



HAL
open science

Relation entre stress thermique et production laitière : étude préliminaire à partir de l'exemple d'un élevage laitier d'Ile-de-France

Juliette Waubant

► **To cite this version:**

Juliette Waubant. Relation entre stress thermique et production laitière : étude préliminaire à partir de l'exemple d'un élevage laitier d'Ile-de-France. Médecine vétérinaire et santé animale. 2022. dumas-04075348

HAL Id: dumas-04075348

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04075348v1>

Submitted on 20 Apr 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0
International License

Année 2022

**RELATION ENTRE STRESS THERMIQUE ET PRODUCTION
LAITIÈRE : ÉTUDE PRÉLIMINAIRE À PARTIR DE
L'EXEMPLE D'UN ÉLEVAGE LAITIER D'ÎLE-DE-FRANCE**

THÈSE

pour obtenir le diplôme d'État de

DOCTEUR VÉTÉRINAIRE

présentée et soutenue publiquement devant

la Faculté de Médecine de Créteil (UPEC)

le 17 novembre 2022

par

Juliette, Alice WAUBANT

sous la direction de

Vincent MAUFFRÉ

JURY

Présidente du jury :	Mme Julie RIVIÈRE	Maître de Conférences à l'EnvA, HDR
Directeur de thèse :	M. Vincent MAUFFRÉ	Maître de Conférences à l'EnvA
Examineur :	M. Yves MILLEMANN	Professeur à l'EnvA

Liste des enseignants intervenant dans l'encadrement des thèses de Doctorat vétérinaire



Version du 8 février 2022

Liste des Professeurs et Maîtres de conférences titulaires de l'HDR

M	Adjou	Karim	Professeur	DPASP
M	Audigié	Fabrice	Professeur	DEPEC
M	Bellier	Sylvain	Professeur	DSBP
M	Blaga	Radu	Maître de conférences HDR	DPASP
M	Blot	Stephane	Professeur	DEPEC
M	Boulouis	Henri-Jean	Professeur émérite	DSBP
Mme	Chahory	Sabine	Professeur	DEPEC
M	Chateau	Henry	Professeur	DSBP
Mme	Chetboul	Valerie	Professeur	DEPEC
Mme	Crevier-Denoix	Nathalie	Professeur	DSBP
M	Degueurce	Christophe	Professeur	DSBP
M	Denoix	Jean-Marie	Professeur	DEPEC
M	Desquilbet	Loïc	Professeur	DSBP
Mme	Dufour	Barbara	Professeur émérite	DPASP
M	Eloit	Marc	Professeur	DSBP
M	Fayolle	Pascal	Professeur émérite	DEPEC
M	Fédérighi	Michel	Professeur	DPASP
M	Fontbonne	Alain	Professeur	DEPEC
Mme	Gilbert	Caroline	Professeur	DSBP
M	Grandjean	Dominique	Professeur	DEPEC
Mme	Grimard-Ballif	Bénédicte	Professeur	DPASP
Mme	Haddad-Hoang Xuan	Nadia	Professeur	DPASP
M	Jouvion	Gregory	Professeur	DSBP
M	Kohlhauer	Matthias	Maître de conférences HDR	DSBP
Mme	Le Poder	Sophie	Professeur	DSBP
M	Manassero	Mathieu	Professeur	DEPEC
Mme	Maurey-Guénec	Christelle	Maître de conférences HDR	DEPEC
M	Millemann	Yves	Professeur	DPASP
M	Perrot	Sébastien	Maître de conférences HDR	DSBP
Mme	Pilot-Storck	Fanny	Professeur	DSBP
M	Ponter	Andrew	Professeur	DPASP
Mme	Rivière	Julie	Maître de conférences HDR	DPASP
Mme	Robert	Céline	Professeur	DSBP
M	Tiret	Laurent	Professeur	DSBP
M	Tissier	Renaud	Professeur	DSBP
M	Verwaerde	Patrick	Professeur	DEPEC
Mme	Viateau	Véronique	Professeur	DEPEC

Liste des Maîtres de conférences et Ingénieurs de recherche DMV

M	Arné	Pascal	Maître de conférences	DPASP
Mme	Barassin	Isabelle	Maître de conférences	DPASP
Mme	Bencheikroun	Ghita	Maître de conférences	DEPEC
Mme	Bertoni	Lelia	Maître de conférences	DEPEC
M	Bolnot	Francois	Maître de conférences	DPASP
Mme	Canonne-Guibert	Morgane	Maître de conférences	DEPEC
Mme	Chevallier	Lucie	Maître de conférences	DSBP
Mme	Cochet-Faivre	Noëlle	Maître de conférences	DEPEC
Mme	Constant	Fabienne	Maître de conférences	DPASP
Mme	Cordonnier-Lefort	Nathalie	Maître de conférences	DSBP
Mme	Crepeaux	Guillemette	Maître de conférences	DSBP
Mme	De Paula Reis	Aline	Maître de conférences	DPASP
Mme	Decambon	Adeline	Maître de conférences	DEPEC
M	Delsart	Maxime	Maître de conférences associé	DPASP
M	Desbois	Christophe	Maître de conférences	DEPEC
M	Deshuillers	Pierre	Maître de conférences	DSBP
M	Gauthier	Michel	Maître de conférences associé	DPASP
Mme	Guétin-Poirier	Valentine	Maître de conférences	DPASP
Mme	Jacquet	Sandrine	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
Mme	Lagrée	Anne-Claire	Maître de conférences	DSBP
Mme	Le Roux	Delphine	Maître de conférences	DSBP
Mme	Legrand	Chantal	Maître de conférences associé	DSBP
Mme	Marignac	Genevieve	Maître de conférences	DSBP
M	Maufré	Vincent	Maître de conférences	DPASP
Mme	Mtimet	Narjès	Maître de conférences	DPASP
Mme	Mespoulhès-Rivière	Céline	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
M	Mortier	Jérémy	Maître de conférences associé	DEPEC
M	Nudelmann	Nicolas	Maître de conférences	DEPEC
M	Pignon	Charly	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
M	Polack	Bruno	Maître de conférences	DSBP
Mme	Ravary-Plumioën	Bérangère	Maître de conférences	DPASP
M	Reyes-Gomez	Edouard	Maître de conférences	DSBP
Mme	Risco-Castillo	Véronica	Maître de conférences	DSBP
Mme	Rose	Hélène	Maître de conférences associé	DSBP

Remerciements

A Mme Julie RIVIÈRE, Présidente du Jury de cette thèse, Maitre de conférences à l'ENVA ,

A M. Vincent MAUFFRÉ, Maitre de conférences à l'EnvA,

A M Yves MILLEMANN, Professeur à l'EnvA,

A M. Guillaume BELBIS, ancien Maitre de conférences à l'EnvA,

A l'équipe de la Ferme de Grignon, et tout particulièrement à Quentin BULCKE

Table des matières

Liste des figures	3
Liste des tableaux.....	5
Liste des abréviations	6
Introduction	7
Première partie : Bibliographie.....	9
I. Physiologie de la thermorégulation chez le bovin	9
A. Zones de thermoneutralité.....	9
1. Définitions de l'Indice Température-Humidité (ITH).....	9
2. Zones d'ITH optimales	10
B. Mécanismes de thermolyse	12
1. Pertes de chaleur sensibles.....	12
a) La radiation.....	12
b) La conduction	12
c) La convection	12
2. Pertes de chaleur insensibles.....	12
3. Limiter la thermogenèse	13
C. Conséquences des mécanismes de thermorégulation sur le métabolisme	13
II. Conséquences du stress thermique	15
A. Sur la santé	15
B. Sur le volume de la production laitière	17
C. Sur la qualité de la production laitière	17
D. Sur la reproduction	18
E. Sur le comportement des vaches.....	18
F. Sur l'économie.....	19
III. Stratégies permettant de limiter le stress thermique	19
A. Aménagement des logements.....	19
1. Augmentation des zones d'ombre	19
2. Points d'abreuvements suffisants	20
3. Amélioration de la ventilation	20
a) Par des ventilateurs.....	20
b) Par des brumisateurs	20
B. Adaptation de la ration.....	21
1. Par un rééquilibrage de la ration.....	21
2. Par des compléments alimentaires.....	21
C. Adaptations génétiques.....	22
1. Par la race.....	22
2. Par des mutations génétiques	22
Deuxième partie : étude expérimentale	25
I. Introduction.....	25
II. Matériels et méthodes	25
A. Présentation de l'élevage	25
B. Données nécessaires pour l'étude	25
1. Contrôle laitier.....	25
2. Données météorologiques.....	27
3. Exploitation des données.....	27
a) Étude de l'impact du stress thermique sur la production laitière	27
(1) En quantité.....	28
(2) En qualité.....	28
b) Étude de l'impact d'un épisode de stress thermique de forte intensité comparé aux mois similaires	28
c) Étude à l'échelle individuelle d'un épisode de stress thermique	28
d) Étude de la comparabilité des données du contrôle laitier.....	29

(1) Mois et jour moyen de lactation	29
III. Résultats.....	29
A. <i>Présentation de l'échantillon</i>	29
B. <i>Étude de l'impact du stress thermique sur la production laitière</i>	31
1. Sur la quantité de lait produite	31
2. Sur la qualité du lait produit	33
a) Sur le TB.....	33
b) Sur le TP.....	34
c) Sur le taux cellulaire	35
3. Étude de l'impact d'un épisode de stress thermique de forte intensité comparé aux valeurs des mois similaires.....	36
a) Épisode du 23 août 2016.....	36
b) Épisode du 19 juin 2017	37
c) Épisode du 27 juillet 2020	37
4. Étude d'un épisode de stress thermique par classes de production laitière	38
IV. Discussion	39
A. <i>Biais rencontrés lors de l'étude</i>	39
1. Les animaux.....	39
2. Le bâtiment	40
3. Les données météorologiques.....	40
4. Les données du contrôle laitier	41
B. <i>Résultats</i>	41
1. Mois moyen et jour moyen de lactation	41
2. La production laitière.....	41
3. La qualité du lait.....	41
a) Le TB	41
b) Le TP	42
c) Le taux cellulaire.....	42
4. Comparaison d'un épisode de stress thermique avec les moyennes des mois comparables.....	42
5. Étude d'un épisode de stress thermique par classes de production laitière	42
6. Conséquences économiques.....	43
C. <i>Pistes d'amélioration en élevage</i>	43
Conclusion	45
Liste des références bibliographiques	47

Liste des figures

Figure 1 : Index de graduation du stress thermique (selon Mader <i>et al.</i> , 2006).....	10
Figure 2 : Valeurs d'Indice de Température et d'Humidité selon l'humidité et la température (selon (Collier et Collier, 2012)	11
Figure 3 : Temps de rumination en fonction du degré de stress thermique (d'après Moretti <i>et al.</i> , 2017).....	16
Figure 4 : Présentation des données du contrôle laitier collectif <i>via</i> le site internet ICownect.....	26
Figure 5 : Présentation des données du contrôle laitier individuel <i>via</i> le site internet ICownect.....	27
Figure 6 : Présentation des données brutes météorologiques	27
Figure 7 : Valeurs d'Indice de Température et d'Humidité (ITH) tout au long de la durée de l'étude, du 1 ^{er} janvier 2015 au 20 octobre 2021	30
Figure 8 : Mois et jour moyen de lactation au cours de l'étude.....	30
Figure 9 : Mois et jour moyen de lactation en fonction des mois de l'année.....	31
Figure 10 : Comparaison de la production laitière en kg par jour en fonction de l'exposition à un stress thermique et de la catégorie d'animaux	32
Figure 11 : Production laitière en kg en fonction de l'Indice de Température et d'Humidité (ITH) maximal mensuel.....	32
Figure 12 : Comparaison du taux butyreux en g/kg par jour en fonction de l'exposition à un stress thermique et de la catégorie d'animaux.....	33
Figure 13 : Taux Butyreux (TB) en g/kg en fonction de l'Indice de Température et d'Humidité (ITH) mensuel	33
Figure 14 : Comparaison du taux protéique en g/kg par jour en fonction de l'exposition à un stress thermique et de la catégorie d'animaux.....	34
Figure 15 : Taux Protéique (TP) en g/kg en fonction de l'Indice de Température et d'Humidité (ITH) mensuel	34
Figure 16 : Comparaison du taux cellulaire en 10 ³ /kg journalier en fonction de l'exposition à un stress thermique et de la catégorie d'animaux	35
Figure 17 : Taux cellulaire du lait (en x10 ⁴ /ml) en fonction de l'Indice de Température et d'Humidité (ITH) mensuel	35
Figure 18 : Comparaison de l'épisode de stress thermique du 23 août 2016 avec les contrôles laitiers des mois d'août de l'étude.....	36

Figure 19 : Comparaison de l'épisode de stress thermique du 19 juin 2017 avec les contrôles laitiers des mois de juin de l'étude.37

Figure 20 : Comparaison de l'épisode de stress thermique du 27 juillet 2020 avec les contrôles laitiers des mois de juillet de l'étude.38

Figure 21 : Comparaison par niveau de production de la production laitière lors d'un épisode de stress thermique sévère comparé aux autres contrôles laitiers des mois de juin.....39

Liste des tableaux

Tableau 1 : Formules et origines des différentes équations permettant de calculer l'indice de température et d'humidité (ITH) chez la vache laitière. (Thom, 1959 ; Bianca, 1962 ; Rowsell, 1972 ; Yousef, 1985 ; Mader *et al.*, 2006 ; Ouellet, 2019)9

Tableau 2 : Données expérimentales issues des contrôles laitier à l'échelle du troupeau29

Liste des abréviations

AGNE	Acides Gras Non Estérifiés
AGV	Acides Gras Volatils
CNIEL	Centre National Interprofessionnel de l'Économie Laitière
GMQ	Gain Moyen Quotidien
HR	Humidité Relative
HSP	Heat Shock Protein
IGNH	Indice de Globe Noir Humide
ITH	Indice de Température et d'Humidité
MU	Matière Utile
MSI	Matière Sèche Ingérée
TB	Taux Butyreux
TP	Taux Protéique

Introduction

Depuis la révolution industrielle, nous constatons une hausse des températures avec une augmentation de la température moyenne mondiale de 1°C depuis la fin du XIX^e siècle. Cette évolution est d'autant plus marquée ces dernières années, comme le montre les différents rapports du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), avec en France une année 2020 plus chaude de 2,3°C que la moyenne des années 1961-1990 (Ministères Écologie Énergie Territoires, 2022)

Ce réchauffement climatique impacte la faune et la flore et par conséquent l'agriculture moderne. En plus d'épisodes de sécheresse répétés et de plus en plus longs, qui affectent les cultures et appauvrissent les sols, cette hausse des températures n'est pas sans impact sur la santé de nos animaux d'élevage.

