability, especially as its epigenetic influence on offspring performance is increasingly well documented.

Keywords: cattle, heat stress, oestrous cycle, fertility, pregnancy, spermatogenesis

Resumen

Hanzen, C., Delhez, P., Lessire, F., Hornick, J.-L., & Gherissi, D.E. Estrés térmico ambiental en el ganado bovino: 3. Efectos sobre la reproducción

Contexto: El aumento regular desde hace varios decenios de la temperatura ambiental viene acompañado, en la especie bovina especialmente, por una disminución de la fertilidad en diferentes regiones del mundo. **Objetivo:** Esta revisión de la literatura examina los distintos efectos y sus mecanismos en los diversos aspectos de la reproducción del macho y de la hembra bovinos. **Método:** A partir de la base PubMed, esta revisión bibliográfica se concentró primeramente en los artículos de síntesis y posteriormente se completó con las referencias de los artículos identificados. **Resultados:** La disminución de la fertilidad es el resultado de los efectos del estrés térmico en el crecimiento folicular ovárico, con una incidencia más marcada en los folículos preantrales que en los folículos antrales, el ovocito y el cuerpo amarillo. Estos efectos son la consecuencia de una reducción de la síntesis de estradiol, de progesterona, de inhibina y de la hormona luteotrópica (LH), así como del aumento de la hormona foliculoestimulante (FSH), aunque tampoco se excluye una modificación de los gradientes de temperatura a nivel del sistema genital. El estrés térmico también es responsable de un aumento de la frecuencia de la mortalidad embrionaria, especialmente durante la primera semana de gestación. La exposición de las vacas al estrés térmico durante la gestación acorta su duración, afecta a la placenta, modifica el metabolismo de la vaca durante la lactación, altera su inmunidad y ejerce efectos negativos en el crecimiento ponderal, el desarrollo mamario y folicular, la longevidad y el rendimiento reproductivo del ternero. En el macho, el estrés térmico se traduce en una reducción de la motilidad y un aumento de anomalías morfológicas de los espermatozoides. **Conclusiones:** El reconocimiento creciente de los efectos del estrés térmico en el rendimiento reproductivo de los bovinos subraya la necesidad para los responsables de la salud animal de integrarlos en sus planteamientos. Es esencial aplicar estrategias que tengan el objetivo de atenuar el impacto en la rentabilidad de la ganadería, especialmente porque su influencia epigenética en el rendimiento de la descendencia cada vez está mejor documentada.

Palabras clave: ganado bovino, estrés térmico, ciclo estral, fertilidad, gestación, espermatogénesis