Ce travail a pour but d'étudier les effets de périodes de stress thermique positif, c'est à dire les effets de périodes anormalement chaudes et/ou humides sur la production laitière d'un élevage de bovins laitiers, en prenant l'exemple d'un élevage situé en Île-de-France. En effet, ce travail pourra ainsi évaluer indirectement les pertes économiques que peuvent engendrer de tels épisodes de stress thermique, notamment d'un point de vue production laitière. Malheureusement, d'autres facteurs de production n'ont pas pu être étudiés ici, comme par exemple la reproduction ou la baisse de GMQ, mais que d'autres auteurs ont décrit dans d'autres études.

Afin de mieux comprendre les effets d'une hausse des températures sur la production laitière, un rappel sur la physiologie du bovin et notamment sa thermorégulation sera réalisée en première partie de cette étude. Nous verrons ensuite les différents impacts décrits dans la littérature ainsi que les solutions qui peuvent être mises en place pour tenter d'y remédier.

Dans un second temps, nous prendrons l'exemple d'un élevage laitier d'île-de-France pour analyser les données de production en fonction des températures extérieures pour ensuite discuter des résultats obtenus.

Première partie : Bibliographie

I. Physiologie de la thermorégulation chez le bovin

L'espèce bovine est considérée comme étant homéotherme, c'est-à-dire que sa zone de thermoneutralité est indépendante des conditions environnementales (Johnson, 1987). Ainsi, une vache doit garder sa température corporelle au-dessus de la température ambiante pour pouvoir céder de la chaleur au milieu extérieur. Or, lors de températures supérieures à 39°C, la vache doit mettre en place des mécanismes de thermorégulation afin de continuer à céder de la chaleur au milieu extérieur.

A. Zones de thermoneutralité

1. Définitions de l'Indice Température-Humidité (ITH)

L'indice de température et d'humidité est un outil d'abord décrit par Thom en 1958 puis adapté aux troupeaux de vaches en 1964 par Berry. Différentes équations, reprises dans le **Tableau 1**, ont ensuite été déclinées et prennent en compte de multiples paramètres de température et d'humidité afin de refléter au mieux le ressenti thermique des vaches. La plupart des auteurs européens ayant travaillé sur le stress thermique des vaches laitières utilisent l'équation ITH5 du **Tableau 1** (Hammami *et al.*, 2013 ; Bernabucci *et al.*, 2014).

Tableau 1 : Formules et origines des différentes équations permettant de calculer l'indice de température et d'humidité (ITH) chez la vache laitière. (Thom, 1959 ; Bianca, 1962 ; Rowsell, 1972 ; Yousef, 1985 ; Mader *et al.*, 2006 ; Ouellet, 2019)

	Équation	Source
ITH1	$(0,4 \times (T_a \times T_h) + 0,85)1,8 + 32 + 15$	Thom, 1959
ITH2	$(0,15 \times T_a + 0,85 \times T_h) \times 1,8 + 32$	Bianca, 1962
ITH3	$(0,35 \times T_a + 0,65 \times T_h) \times 1,8 + 32$	Bianca, 1962
ITH4	$1,8 \times T_a - (1 - H_r)(T_a - 14,3) + 32$	Kibler, 1964
ITH5	$(1,8 \times T_a + 32) - ((0,55 - 0,0055 \times H_r) \times (1,8 \times T_a - 26,8))$	NRC, 1971
ITH6	$(T_a \times T_h) \times 0,72 + 40,6$	NRC, 1971
ITH7	$(0,55 \times T_a + 0,2 \times T_{pr}) \times 1,8 + 32 + 17,5$	NRC, 1971
ITH8	$T_a + 0,36 \times T_{pr} + 41,5$	Youssef, 1985
ITH9	$(0,8 \times T_h) - \left(\left(\frac{H_r}{100} \right) \times (T_a - 14,4) \right) + 46,4$	Mader <i>et al.</i> , 2006

T_a = Température ambiante, °C; T_h = Température humide, °C; T_{pr} = Température du point de rosée, °C; H_r = Humidité relative, %.

Cependant, ces équations ne prennent en compte ni l'exposition aux rayons du soleil ni la ventilation apportée par le vent. Or, aujourd'hui, la plupart des troupeaux laitiers sont logés dans des étables et/ou avec des zones d'ombre, ce qui oblige les auteurs à nuancer leurs résultats expérimentaux, car les calculs d'ITH, quelle que soit l'équation utilisée, ne sont qu'un reflet approximatif du ressenti des vaches laitières. C'est pourquoi certains auteurs utilisent un capteur de température globe noir, également appelée IGNH (Indice de Globe Noir Humide), qui est une

mesure, combinant les effets de la vitesse de l'air et des radiations solaires (Dimiceli *et al.*, 2011). Cette température est mesurée grâce à un capteur cuivré sphérique noir de 15,2 cm de diamètre fixé à 2,1 m du sol. Cette mesure a une meilleure corrélation avec la production laitière que l'ITH, lorsque les vaches sont en plein soleil. Ainsi, pour des vaches sans accès à l'ombre, on préférera utiliser l'IGNH que l'ITH pour corrélérer à la baisse de production laitière.

Malgré toutes les équations d'ITH qui existent, aucune n'est parfaite, notamment car elles ne prennent en compte que des facteurs environnementaux. Or, d'autres facteurs comme la température du sol sont tout aussi importants pour une vache qui passe la majeure partie de son temps allongée à ruminer (Herbut *et al.*, 2018).

2. Zones d'ITH optimales

La zone de thermoneutralité de la vache se situe entre -0,5°C et 20°C (Johnson, 1987). Cependant, l'humidité joue beaucoup sur le confort thermique de la vache. En France, en particulier dans la région grand-ouest, le climat est de type océanique ou tempéré à tendance océanique, ce qui se caractérise par des températures rarement négatives. En revanche, les températures supérieures à 20°C sont relativement fréquentes de juin à septembre. C'est la raison pour laquelle nous nous intéresserons préférentiellement au stress thermique lié aux fortes chaleurs.

Ainsi, une vache souffre de stress thermique lorsque l'ITH dépasse 72 (Zimbelman *et al.*, 2009 ; Bernabucci *et al.*, 2014). Pour les vaches hautes productrices, dont la production laitière est supérieure à 35 kg de lait par jour, la limite supérieure d'ITH serait de 68 (Zimbelman *et al.*, 2009) (Figure 1 et Figure 2).

Le Livestock Conversation Incorporation a décrit en 1970 le Livestock Weather Safety Index afin de graduer le niveau de stress thermique (Figure 1).

Figure 1 : Index de graduation du stress thermique (selon Mader *et al.*, 2006)



Figure 2 : Valeurs d'Indice de Température et d'Humidité selon l'humidité et la température (selon (Collier et Collier, 2012))

		Humidité relative (%)																				
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Température	22.0	64	65	65	65	66	66	67	67	67	68	68	69	69	69	70	70	70	71	71	72	72
	23.0	65	65	66	66	66	67	67	67	68	68	69	69	70	70	71	71	71	72	72	73	73
	23.5	65	66	66	67	67	67	68	68	69	69	70	70	70	71	71	71	72	72	73	73	74
	24.0	66	66	67	67	68	68	68	69	69	70	70	71	71	72	72	73	73	74	74	75	75
	24.5	66	67	67	68	68	69	69	70	70	71	71	72	72	73	73	74	74	75	75	76	76
	25.0	67	67	68	68	69	69	70	70	71	71	72	72	73	73	74	74	75	75	76	76	77
	25.5	67	68	68	69	69	70	70	71	71	72	73	73	74	74	75	75	76	76	77	77	78
	26.0	67	68	69	69	70	70	71	71	72	73	73	74	74	75	76	76	77	77	78	78	79
	26.5	68	69	69	70	70	71	72	72	73	73	74	75	75	76	76	77	78	78	79	79	80
	27.0	68	69	70	70	71	72	72	73	73	74	75	75	76	77	77	78	78	79	80	80	81
	28.0	69	69	70	71	71	72	73	73	74	75	75	76	77	77	78	79	79	80	81	81	82
	28.5	69	70	71	71	72	73	73	74	75	76	77	78	78	79	80	80	81	81	82	82	83
	29.0	70	70	71	72	73	73	74	75	75	76	77	78	78	79	80	80	81	82	83	83	84
	29.5	70	71	72	72	73	74	75	75	76	77	78	78	79	80	81	81	82	83	84	84	85
	30.0	71	71	72	73	74	74	75	76	77	78	78	79	80	81	81	82	83	84	84	85	86
	30.5	71	72	73	73	74	75	76	77	77	78	79	80	81	81	82	83	84	85	85	86	87
	31.0	72	72	73	74	75	76	76	77	78	79	80	81	81	82	83	84	85	86	86	87	88
	31.5	72	73	74	75	75	76	77	78	79	80	80	81	82	83	84	85	86	86	87	88	89
	32.0	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	86	87	88	89	90	91
	33.0	73	74	75	76	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	86	87	88	89	90	91
	33.5	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	85	86	87	88	89	90	91	92
	34.0	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	85	85	86	87	88	89	90	91	92	93	93
	34.5	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	86	86	87	88	89	90	91	92	93	94
	35.0	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
35.5	75	76	77	78	79	80	81	82	83	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	
36.0	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	91	92	93	94	95	96	97	
36.5	76	77	78	80	80	82	83	83	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	98	
37.0	76	78	79	80	81	82	83	84	85	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	98	99	
38.0	77	78	79	81	82	83	84	85	86	87	88	90	91	92	93	94	95	96	98	99	100	
38.5	77	79	80	81	82	83	84	86	87	88	89	90	92	93	94	95	96	98	99	100	101	
39.0	78	79	80	82	83	84	85	86	87	89	90	91	92	94	95	96	97	98	100	101	102	
39.5	78	79	81	82	83	84	86	87	88	89	91	92	93	94	96	97	98	99	101	102	103	
40.0	79	80	81	83	84	85	86	88	89	90	91	93	94	95	96	98	99	100	101	103	104	
40.5	79	80	82	83	84	86	87	88	89	91	92	93	95	96	97	99	100	101	102	103	105	
41.0	80	81	82	84	85	87	88	89	90	91	93	94	95	97	98	99	101	102	103	104	106	
41.5	80	81	83	84	85	87	88	89	91	92	94	95	96	98	99	100	102	103	104	106	107	
42.0	81	82	83	85	86	88	89	90	92	93	94	96	97	98	100	101	103	104	105	107	108	
43.0	81	82	84	85	87	89	89	91	92	94	95	96	98	99	101	102	103	105	106	108	109	
43.5	81	83	84	86	87	89	90	91	93	94	96	97	99	100	101	103	104	106	107	109	110	
44.0	82	83	85	86	88	90	91	92	94	95	96	98	99	101	102	104	105	107	108	110	111	
44.5	82	84	85	87	88	90	91	93	94	96	97	99	100	102	103	105	106	108	109	111	112	
45.0	83	84	86	87	89	91	92	93	95	96	98	99	101	102	104	105	107	108	110	111	113	
45.5	83	85	86	88	89	92	92	94	96	97	99	100	102	103	105	106	108	109	111	112	114	
46.0	84	85	87	88	90	92	93	95	96	98	99	101	102	104	106	107	109	110	112	113	115	
46.5	84	86	87	89	90	93	94	95	97	98	100	102	103	105	106	108	110	111	113	114	116	
47.0	85	86	88	89	91	93	94	96	98	99	101	102	104	106	107	109	111	112	114	115	117	
48.0	85	87	88	90	92	94	95	97	98	100	102	103	105	106	108	110	111	113	115	116	118	
48.5	85	87	89	90	92	94	96	97	99	101	102	104	106	107	109	111	112	114	116	117	119	
49.0	86	88	89	91	93	95	96	98	100	101	103	105	106	108	110	111	113	115	117	118	120	

Légende :

ITH < 68 pour les vaches Haute Productrices (< 72 pour les vaches avec une production standard) : pas de stress thermique

ITH 68 – 71 : Léger stress thermique, début de la mise en place des mécanismes de thermolyse

ITH 72 – 79 : Stress thermique léger à modéré

ITH 80 – 89 : Stress thermique modéré à sévère

ITH 90 – 98 : Stress thermique sévère

ITH > 99 : Pronostic vital de la vache engagé

B. Mécanismes de thermolyse

La vache laitière, comme la plupart des mammifères, est endotherme, c'est-à-dire que son métabolisme est capable de produire suffisamment de chaleur pour assurer une stabilité thermique de plus ou moins 2°C. La thermorégulation est gérée par l'hypothalamus, qui tient un rôle de thermostat : c'est lui qui décide selon la température ressentie et les informations afférentes, quels mécanismes mettre en place entre thermolyse et thermorégulation afin de réguler la température corporelle.

La thermolyse se fait par des pertes de chaleur sensibles et d'autres insensibles. Parmi les pertes sensibles, on retrouve les processus de radiation, de conduction et de convection alors que les pertes insensibles se caractérisent par l'évaporation.

1. Pertes de chaleur sensibles

a) La radiation

La radiation consiste en un transfert de chaleur sous forme d'un rayonnement électromagnétique, du corps le plus chaud vers le corps le plus froid. Il s'agit d'un moyen très efficace pour la vache de perdre de la chaleur lorsque le gradient de température est suffisant, c'est-à-dire lorsqu'il ne fait pas trop chaud.

b) La conduction

La conduction quant à elle permet un transfert de chaleur lors d'un contact direct, en suivant un gradient de température, par exemple, lors d'un contact entre le sol et le corps de la vache. Ce mécanisme peut également s'appliquer lorsque la vache boit de l'eau fraîche, qui va venir refroidir le contenu ruminal.

c) La convection

La convection consiste en un transfert de chaleur selon un gradient de température *via* l'air environnant, ainsi, le vent peut favoriser la thermolyse lorsque le corps est plus chaud que l'air.

Lors de thermolyse, on observe une redistribution de la circulation sanguine, avec une vasodilatation périphérique qui va favoriser les pertes de chaleur sensibles, notamment par convection grâce à l'air environnant. Ainsi, la chaleur produite par le métabolisme cellulaire est véhiculé grâce au sang dans tout l'organisme, ce qui permet de dissiper la chaleur.

Dans tous les cas, les pertes de chaleur sensibles sont plus difficiles lorsque le gradient de température entre le milieu extérieur et le corps de la vache est plus faible (Hillman *et al.*, 1985).

2. Pertes de chaleur insensibles

L'évaporation nécessite la présence d'une grande quantité d'eau et se fait par la perspiration, la sudation et la respiration. La vache, en augmentant sa fréquence respiratoire, inspire de l'air chargé d'eau, qui au contact des muqueuses, se réchauffe, s'évapore et permet ainsi à la vache de perdre de la chaleur. Cependant, cette adaptation met environ deux heures à se mettre en place suite à l'augmentation de la température ambiante (Mader *et al.*, 2006).

De plus, la vache est capable de suer lorsque la température ambiante augmente. Cependant, lorsque l'humidité relative augmente, la sudation diminue, limitant ainsi la perte de chaleur par ce mécanisme. En revanche, le taux d'évaporation est amélioré lorsque la peau et les poils sont

mouillés au préalable et qu'il y a un débit d'air suffisant. Cela montre que le vent et le fait de mouiller les animaux facilitent leur refroidissement (Gebremedhin, 2008).

Lorsque la température extérieure dépasse 30°C, la principale source de refroidissement corporel est l'évaporation cutanée (85 %), alors que cette source est secondaire lors de températures comprises entre 10 et 20°C (20 à 30 %) (Collier et Collier, 2012).

3. Limiter la thermogénèse

Les mécanismes de thermolyse passent également par la diminution des mécanismes de thermogénèse. Ainsi, on observe une baisse de la matière sèche ingérée (MSI), une augmentation de la prise de boisson et un ralentissement de la fréquence cardiaque (Yousef, 1985). Les vaches ont également tendance à rechercher des points d'ombre et à réduire leur activité physique (West *et al.*, 2003)

En effet, la digestion est l'une des principales sources de thermogénèse, c'est pourquoi la vache va diminuer son nombre de repas et va manger en plus petites quantités. De plus, selon la conformation du bâtiment, aller à l'auge demande à la vache de l'énergie ce qui augmenterait encore plus sa température corporelle. En parallèle, les micro-organismes du rumen, d'autant plus lors de la digestion, augmentent la température ruminale, ce qui constitue une source de chaleur non négligeable.

La diminution de la thermogénèse passe également par la diminution de la production laitière, qui est une source importante de production de chaleur, surtout chez les vaches hautes productrices qui produisent en moyenne 48 % de chaleur de plus que les vaches moins productives (Purwanto *et al.*, 1990), ce qui les rend plus sensibles aux hautes températures.

Il semblerait également que les vaches au pelage noir absorberaient plus la chaleur que celles au pelage blanc : on observe ainsi une augmentation de la température cutanée de 4,8°C pour les vaches noires contre 0,7°C pour les vaches claires (Hillman *et al.*, 2001 ; Collier et Collier, 2012). De plus, les vaches foncées ont tendance à plus suer que les vaches claires (Gebremedhin, 2008). Il existe également des différences raciales : les vaches plus rustiques ou originaires de régions chaudes suent moins et semble mieux tolérer la chaleur que des vaches moins habituées comme les Prim'Holstein (Gebremedhin, 2008).

Enfin, toutes les études expérimentales portant sur ce sujet ne prennent pas forcément en compte les conditions réelles : en effet, sauf en cas de canicule, on observe une chute de température la nuit. Il semblerait que les vaches ayant une période fraîche la nuit, avec une température inférieure à 21°C, auraient une moindre diminution de la production laitière que des vaches confrontées à un stress thermique constant (West *et al.*, 2003).

C. Conséquences des mécanismes de thermorégulation sur le métabolisme

Afin de monitorer l'activité thermique des vaches, deux paramètres sont majoritairement utilisés : la température rectale, qui se situe normalement entre 38°C et 39°C et la fréquence respiratoire. Ainsi, les marqueurs physiologiques de stress thermique sont une hyperthermie, une

tachypnée¹ voire polypnée², avec une fréquence respiratoire supérieure à 60 mouvements par minutes (Collier *et al.*, 2017), ainsi qu'une baisse de la MSI. D'autres marqueurs, plutôt comportementaux, comme le temps passé couché ou debout ou encore à manger, peuvent également être utilisés (Galán *et al.*, 2018).

La tachypnée engendre une alcalose respiratoire³, en augmentant le taux de CO₂ expiré, ce qui diminue la concentration plasmatique en CO₂. Pour compenser cela et revenir à un pH normal, une augmentation de l'excrétion urinaire d'HCO₃⁻ intervient au niveau des reins, diminuant de ce fait le pouvoir tampon du sang, créant ainsi un terrain à risque d'acidose métabolique⁴ (West *et al.*, 2003).

En parallèle, la diminution de MSI entraîne une diminution de la salivation, dont le pouvoir tampon permet normalement de neutraliser le pH du rumen. De plus, le sang étant réparti plutôt en périphérie du corps de la vache, le tractus digestif et donc le rumen bénéficie d'une moindre perfusion sanguine, ce qui diminue l'absorption des acides gras volatils (AGV). Ainsi, la diminution de la salivation et de l'absorption des AGV entraînent une acidification ruminale. De plus, la fréquence des repas diminue également : lors de stress thermique, les vaches font en moyenne deux à cinq repas par jour contre 12 à 15 lors de températures plus basses, ce qui favorise une acidité ruminale postprandiale (Bernabucci *et al.*, 2010).

Pour améliorer la thermolyse, la vache peut augmenter sa prise de boisson. On estime qu'une vache en lactation subissant un stress thermique devrait boire 1,2 litres d'eau supplémentaire par jour par degré supérieur à la température ambiante estimée à 20°C (West *et al.*, 2003). Cependant, le stress subit peut diminuer la sensation de soif pour la vache, qui de ce fait ne boit pas suffisamment pour subvenir à ses besoins (Polsky et von Keyserlingk, 2017).

Chez d'autres espèces comme le porc et la volaille, on observe une augmentation de la ghréline lors d'un stress thermique, qui est une hormone synthétisée par l'estomac lorsque celui-ci est vide afin de stimuler l'appétit (Pearce *et al.*, 2014). Cependant chez la vache, on observe une diminution de la MSI, malgré une potentielle augmentation de la sensation de faim, afin de limiter l'augmentation de sa température corporelle, ce qui pourrait entraîner de la frustration et donc atteindre l'un des piliers fondamentaux du bien-être animal (Polsky et von Keyserlingk, 2017).

La thermorégulation chez le bovin est un mécanisme inné qui permet à l'organisme de s'acclimater notamment lors d'une hausse des températures. Cependant, ces mécanismes de thermorégulation ne sont pas sans conséquences à court et à long terme.

¹ Tachypnée : accélération anormale de la fréquence respiratoire, correspond chez le bovin à une fréquence respiratoire supérieure à 36 mouvements par minute.

² Polypnée : augmentation de la fréquence respiratoire avec une diminution du volume d'air courant.

³ Alcalose respiratoire : hausse du pH sanguin d'origine respiratoire, due à la diminution de la concentration en dioxyde de carbone dans le sang suite à l'hyperventilation.

⁴ Acidose métabolique : trouble de l'équilibre acido-basique sanguin caractérisé par une diminution du pH sanguin.

II. Conséquences du stress thermique

Le stress thermique sur le long terme engendre une adaptation des animaux de production pour s'acclimater : c'est une forme d'homéorhèse⁵, c'est-à-dire une adaptation de l'organisme aux contraintes environnementales qui évoluent, une forme de régulation sur le long terme (Bernabucci *et al.*, 2010). Le stress thermique est un terme relativement récent, mais le phénomène est connu depuis près de 50 ans : en effet, dès 1976, Mc Dowell a mis en évidence une moindre production laitière et un moindre appétit pour les vaches vèlant en été plutôt qu'en hiver (McDowell *et al.*, 1976), ce qui mit en lumière un problème toujours d'actualité qui possède de nombreuses répercussions pour l'animal.

A. Sur la santé

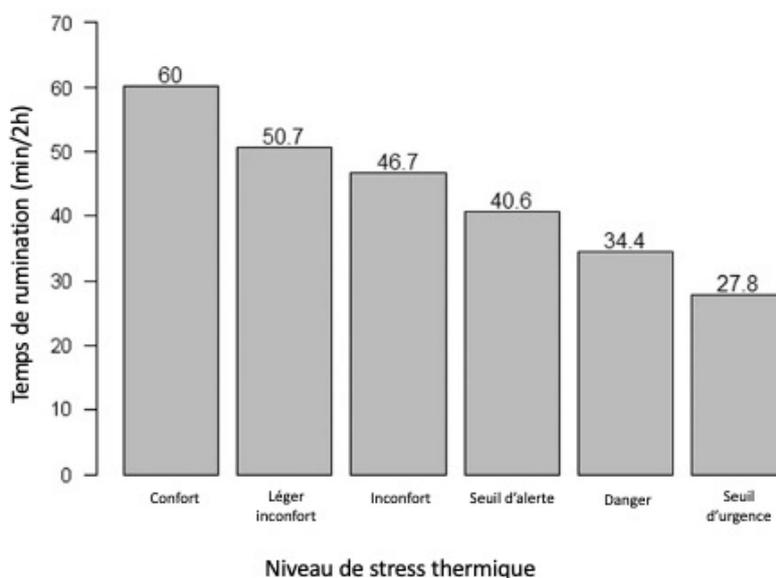
Le stress thermique engendre des adaptations métaboliques qui peuvent avoir des conséquences néfastes pour l'animal. Par exemple, afin de diminuer la production de chaleur par le corps, on observe des modifications du système endocrine : diminution de la production d'hormones de croissance, de catécholamines, de glucocorticoïdes et d'hormones thyroïdiennes (Magdub *et al.*, 1982 ; Yousef, 1985). Les hormones de croissance et les catécholamines ont un rôle direct sur la production lactée, par conséquent, leur diminution entraîne une baisse de la production laitière. La diminution des glucocorticoïdes entraîne un dysfonctionnement dans le métabolisme glucidique, lipidique et protéique, qui a une influence directe sur la production laitière. Les hormones thyroïdiennes sont essentielles à la thermorégulation et au système immunitaire, leur diminution entraîne donc une thermorégulation et une immunité moins efficaces. De plus, on observe une augmentation de la production de prolactine, ce qui peut sembler contreproductif car la prolactine favorise la lactogénèse et donc une augmentation de la chaleur corporelle. Cependant, elle exerce également un contrôle sur les glandes sudoripares *via* la production de sueur et favorise ainsi la thermorégulation (Beede et Collier, 1986).

Par ailleurs, le temps de rumination diminue lorsque l'ITH augmente : on observe ainsi une diminution de 9,36 minutes de rumination sur deux heures lors d'un léger inconfort thermique, cette diminution peut atteindre 32,19 minutes sur deux heures lors d'un état d'urgence en termes d'inconfort thermique (Figure 3). Cela serait dû à une réduction de la MSI qui entrainerait donc une diminution de la rumination (Moretti *et al.*, 2017). Cette diminution de la rumination entraîne une diminution de la production de salive, principale source de pouvoir tampon du rumen, qui peut être à l'origine d'une acidose ruminale⁶.

⁵ Régulation des flux du métabolisme en fonction de l'état physiologique dans lequel se trouve l'individu en prenant en compte l'environnement qui l'entoure.

⁶ Acidose ruminale : correspond à un pH ruminal inférieur à 5,2, pouvant être à l'origine de dysbiose ruminale avec un déséquilibre dans les populations de micro-organismes du rumen, ainsi qu'à des lésions de type ulcères de la muqueuse ruminale.

Figure 3 : Temps de rumination en fonction du degré de stress thermique (d'après Moretti *et al.*, 2017)



On observe également une baisse de la glycémie, une augmentation des AGNE (Acides Gras Non Estérifiés) plasmatiques, du taux de bêta-hydroxybutyrate et d'urée chez les vaches laitières en *peripartum* lors d'un stress thermique, ce qui met en évidence une balance énergétique négative par comparaison à des vaches laitières dans des conditions normales (Basiricò *et al.*, 2011 ; Cowley *et al.*, 2015). De plus, le taux d'insuline est plus élevé lors de fortes chaleurs : les vaches subissant un stress thermique ont en moyenne un taux d'insuline 37% supérieur à des vaches témoins (Wheelock *et al.*, 2010). Cette hausse est le reflet d'une adaptation stratégique de la vache : cela lui permet de maximiser le stockage et l'utilisation du glucose circulant, afin de limiter les effets de la sous-nutrition observée lors de stress thermique.

Lorsqu'il fait chaud, la circulation sanguine de la vache est préférentiellement répartie au niveau des tissus périphériques afin de favoriser la thermolyse. Cependant, ce mécanisme altère le métabolisme des nutriments et notamment l'activité de la glande mammaire (Renaudeau *et al.*, 2012). De plus, cette circulation sanguine inhabituelle fait que le tube digestif est moins perfusé, ce qui peut altérer les entérocytes, et donc la barrière intestinale, favorisant de ce fait des phénomènes d'inflammation voire même de translocation bactérienne⁷(Lambert, 2009 ; Koch *et al.*, 2019).

La sudation excessive entraîne une perte de potassium, qui peut ne pas être suffisamment compensée par la ration. Or, la production de lait nécessite du potassium, ce qui peut expliquer également la chute de production ainsi que d'autres problèmes de santé liés à l'hypokaliémie (Renaudeau *et al.*, 2012).

A l'échelle moléculaire, l'augmentation de la chaleur corporelle engendre des modifications, notamment au niveau des protéines, dont la conformation moléculaire est sensible à la chaleur. Afin

⁷ Translocation bactérienne : passage des bactéries présentes dans le tube digestif à la circulation sanguine, par le biais d'une perméabilisation de la barrière intestinale.

de minimiser les effets néfastes de la hausse de température corporelle sur les protéines, on observe une synthèse plus importante de Heat Shock Proteines (HSP) au sein du foie et de la glande mammaire des vaches subissant un stress thermique. Ces protéines sont des molécules chaperonnes, c'est-à-dire qu'elles ont un rôle dans la protection des protéines, souvent stables uniquement à une certaine température (Ma *et al.*, 2019). Cette adaptation est donc une protection favorable pour la vache.

B. Sur le volume de la production laitière

Lorsque l'ITH augmente, on observe une augmentation de la température rectale des vaches en production, associée à une augmentation de leur fréquence respiratoire. Pour une augmentation de température rectale de 2°C (40°C au lieu de 38°C par exemple), une chute production de 5 litres par jour est observée en moyenne. Cette chute de production est inversement proportionnelle à l'augmentation de l'ITH : lorsque l'on passe d'un ITH de 60 à 80, la production laitière diminue de 2,5 litres par jour. La diminution de production laitière s'observe en général 17 heures après une exposition à un ITH provoquant un stress thermique (Zimbelman *et al.*, 2009). Pour la race Prim'Holstein, race à gros potentiel de production laitière, on observe en moyenne une perte de 0,88 kg de lait par jour à chaque unité d'ITH supplémentaire au-delà de 72 (West *et al.*, 2003). Une autre étude rapporte une diminution de la production laitière de 0,27 kg de lait par jour par point d'ITH supérieur à 68 (Bernabucci *et al.*, 2010). A l'échelle du troupeau, la perte serait estimée entre 70 et 550 kg de lait par jour pour un troupeau de 100 vaches laitières à cause du stress thermique. Ces chiffres restent cependant variables d'un élevage à un autre en fonction de la race, de la génétique et de tous les paramètres propres à l'élevage qui impactent la production laitière (Herbut *et al.*, 2018).

L'humidité relative (HR) est également importante. En effet, à température ambiante constante (30°C), la diminution de production laitière est plus importante (-11,9 kg/j) avec une HR de 80 % que pour une HR de 20 % (-2,6 kg/j).

La chute de la production laitière est à 35 % expliquée par la diminution de la MSI (Rhoads *et al.*, 2009), ainsi que par une prise de boisson insuffisante. Cette dernière peut être impactée par la localisation des points d'eau, qui peuvent se trouver en plein soleil, ou loin du site de couchage, ce qui demande donc à la vache de l'énergie pour aller boire. De plus, la hiérarchie du troupeau peut avoir une influence sur l'accès aux points d'eau : les vaches dominantes ont tendance à monopoliser le point d'eau, empêchant ainsi les vaches dominées d'y accéder (Coimbra *et al.*, 2012).

Cette diminution de la production laitière pénalise plus lourdement les vaches en milieu de lactation : en effet lors de stress thermique, les vaches en début de lactation ont une production laitière diminuée de 14 % en moyenne contre 26 % en milieu de lactation (Bernabucci *et al.*, 2010).

Enfin, le stress thermique n'a pas qu'un impact à court terme sur la production laitière. En effet, les génisses pré-pubères confrontées à un stress thermique sont susceptibles d'avoir une production laitière amoindrie plus tard par rapport à ce que leur patrimoine génétique leur permettrait (Nardone *et al.*, 2006).

C. Sur la qualité de la production laitière

En plus des variations de volume de la production laitière, on note des changements de composition du lait lors d'épisodes de stress thermique. Par exemple, le taux protéique, notamment

le taux de caséine du lait, est plus faible lors de fortes températures, avec des répercussions en aval sur la production fromagère (Nardone *et al.*, 2010 ; Cowley *et al.*, 2015). De plus, lors d'un stress thermique, on remarque une augmentation de la proportion d'acides gras à longue chaîne dans le lait, ainsi qu'une diminution des acides gras à chaîne courte, ce qui reflète que la vache puise ces acides gras dans ses réserves métaboliques ou dans son alimentation plutôt que de produire des acides gras, à chaîne plus courte, dans la mamelle. On note également une teneur moins élevée en magnésium, calcium, phosphore et lactose (Bernabucci et Calamari, 1998). En revanche, le taux butyreux reste inchangé malgré le stress thermique (Ma *et al.*, 2019).

Plusieurs études montrent que lorsqu'un refroidissement se produit, la nuit par exemple, la qualité du lait est moins impactée (West *et al.*, 2003 ; do Amaral *et al.*, 2011).

Au-delà de la qualité du lait, la qualité du colostrum est également modifiée lors de stress thermique ayant lieu à la fin de la gestation : il contient moins de lactose et moins de protéines donc d'immunoglobulines (Nardone *et al.*, 2006), ce qui peut avoir un impact négatif sur la santé du veau, qui a besoin de ces immunoglobulines afin de construire ses défenses immunitaires pour pouvoir lutter contre virus et bactéries qui peuvent lui être fatal.

D. Sur la reproduction

Les effets du stress thermique se ressentent au bout de quelques jours au niveau de la production laitière, mais sur le long terme, c'est surtout la reproduction qui va être impactée, car le stress thermique induit une mauvaise détection des chaleurs, diminue la fertilité et altère la qualité de la semence (Herbut *et al.*, 2018). En effet, le taux de conception, qui correspond au nombre de vaches gestantes divisé par le nombre de vaches inséminées, diminue de façon significative lorsque l'ITH dépasse 72, en passant de 31 % à 12 % (Schüller *et al.*, 2014). De plus, le taux de vaches non vues en chaleurs à 90 jours post-partum augmente lors de stress thermique en passant de 41,4 % à 59,6 % (Al-Katanani *et al.*, 1999).

Les mécanismes à l'origine de la baisse de fertilité lors de stress thermique ont été étudiés et il semblerait que la hausse de la température ait une action négative sur la régulation de l'axe hypothalamo-hypophysaire-ovarien. De plus, la hausse de température corporelle induite par la hausse de température extérieure a un impact néfaste sur l'ovaire lui-même, en altérant la qualité des follicules par des mécanismes de stress oxydatif, apoptoses cellulaires et dysfonctionnements mitochondriaux (Roth, 2017). Il faut environ deux à cinq cycles ovariens (soit six semaines à quatre mois) pour qu'une vache récupère d'un stress thermique au niveau de l'ovaire, c'est-à-dire qu'il faut attendre la production de nouveaux follicules n'ayant pas subi de stress thermique pour observer des résultats de reproduction dans les normes (Torres-Júnior *et al.*, 2008), ce qui pourrait expliquer la baisse de fertilité souvent observée l'automne suivant l'épisode de stress thermique estival.

E. Sur le comportement des vaches

Afin de maximiser l'évaporation en augmentant la surface de peau en contact avec l'air ambiant, les vaches ont tendance à rester debout plus longtemps (Frazzi *et al.*, 2000) ce qui peut engendrer indirectement des lésions podales comme des lésions de fourbure pouvant impacter la production laitière notamment à cause de la douleur (Allen *et al.*, 2015).

Le comportement des vaches, notamment le comportement postural, commence à changer lorsque l'ITH dépasse 68. Dès lors, elles commencent à mettre en place des stratégies pour

maximiser les échanges de chaleur avec le milieu extérieur : elles restent debout, augmentent leur fréquence respiratoire, vont moins à l'auge (Allen *et al.*, 2015).

F. Sur l'économie

Chaque année, l'industrie laitière des États-Unis d'Amérique perd entre 670 et 900 millions de dollars des conséquences du stress thermique, ces chiffres pourraient évoluer jusqu'à plus de deux milliards de dollars par an d'ici la fin du siècle (Collier et Collier, 2012 ; Mauger *et al.*, 2015). Cependant, il existe peu de données en Europe et notamment en France sur ce sujet. La perte économique étant variable d'une année à l'autre et d'une vache à l'autre, il serait compliqué de la calculer. En revanche, en cumulant les pertes de production, les pertes en termes de qualité, les problèmes de reproduction engendrés et les potentiels problèmes de santé provoqués, il est certain que les pertes économiques liées au stress thermique sont non négligeables en France, surtout lors des étés caniculaires. De plus, les prévisions climatiques des prochaines années tendent à montrer des étés de plus en plus chauds dans nos régions, ce qui montre l'importance et l'intérêt de trouver des solutions afin de limiter l'impact du stress thermique sur la santé de nos vaches laitières et sur la rentabilité des élevages.

Le stress thermique peut impacter les vaches ainsi que leur production à court mais aussi à moyen terme, ce qui peut impacter l'économie de l'élevage. Pour pallier à cela, des stratégies peuvent être mises en place, en agissant sur plusieurs leviers d'action détaillés dans la partie suivante.

III. Stratégies permettant de limiter le stress thermique

Il existe trois axes de solutions pour pallier au stress thermique : aménager l'environnement, modifier la ration et sélectionner génétiquement des individus résistants à la chaleur (Conte *et al.*, 2018).

A. Aménagement des logements

Les vaches en pâture sont plus sensibles au stress thermiques car elles reçoivent directement les radiations du soleil. Cependant, les vaches en bâtiment sont aussi impactées car la ventilation n'est pas toujours optimale, ce qui limite les mesures de refroidissement que la vache peut mettre en place.

1. Augmentation des zones d'ombre

L'ombre est un moyen efficace de limiter l'impact du stress thermique sur les vaches. En effet, des études comparant la production laitière de vaches avec et sans ombre montrent que celles subissant un stress thermique mais ayant un accès à l'ombre ont une diminution de la production laitière moindre, 7,9 %, contre 18,2 % pour celles n'ayant pas d'accès à l'ombre (Kendall *et al.*, 2006 ; Silanikove *et al.*, 2009). Pour les animaux ayant accès au pâturage, mettre des arbres permet d'augmenter les zones d'ombre ce qui permet de diminuer les radiations du soleil. Cependant, l'ombre ne permet pas de diminuer la température ambiante (Renaudeau *et al.*, 2012).

Pour éviter aux vaches laitières de trop subir le stress thermique, il est préférable de maintenir une température constante dans leur zone de thermoneutralité c'est-à-dire entre -5°C et 20°C, ou de garantir une période d'au moins six heures par jour à moins de 20°C pour qu'elles puissent se

refroidir efficacement. Il est également important de s'assurer d'une ventilation adaptée du bâtiment pour opérer son refroidissement (Herbut *et al.*, 2018).

2. Points d'abreuvements suffisants

Garantir des points d'eau propres et frais permet de minimiser l'impact des hausses de températures sur la production laitière. En effet, des vaches ayant accès à un point d'eau, de bonne qualité, à volonté et sans compétition avec leurs congénères lors de fortes chaleurs ont une diminution de la production laitière de 18,2 % contre 55,1 % pour celles n'ayant pas accès à un point d'eau (Silanikove *et al.*, 2009), ce qui montre l'importance d'un abreuvement de qualité, surtout en cas de stress thermique. Concrètement, un système d'abreuvement est dit suffisant lorsqu'il y a au minimum 7 cm d'abreuvoir par vache avec un débit minimal de 20 L/min ou un abreuvoir de type bol pour dix animaux, avec un débit minimal de 10 L/min, dont un idéalement situé en sortie de traite. L'eau doit être propre c'est à dire sans nourriture ou excréments à l'intérieur. De plus, pour satisfaire son bien-être, une vache ne doit pas parcourir plus de vingt mètres avant de trouver un point d'eau.

3. Amélioration de la ventilation

a) Par des ventilateurs

Augmenter la vitesse de l'air permet d'améliorer la perte de chaleur par convection des vaches en favorisant le renouvellement d'air au contact de la vache (Kaufman *et al.*, 2020). Ainsi, la ventilation naturelle du bâtiment peut être améliorée artificiellement à l'aide de ventilateurs. La ventilation mécanique permet de réduire de façon significative les pertes liées au stress thermique : les vaches subissant un stress thermique minoré par une ventilation mécanique produisent en moyenne 3,6 litres de lait de plus que les vaches subissant un stress thermique sans ventilation (Turner *et al.*, 1992). Cependant leur efficacité en termes d'amélioration du bien-être des vaches est controversée car il semblerait que la présence de ventilateurs ne modifie pas le temps qu'elles passent debout (Frazzi *et al.*, 2000). En effet, les ventilateurs permettent d'améliorer l'humidité relative, qui est une variable des équations d'ITH, mais n'a pas d'influence sur la température ambiante (Frazzi *et al.*, 2000).

Il s'agit de la solution la plus facile à mettre en place dans les bâtiments et la moins coûteuse : entre 47 et 80 euros par vache et par an en moyenne, avec un amortissement sur 10 ans d'après le CNIEL (Centre National Interprofessionnel de l'Économie Laitière).

b) Par des brumisateurs

Des systèmes de brumisation de l'eau sont efficaces pour rafraîchir l'air : en effet, ces systèmes produisent de fines gouttelettes d'eau qui s'évaporent en liaison avec la température ambiante élevée et permettent, grâce à l'énergie captée lors de ce changement d'état, de refroidir la température ambiante (Renaudeau *et al.*, 2012).

Il est aussi possible de créer une évaporation directe, en mouillant les vaches à l'aide de ces brumisateurs puis en les séchant à l'aide d'un ventilateur. Cette évaporation forcée est efficace dans les zones sèches et peut réduire la température jusqu'à 15°C en dessous de la température ambiante. En revanche, au-delà de 70 à 75 % d'humidité relative, cette méthode de refroidissement est beaucoup moins efficace (Berman, 2006).

B. Adaptation de la ration

La digestion des ruminants est la principale source de production de chaleur corporelle, suivie par la production laitière. Nous avons vu précédemment que le stress thermique diminuait l'ingestion de la vache laitière. Ainsi, revoir et adapter la ration lors d'un épisode de stress thermique peut permettre de maximiser la production laitière et de limiter les pertes économiques engendrées par les fortes chaleurs.

1. Par un rééquilibrage de la ration

Augmenter la fermentabilité de la ration en augmentant la proportion de concentrés (en passant de 11,7 % à 33 % de la ration) permet, dans un contexte de stress thermique, d'augmenter la densité énergétique, ce qui permet au final de compenser la baisse d'ingestion observée chez les vaches en lactation subissant un stress thermique (West *et al.*, 2003 ; Nardone *et al.*, 2006 ; Bernabucci *et al.*, 2010 ; Conte *et al.*, 2018). Cependant, cette modification de la ration s'accompagne d'une diminution d'un facteur quatre de la matière grasse du lait entre la ration à 11,7 % de concentrés et celle à 33 %, d'une diminution la concentration ruminale en butyrate et d'une augmentation de celle en propionate, ce qui permet d'augmenter le TP (Nasrollahi *et al.*, 2019). On peut également préférer les fourrages hautement digestibles comme les coques de soja et les pulpes de betterave. Ces ingrédients augmentent l'apport en sucres hautement fermentescibles et améliorent la production d'acides gras volatils dans le rumen avec des effets bénéfiques sur l'équilibre énergétique de l'animal (Bernabucci *et al.*, 2014). Cependant, augmenter la fermentabilité de la ration par l'apport de concentrés est un facteur de risque d'acidose. Or, les vaches qui souffrent de stress thermique sont plus sensibles à l'acidose (Kadzere *et al.*, 2002 ; West *et al.*, 2003).

Pour augmenter la densité énergétique de la ration il est aussi possible d'ajouter des matières grasses *via* des huiles par exemple, afin de garantir l'apport énergétique malgré la diminution de la MSI (Bernabucci *et al.*, 2014).

L'ajout de protéines brutes à la ration n'augmente pas la production laitière des vaches en stress thermique, cependant, cela augmente légèrement les matières protéiques du lait et permet ainsi de palier la perte économique liée à la chute de la production laitière (Kaufman *et al.*, 2020). Il faudrait également ajouter des acides aminés essentiels, afin de garantir l'apport de ces derniers malgré la modification de la ration de base.

Il est également important de supplémenter en minéraux (Na, K, Mg) pour garder un pH ruminal constant ainsi que pour contrebalancer les pertes minérales, notamment en potassium, liées à la sudation et à la baisse d'ingestion (Millérioux, 2021).

2. Par des compléments alimentaires

Plusieurs études ont travaillé sur l'apport dans la ration d'une levure, *Saccharomyces cerevisiae*, qui pourrait aider la vache à mieux supporter le stress thermique. En effet, l'apport de cette levure dans l'alimentation tend à diminuer le taux de cortisol plasmatique, à augmenter les neutrophiles et lymphocytes circulants, ce qui peut améliorer l'immunité des animaux, et semble diminuer le pic de Sérum Amyloïde A qui est un marqueur de l'inflammation chez les bovins (Al-Qaisi *et al.*, 2020). Cependant, on ne note pas de différence en termes de fréquence respiratoire, de fréquence cardiaque et de température rectale entre le groupe témoin et le groupe ayant reçu *S. cerevisiae* dans leur ration (Shwartz *et al.*, 2009 ; Al-Qaisi *et al.*, 2020). Les vaches laitières

complémentées en levure ont tendance à faire de plus petits repas mais plus nombreux, ce qui modifie le pH ruminal de façon linéaire (5,99 pour 0 g/j de levure, 6,03 pour 0,5g/j et 6,26 pour 1 g/j). Le temps de rumination augmente également avec l'apport de levure ce qui favorise la production de salive et agit donc comme tampon pour limiter l'acidose. De plus, les levures favorisent le développement des micro-organismes du rumen, ce qui favorise l'absorption des divers nutriments. (Perdomo *et al.*, 2020).

L'apport en vitamine B3 dans la ration n'a pas d'influence sur la production de lait ni sur la MSI mais les vaches ayant reçu ce complément ont une température rectale plus basse (38,17 contre $38,34 \pm 0.07^{\circ}\text{C}$) ainsi qu'une température vaginale plus basse (38,0 contre $38,4 \pm 0.02^{\circ}\text{C}$) que les vaches témoins. Ce traitement augmente également la sudation des vaches, ce qui peut aider à leur rafraîchissement (Zimbelman *et al.*, 2010).

C. Adaptations génétiques

1. Par la race

La majorité des études menées sur le stress thermique ont été réalisées sur des Prim'Holstein, qui semble être une race sensible au stress thermique, notamment à cause de sa production laitière importante. Les Prim'Holstein croisées avec des races plus rustiques comme les Jersiaises ont une meilleure tolérance à la chaleur : en effet, leur rumination et leur température rectale sont moins impactées que sur celles des vaches Prim'Holstein pures (Vizzotto *et al.*, 2015). De plus, Il existe une corrélation ($r = -0,36$) entre l'héritabilité de la production laitière et la tolérance à la chaleur, ce qui laisse suggérer une possible héritabilité pour la résistance à la chaleur (Ravagnolo et Misztal, 2000). Ces données semblent cohérentes avec le fait que la race Prim'Holstein, chez qui la production laitière est en général très élevée, est aussi la race la plus sensible au stress thermique.

2. Par des mutations génétiques

Les conséquences du stress thermique sont présentes chez les animaux présentant une thermorégulation inadaptée aux conditions environnementales. Une des stratégies pour pallier ce problème est de sélectionner des animaux qui, sur le plan génétique, semblent plus tolérants à la chaleur. Dikmen et son équipe ont ainsi mis en évidence une région du génome qui varie chez les animaux dont la température rectale augmente lors de stress thermique, par rapport à ceux dont la température est stable. Ainsi, l'héritabilité supposée de la résistance aux hautes températures a été suggérée d'un point de vue génétique (Dikmen *et al.*, 2013).

La sélection génétique permet de sélectionner, entre autres, les individus résistants à la chaleur qui vont par conséquent avoir un rapport émission de méthane par litre de lait produit plus faible avec, par conséquent, un impact positif sur l'émission de gaz à effet de serre et donc sur le réchauffement climatique (Knapp *et al.*, 2014).

Enfin, l'introduction du gène SLICK au sein du génome de la vache permet d'avoir un poil plus fin et plus léger ce qui permet de lutter contre le stress thermique en été. En revanche, il prédispose également à l'hypothermie lors des hivers froids comme certaines régions d'Europe (Polsky et von Keyserlingk, 2017). Cependant, il n'existe pas de différence de production laitière entre des races aux poils fins et des races aux poils normaux lors d'un stress thermique (Dikmen *et al.*, 2008).

Des solutions existent pour pallier au stress thermique. Cependant ces dernières peuvent être coûteuses, voire compliquées à mettre en place, notamment pour les modifications de race ou génétiques.

Deuxième partie : étude expérimentale

I. Introduction

L'objectif de notre étude était d'observer l'impact que pouvait avoir un épisode de stress thermique sur la production laitière, à partir de l'étude des données d'un élevage bovin laitier d'Île-de-France, comme le montre d'autres études réalisées au Canada, aux Etats-Unis, en Italie ou encore en Israël. Pour cela, nous avons cherché à répondre à plusieurs questions :

- Un épisode de stress thermique, donc avec un ITH supérieur à 68, peut-il faire diminuer de façon significative la production laitière ? Qu'en est-il de la qualité du lait ?
- Les vaches hautes productrices sont-elles plus touchées par le stress thermique que les vaches faibles productrices ?

II. Matériels et méthodes

A. Présentation de l'élevage

L'élevage étudié est celui de Grignon, dans les Yvelines (78) dans la région Île-de-France, appartenant à AgroParisTech. Il s'agit d'un élevage laitier conventionnel, comptant aujourd'hui 150 vaches en lactation en moyenne pour un troupeau total de 200 vaches, les vaches étant de race Prim'Holstein. Les vêlages sont étalés tout au long de l'année ce qui permet d'avoir un niveau d'étable stable. Une partie de la production laitière est transformée sur place, le reste étant collecté par la laiterie de Saint-Denis-de-l'Hôtel et par la laiterie de Grignon.

L'élevage est adhérent au contrôle laitier, ce qui permet d'avoir un suivi qualitatif et quantitatif de la production laitière et ce depuis 2015.

Le troupeau est un troupeau expérimental, notamment au niveau alimentaire car des rations sont testées régulièrement, ce qui implique des changements alimentaires réguliers. De plus, les vaches ne sortent pas en pâturage.

Dans le troupeau, les vaches sont considérées comme étant haute-productrices, c'est-à-dire que leur production est supérieure à 7 000 kg de lait par an et par vache. Dans les troupeaux, les vaches produisent en moyenne 30 kg de lait par jour soit presque 11 000 kg de lait par an et par vache en moyenne.

B. Données nécessaires pour l'étude

1. Contrôle laitier

L'élevage est adhérent au contrôle laitier, ce qui permet *via* le site internet de gestion d'élevage ICownect, qui est relié au contrôle laitier, d'avoir accès aux données de production depuis mars 2015. Ainsi, le contrôle laitier permet d'avoir la quantité de lait produite sur une journée, donc deux

traites, individuellement et collectivement. Nous avons également eu accès aux taux butyreux⁸ (TB), taux protéique⁹ (TP), taux de matières utiles¹⁰ (MU) et le taux de cellules du lait, marqueur de la qualité du lait. Ces données sont des moyennes du troupeau, classées pour chaque marqueur en deux catégories : primipares et multipares. La Figure 4 est un exemple de contrôle laitier disponible sur le site internet.

Le contrôle laitier nous a également permis de connaître à partir de janvier 2019 le mois moyen et le jour moyen de lactation du troupeau lors du contrôle.

Figure 4 : Présentation des données du contrôle laitier collectif *via* le site internet ICownect.

	05/01/2021	29/11/2020	Var (%)
Production moy. (kg brut)			
Troupeau	33,0	33,1	-0,3 %
Primipares	28,6	29,6	-3,4 %
Multipares	35,9	35,1	2,3 %
TB moy.			
Troupeau	40,4	40,2	0,5 %
Primipares	39,6	40,0	-1,0 %
Multipares	40,9	40,4	1,2 %
TP moy.			
Troupeau	33,5	34,3	-2,3 %
Primipares	33,9	34,8	-2,6 %
Multipares	33,3	34,0	-2,1 %
Matière Utile moy. / VL (kg)			
Troupeau	2,4	2,4	0,0 %
Primipares	2,1	2,2	-2,7 %
Multipares	2,6	2,6	2,0 %
Cellules moy. / VL			
Troupeau	327,0	244,0	34,0 %
Primipares	304,0	131,0	132,1 %
Multipares	337,0	299,0	12,7 %

	05/01/2021	29/11/2020	Var (%)
Vaches présentes			
Troupeau	198	198	0,0 %
Vaches traites (primipares)	68	62	10 %
Vaches traites (multipares)	102	105	-3 %
Vaches non contrôlées	9	6	50 %
Vaches absentes			
Troupeau	19	25	-24 %
Vaches à l'engraissement	0	0	
Statistiques			
Mois moyen de lactation	5,1	5,3	-4 %
Jours moyen de lactation	171,0	176,0	-3 %

Le contrôle laitier est également disponible au niveau individuel, ce qui peut nous permettre d'analyser lors d'un contrôle laitier, les différences entre les animaux du troupeau, notamment au niveau de la production laitière, du TB, du TP ou encore au niveau du jour moyen de lactation ou de la parité, comme le montre la Figure 5.

⁸ Taux butyreux : taux de matières grasses du lait en g/kg de lait

⁹ Taux protéique : taux de matières protéiques (protéines et acides aminés libres) du lait en g/kg de lait

¹⁰ Matières utiles : somme des matières grasses et protéiques, utiles à la transformation du lait en kg.

Figure 5 : Présentation des données du contrôle laitier individuel *via* le site internet ICownect.

Détail du contrôle du 23/08/2016

56 vaches contrôlées

N°Ctr	Lait	TP	TB	Cellule	Urée	Animal ↑	N° Lact	Jours	Lait Brut Cumulé	TP moyen	TB moyen
9	25,1	33,6	43,5	205	189	0674	4	373	15 596	30,4	35,4
1	45,8	25,3	32,4	94	184	0683	4	480	3 069	25,3	32,4
1	47,2	24,6	37,9	22	135	0705	4	41	1 935	24,6	37,9
7	25,6	33,7	41,7	103	224	0728	3	314	11 826	29,7	37,9
6	34,1	33,8	42,5	47	214	0754	3	248	12 044	30,1	30,7
6	31,6	29,0	37,9	105	214	0755	3	256	11 542	27,7	34,6
5	24,6	31,6	46,6	171	240	0763	3	201	8 217	31,1	41,1
6	26,2	32,5	40,0	327	187	0813	3	242	8 384	31,4	36,9
6	24,3	34,2	43,1	140	190	0831	3	329	11 114	30,9	32,5
4	33,4	28,3	36,7	136	201	0861	3	173	7 002	27,2	38,0
5	22,9	31,1	35,1	122	166	0863	3	268	6 973	31,8	34,7
1	38,0	27,9	39,1	329	186	1001	3	26	988	27,9	39,1
7	23,1	35,3	55,0	263	186	1004	2	307	10 754	32,2	44,1
1	32,2	32,5	29,1	55	168	1015	3	8	258	32,5	29,1
4	38,7	32,8	34,5	232	171	1029	2	173	8 085	30,6	35,0
5	30,4	28,5	34,6	538	161	1054	2	283	8 528	28,4	33,4
8	29,6	31,8	40,8	61	155	1056	2	322	12 721	28,8	35,5
7	28,9	32,1	37,8	44	222	1077	2	293	11 862	30,4	33,9
2	34,6	29,5	28,1	16	150	1105	2	72	2 291	29,3	29,7
6	28,6	33,3	48,3	24	179	1110	2	253	9 965	32,7	41,2
7	24,2	34,7	42,0	161	192	1128	1	281	8 837	30,1	35,7
1	36,0	27,7	39,8	26	176	1137	2	46	1 656	27,7	39,8
3	34,5	29,6	40,5	24	224	1152	2	138	5 805	31,5	41,9
1	36,1	26,5	29,5	53	157	1175	2	465	1 877	26,5	29,5
1	33,4	25,9	28,9	55	168	1180	2	31	1 035	25,9	28,9

2. Données météorologiques

Les données météorologiques ont été collectées à proximité de l'élevage depuis 1998. Elles recueillent sous format Excel les températures (minimales, moyennes, maximales) ainsi que l'humidité (minimale, moyenne et maximale), le point de rosée, la hauteur des précipitations, la vitesse du vent (minimale et maximale), ces données sont visibles pour exemple sur la Figure 6. Ce qui nous a permis, à partir de ces données, de calculer un ITH moyen et maximal, à l'aide de la formule suivante (Kendall *et al.*, 2006) :

$$ITH = (1,8T + 32) - ((0,55 - 0,0055H) \times (1,8T - 26))$$

Où T = Température ; H = Hygrométrie

Figure 6 : Présentation des données brutes météorologiques

Date	T°C moy	T°C max	T°C min	%H2O moy	%H2O max	%H2O min	T°C point de rosé	Précipitations (mm)	V moy vent (m/s)	V max vent (m/s)	ITH moyen	ITH max
03/03/2015	5,3	10,7	2,9	82	92	73	2,4	2	3,7	12	43	
15/04/2015	18,4	25,5	10,9	51	74	26	7,2	0	1,6	6	63	75
26/05/2015	13,5	18	10,2	72	89	53	8,3	0	1,7	6	57	64
07/07/2015	20,1	26,4	14,7	70	97	41	14	1	2,7	13	67	79
07/09/2015	13,3	19,9	6,2	79	99	52	9,6	0	2	6	56	68
21/10/2015	8,7	12,7	3,9	96	100	77	8,1	3	1,9	6	48	55
01/12/2015	11,6	12,8	10,8	73	79	57	6,8	0	4,1	10	54	55
11/01/2016	6,9	8,4	4,3	83	96	71	4,1	0,5	5,6	13	46	47
15/02/2016	3,1	6,3	1,3	80	92	52	-0,1	0	4,4	13	40	44
29/03/2016	9,1	13,3	5	82	100	50	5,9	2,5	4,2	10	49	56
09/05/2016	17,1	20,1	14,7	76	100	59	12,7	5,5	3,3	10	62	68
20/06/2016	15,6	17	14,1	99	100	90	15,5	13,5	3,4	12	60	63
23/08/2016	24,5	32,3	15,8	54	83	31	13,7	0	2,5	8	72	87
03/10/2016	11	18,4	2,4	72	100	35	5,4	0,5	1,1	6	53	65
21/11/2016	12,1	15,4	11	84	100	64	9,2	1	5,2	20	54	60

3. Exploitation des données

a) Étude de l'impact du stress thermique sur la production laitière

Dans un premier temps, nous avons regroupé les données des 55 contrôles laitiers disponibles entre janvier 2015 et octobre 2021 avec les données météorologiques de ces jours en particulier.

Ensuite nous avons classé ces contrôles laitiers en deux catégories : (1) les contrôles laitiers ayant eu lieu à un jour où l'ITH était supérieur à 68 ou le lendemain d'un jour où l'ITH était supérieur à 68, ce qui est la limite pour considérer des vaches laitières hautes productrices en stress thermique. Le stress thermique pouvant impacter la production laitière jusqu'à 17 heures suivant un épisode de stress thermique, c'est pour cela qu'une fenêtre de 24 heures est laissée. (2) les contrôles laitiers n'ayant pas eu lieu lors d'un stress thermique donc sous un ITH inférieur à 68.

Ainsi, 16 contrôles laitiers ont été inclus dans la première catégorie (exposé à un stress thermique) et les 39 autres ont été inclus dans la deuxième catégorie (non exposé à un stress thermique). Au sein de la première catégorie, un code couleur a été appliqué en fonction du degré de stress thermique : jaune pour un stress thermique léger ($68 < \text{ITH} < 79$), orange pour un stress thermique modéré ($80 < \text{ITH} < 84$), rouge pour un stress thermique sévère ($\text{ITH} > 84$).

(1) En quantité

Pour voir s'il existait une différence significative entre la quantité de lait produite lors d'un épisode de stress thermique et lorsque les vaches ne sont pas exposées à un stress thermique, nous avons utilisé le test de Mann-Whitney, qui nous a permis de comparer les médianes des deux groupes. L'hypothèse nulle H_0 étant : chez les vaches laitières hautes productrices, la médiane de la production laitière journalière parmi les vaches ayant été exposées à un épisode de stress thermique est égale à la médiane de la production laitière journalière parmi les vaches n'ayant pas été exposées à un épisode de stress thermique.

Le seuil de significativité a été fixé à 0,05 pour tous les tests statistiques réalisés.

(2) En qualité

De façon similaire, nous avons utilisé le test de Mann-Whitney pour comparer le TB, le TP et le taux de cellules de vaches exposées à un stress thermique par comparaison à des vaches qui ne le sont pas. L'hypothèse nulle H_0 étant : chez les vaches laitières hautes productrices, la médiane du TB (ou de TP ou du taux de cellules) journalier parmi les vaches ayant été exposées à un épisode stress thermique est égale à la médiane du TB (ou de TP ou du taux de cellules) journalier parmi les vaches n'ayant pas été exposées à un épisode de stress thermique.

Le seuil de significativité a été fixé à 0,05 pour tous les tests statistiques réalisés.

b) Étude de l'impact d'un épisode de stress thermique de forte intensité comparé aux mois similaires

Pour vérifier l'impact d'un épisode de stress thermique de forte intensité, avec un $\text{ITH} > 84$, sur la production laitière, nous avons comparé les trois plus gros épisodes de stress thermique de l'étude soit le 23 août 2016, 19 juin 2017 et 27 juillet 2020. Ces trois épisodes ont été respectivement comparés aux données moyennes des mois d'août, juin et juillet de l'étude, afin de rechercher une différence significative entre un épisode de stress thermique de forte intensité et les mois semblables où la température est en général assez élevée comparé au reste de l'année.

c) Étude à l'échelle individuelle d'un épisode de stress thermique

Pour étudier l'impact d'un épisode de stress thermique à un niveau plus individuel, nous avons comparé les productions moyennes des 25 % plus hautes productrices, des 50 % moyennes et des 25 % plus basses productrices du contrôle laitier avec l'ITH le plus élevé, c'est-à-dire le 19 juin 2017

avec un ITH maximal de 89, aux productions de ces mêmes catégories lors des contrôles des autres mois de juin de l'étude, c'est-à-dire les 20 juin 2016, 11 juin 2019, 8 juin 2020, et 28 juin 2021.

d) *Étude de la comparabilité des données du contrôle laitier*

(1) Mois et jour moyen de lactation

Nous avons souhaité regarder le mois moyen et le jour moyen de lactation au cours de l'étude, pour s'assurer qu'il soit stable et n'influe pas nos résultats. En effet, le pic de lactation ayant lieu entre le 30^e et le 40^e jour de lactation en moyenne, il pourrait modifier la production laitière si le mois moyen de lactation du troupeau se trouve proche du pic de lactation, et ainsi biaiser nos résultats.

III. Résultats

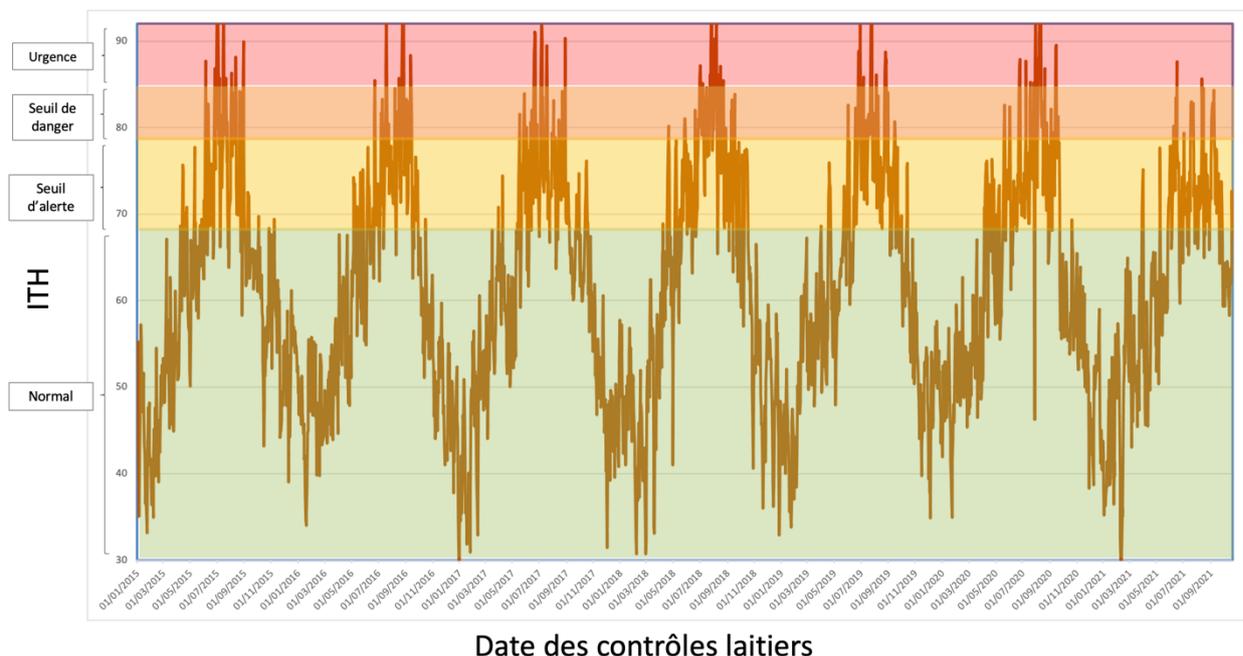
A. Présentation de l'échantillon

L'échantillon étudié regroupe 55 valeurs, correspondant aux 55 contrôles laitiers ayant eu lieu entre le 1^{er} janvier 2015 et le 20 octobre 2021, soit sur une période de presque sept ans. Nous avons calculé les moyennes et les écarts types pour chaque catégorie à savoir : les vaches exposées à un stress thermique et celles ne l'étant pas, avec à chaque fois une sous-catégorie avec les primipares et les multipares. Les moyennes obtenues sont présentées dans le Tableau 2. La Figure 7 quant à elle expose l'évolution de l'ITH tout au long de la durée de l'étude.

Tableau 2 : Données expérimentales issues des contrôles laitier à l'échelle du troupeau (TB : taux butyreux, TP : taux protéique)

		Production laitière journalière en kg		TB journalier en g/kg		TP journalier en g/kg		Cellules en 10 ³ /ml	
		Moyenne (écart-type)		Moyenne (écart-type)		Moyenne (écart-type)		Moyenne (écart-type)	
Vaches exposées à un stress thermique	Primipares	29,81 (3,56)	27,01 (2,10)	38,38 (1,33)	38,13 (1,33)	31,22 (1,11)	31,45 (1,12)	206 (114)	176 (81)
	Multipares		32,61 (2,24)		38,64 (1,44)		30,99 (1,08)		236 (136)
Vaches non exposées à un stress thermique	Primipares	31,64 (4,07)	28,13 (1,46)	39,13 (2,45)	38,96 (2,42)	32,60 (1,12)	32,85 (1,18)	240 (149)	205 (98)
	Multipares		35,14 (2,48)		39,3 (2,50)		32,36 (1,00)		275 (181)

Figure 7 : Valeurs d'Indice de Température et d'Humidité (ITH) tout au long de la durée de l'étude, du 1^{er} janvier 2015 au 20 octobre 2021



Les Figure 8 et Figure 9 reflètent le mois moyen et le jour moyen au cours de l'étude, ou en fonction des mois de l'année. Les deux graphiques montrent un mois moyen stable à 5,5 mois de lactation en moyenne et un jour de lactation moyen à 182 jours. Ainsi, il n'y a pas de mois de l'année où le jour moyen de lactation est proche du pic de production laitière, qui correspond en général au 40^e jour de lactation.

Figure 8 : Mois et jour moyen de lactation au cours de l'étude

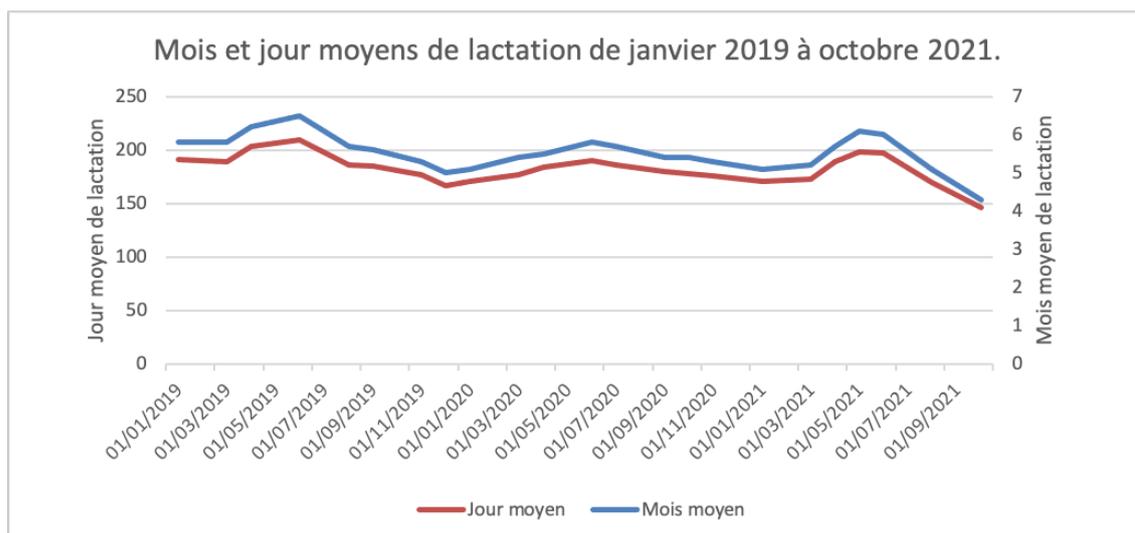
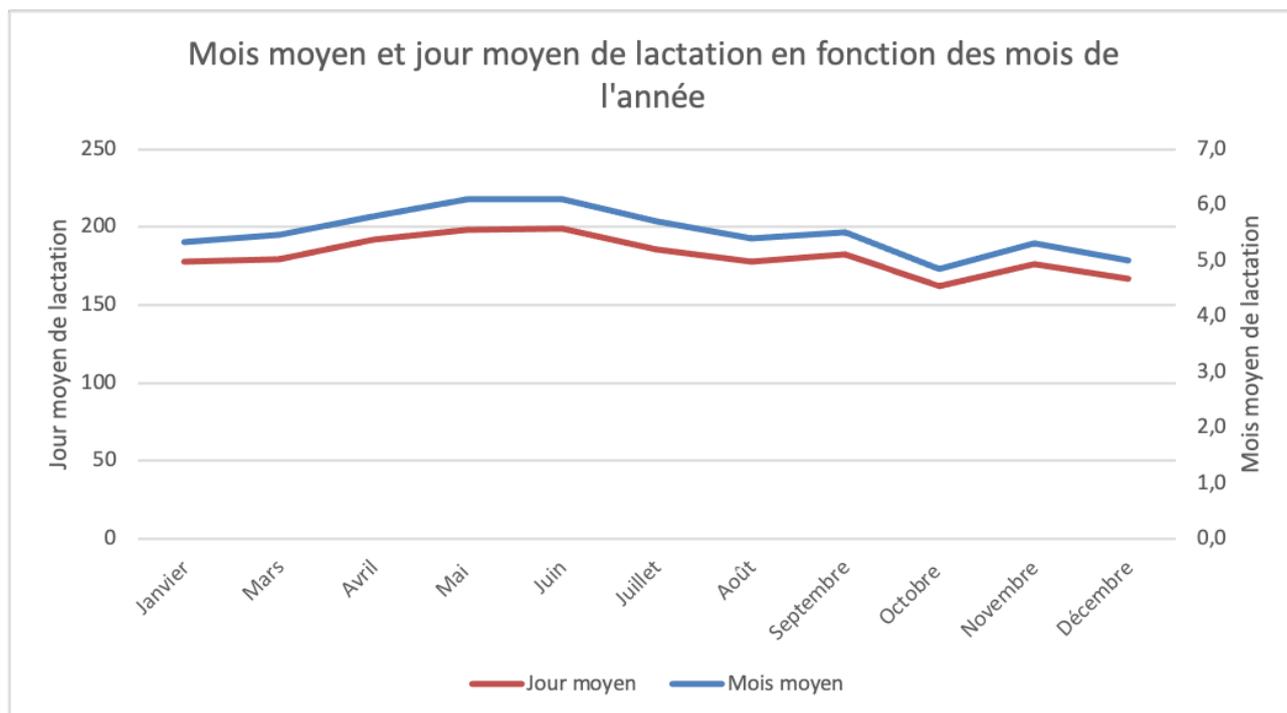


Figure 9 : Mois et jour moyen de lactation en fonction des mois de l'année

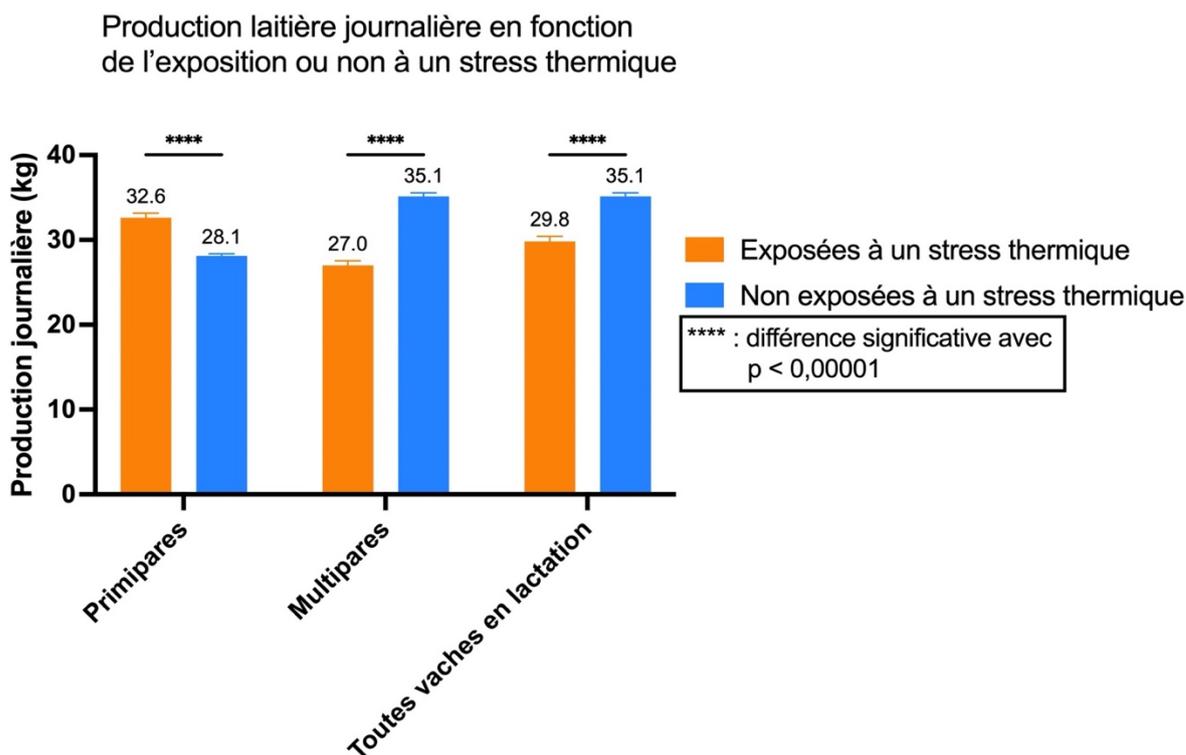


B. Étude de l'impact du stress thermique sur la production laitière

1. Sur la quantité de lait produite

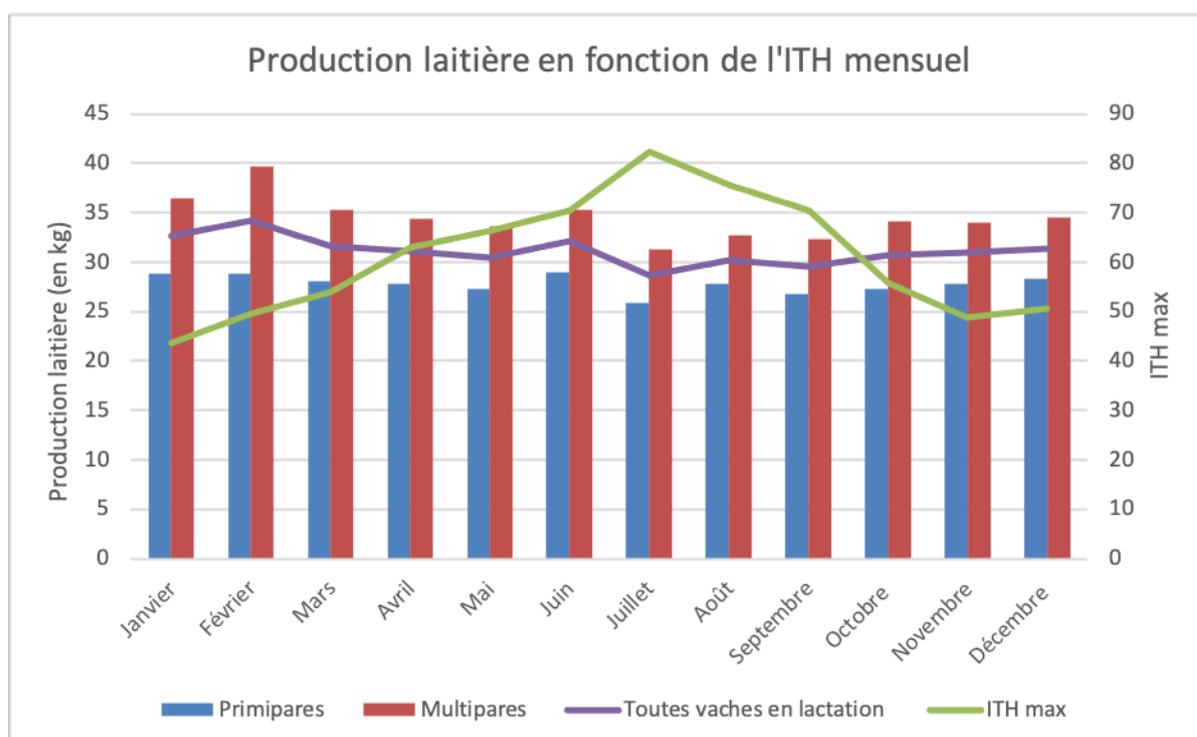
La Figure 10 expose la différence de production laitière en fonction des catégories d'animaux (primipares, multipares ou toutes les vaches en lactation confondues) et de leur exposition ou non à un stress thermique. On observe pour les trois catégories d'animaux une différence significative de production laitière. Lors de stress thermique, la production laitière des vaches primipares est diminuée de 1,2 L comparé à la médiane des primipares non exposées à un stress thermique. Pour les multipares, on constate également une diminution significative de 2 L en cas d'exposition à un stress thermique. Lorsque les deux catégories d'animaux sont confondues, nous observons également une différence significative de 0,4 L de lait produit en moins lors de stress thermique.

Figure 10 : Comparaison de la production laitière en kg par jour en fonction de l'exposition à un stress thermique et de la catégorie d'animaux



La Figure 11 illustre la production laitière en fonction des différents mois de l'année lors de notre étude. On constate que lors des mois d'été et notamment en juillet, la production laitière est plus basse que le reste de l'année alors que l'ITH est plus haut à cette même période.

Figure 11 : Production laitière en kg en fonction de l'Indice de Température et d'Humidité (ITH) maximal mensuel



2. Sur la qualité du lait produit

a) Sur le TB

Au niveau du TB, la différence entre les vaches exposées à un stress thermique et celles qui ne le sont pas n'est pas significative (Figure 12). Cependant, on observe tout de même une tendance, avec des TB plus bas lors de stress thermique que lors de conditions climatiques plus clémentes (Figure 13).

Figure 12 : Comparaison du taux butyreux en g/kg par jour en fonction de l'exposition à un stress thermique et de la catégorie d'animaux

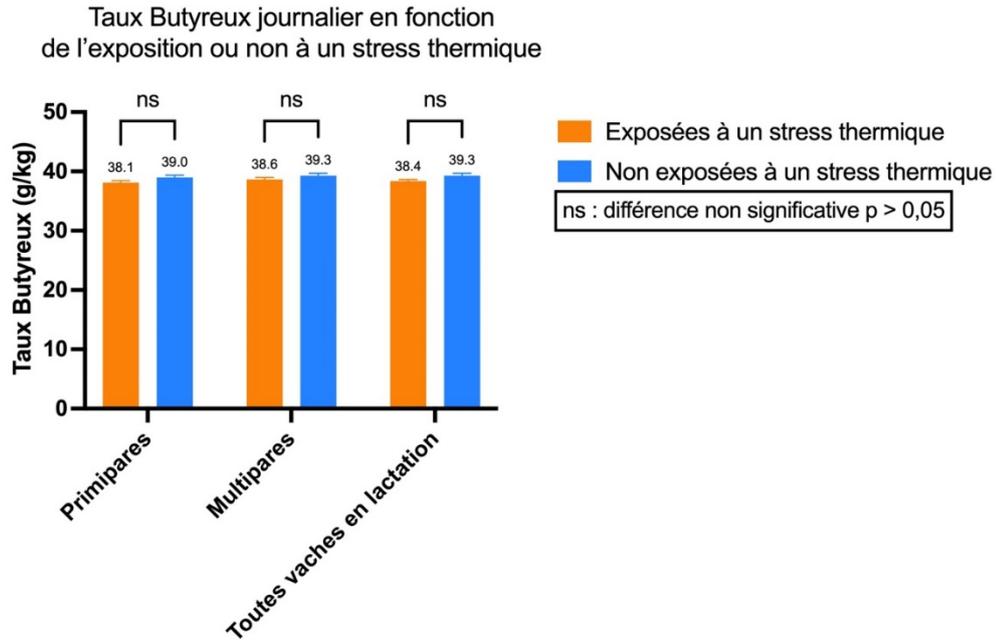
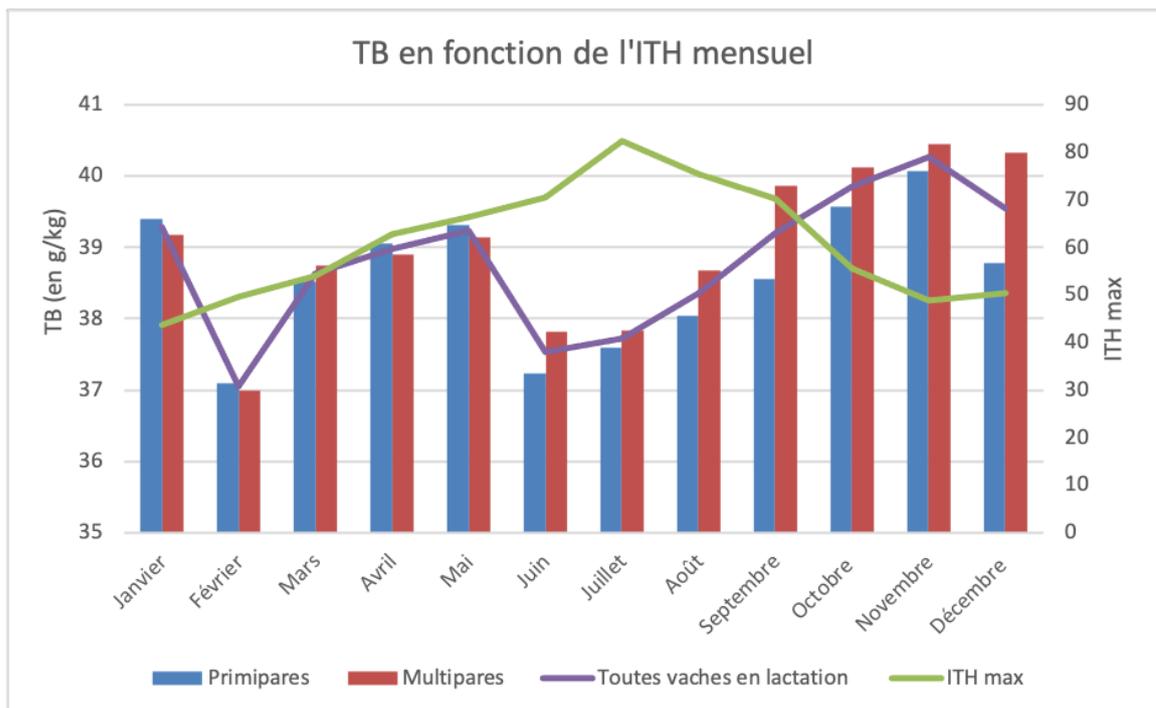


Figure 13 : Taux Butyreux (TB) en g/kg en fonction de l'Indice de Température et d'Humidité (ITH) mensuel



b) Sur le TP

En revanche, pour le TP, la différence observée est significative pour les trois catégories d'animaux (Figure 14) lors de stress thermique, on observe une diminution de 1 g/kg de TP pour les primipares, 1,4 g/kg pour les multipares et une diminution de 1,35 g/kg lors que les deux catégories de vaches en production sont confondues.

La Figure 15 reflète la différence significative observée sur la Figure 14 : en effet, une diminution du TP est observée lors des mois d'été, quand l'ITH est le plus haut.

Figure 14 : Comparaison du taux protéique en g/kg par jour en fonction de l'exposition à un stress thermique et de la catégorie d'animaux

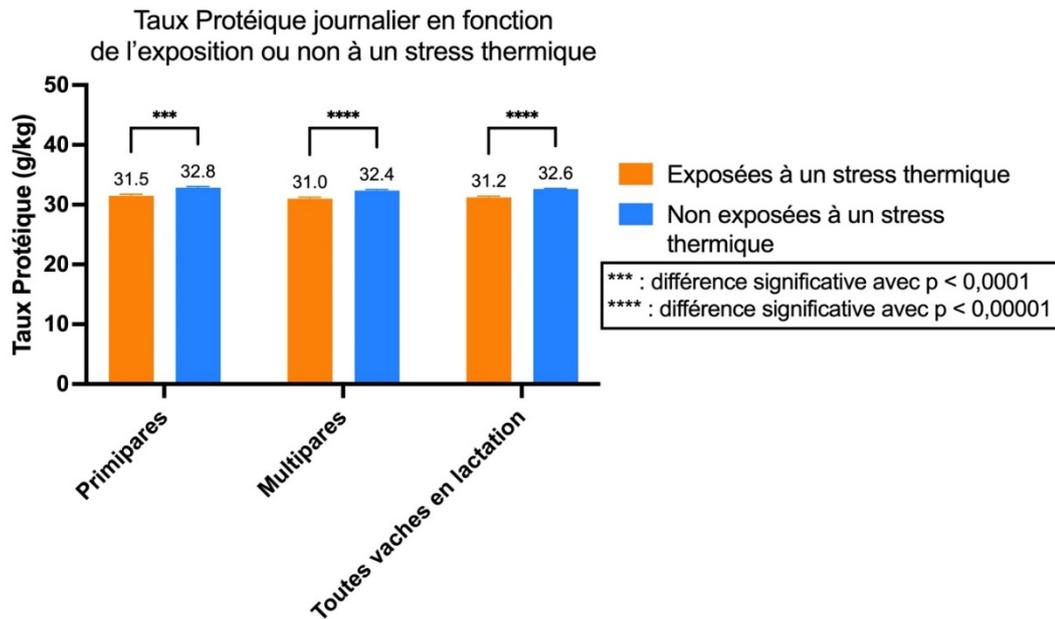
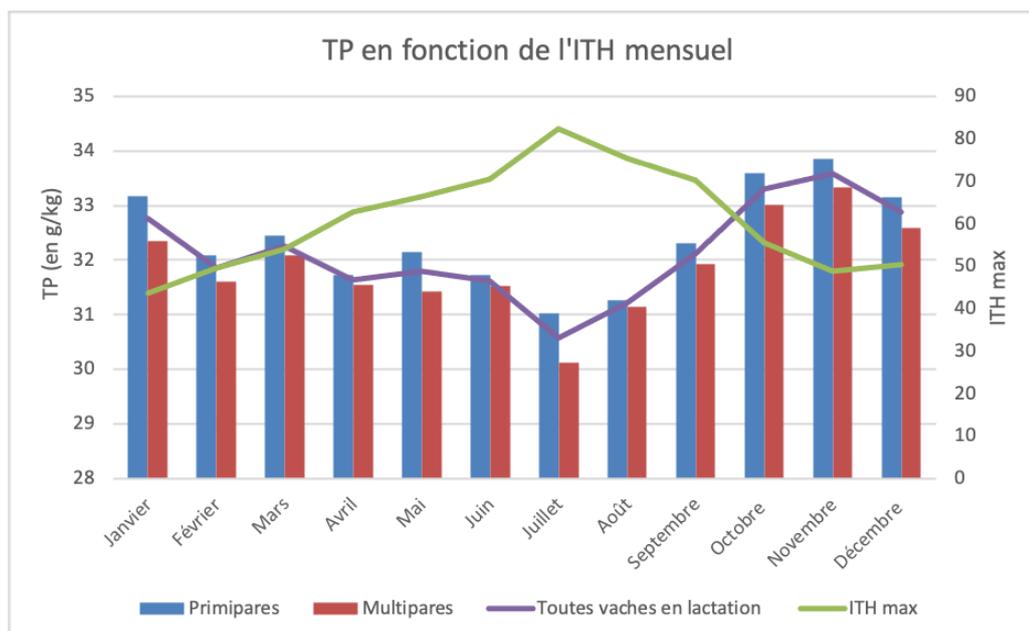


Figure 15 : Taux Protéique (TP) en g/kg en fonction de l'Indice de Température et d'Humidité (ITH) mensuel



c) Sur le taux cellulaire

Quant au taux de cellules contenues dans le lait, la différence entre les animaux exposés à un stress thermique et ceux qui ne le sont pas n'est pas significative. On observe cependant une tendance avec des taux cellulaires plus faibles lors de stress thermique que lors de conditions climatiques plus clémentes (Figure 16).

Figure 16 : Comparaison du taux cellulaire en $10^3/\text{kg}$ journalier en fonction de l'exposition à un stress thermique et de la catégorie d'animaux

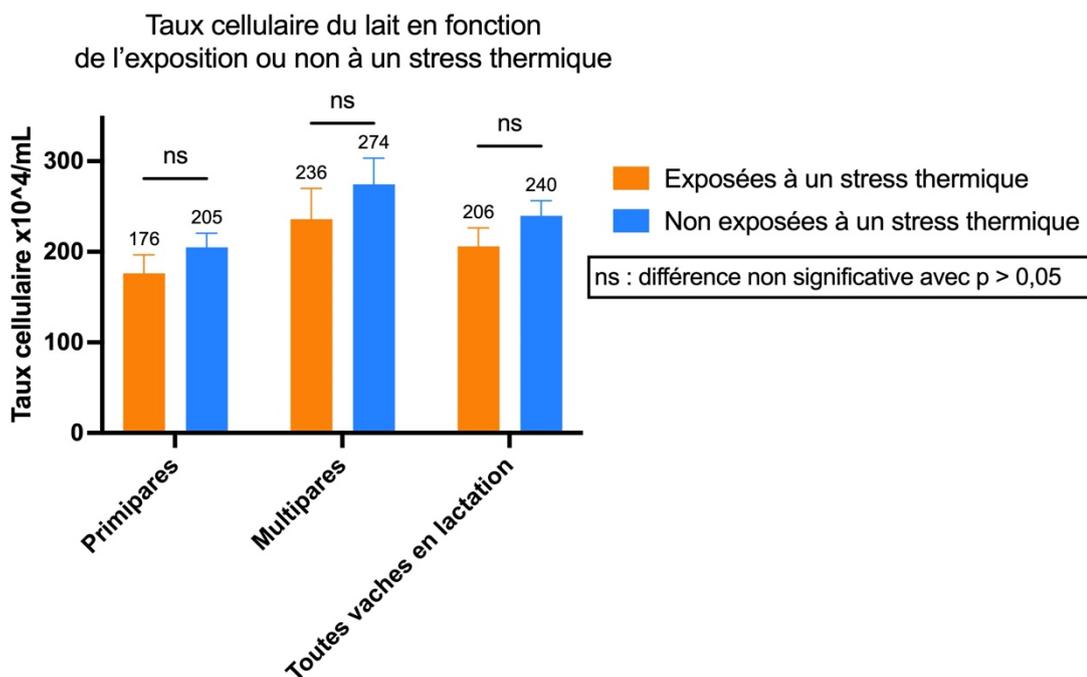
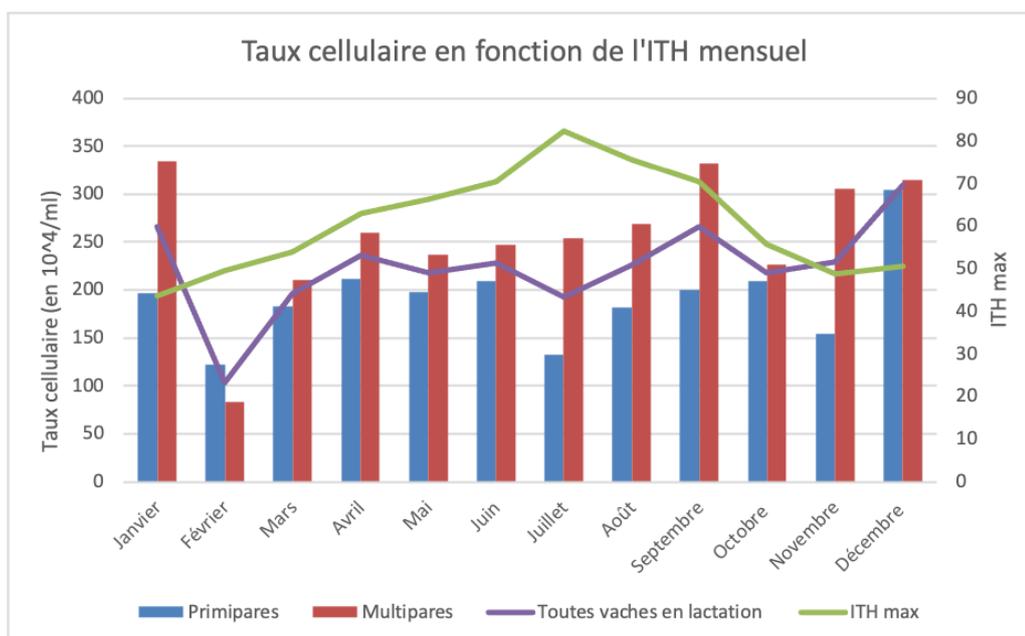


Figure 17 : Taux cellulaire du lait (en $\times 10^4/\text{ml}$) en fonction de l'Indice de Température et d'Humidité (ITH) mensuel



On n'observe sur la Figure 17 aucune tendance par rapport au taux cellulaire du lait. L'ITH ne semble pas influencer le taux cellulaire.

3. Étude de l'impact d'un épisode de stress thermique de forte intensité comparé aux valeurs des mois similaires

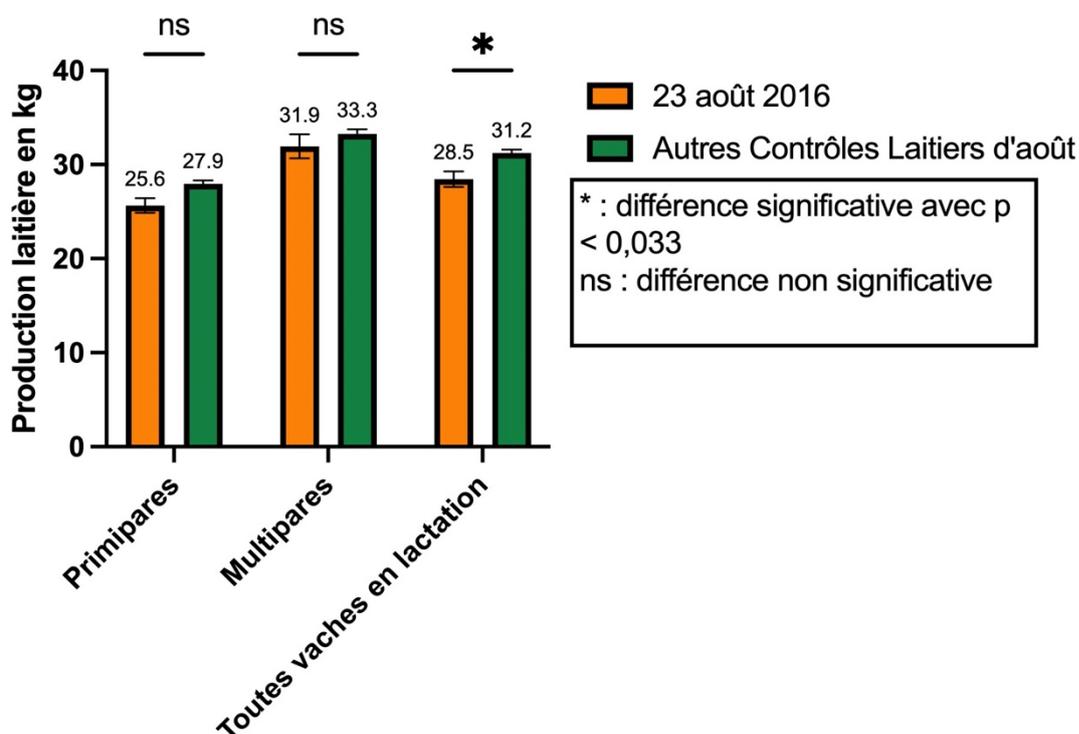
a) Épisode du 23 août 2016

Lors de ce contrôle laitier, les vaches subissaient un stress thermique léger depuis plus d'un mois déjà, cependant, ce contrôle a eu lieu lors d'un pic de chaleur avec un ITH maximal de 87, qui signe un stress thermique modéré à sévère. Cet épisode a été comparé aux autres contrôles laitiers des mois d'août de l'étude à savoir le 21 août 2017, le 13 août 2019 et le 30 août 2021. Les résultats de la comparaison sont présentés dans la Figure 18. Ainsi, on observe une différence significative pour toutes les vaches en lactation.

Les deux groupes sont comparables d'un point de vue jour moyen de lactation : en effet, lors de l'épisode du 23 août 2016, le jour moyen de lactation du troupeau est de 216 jours, contre 189 jours en moyenne sur les autres mois d'août. Au niveau de la parité, les deux groupes sont également comparables : la parité moyenne du 23 août 2016 est de 1,7 contre 2 pour l'ensemble des autres contrôles des mois d'août de l'étude.

Figure 18 : Comparaison de l'épisode de stress thermique du 23 août 2016 avec les contrôles laitiers des mois d'août de l'étude.

Comparaison d'un épisode de stress thermique important au mois d'août avec d'autres contrôles laitiers du mois d'août



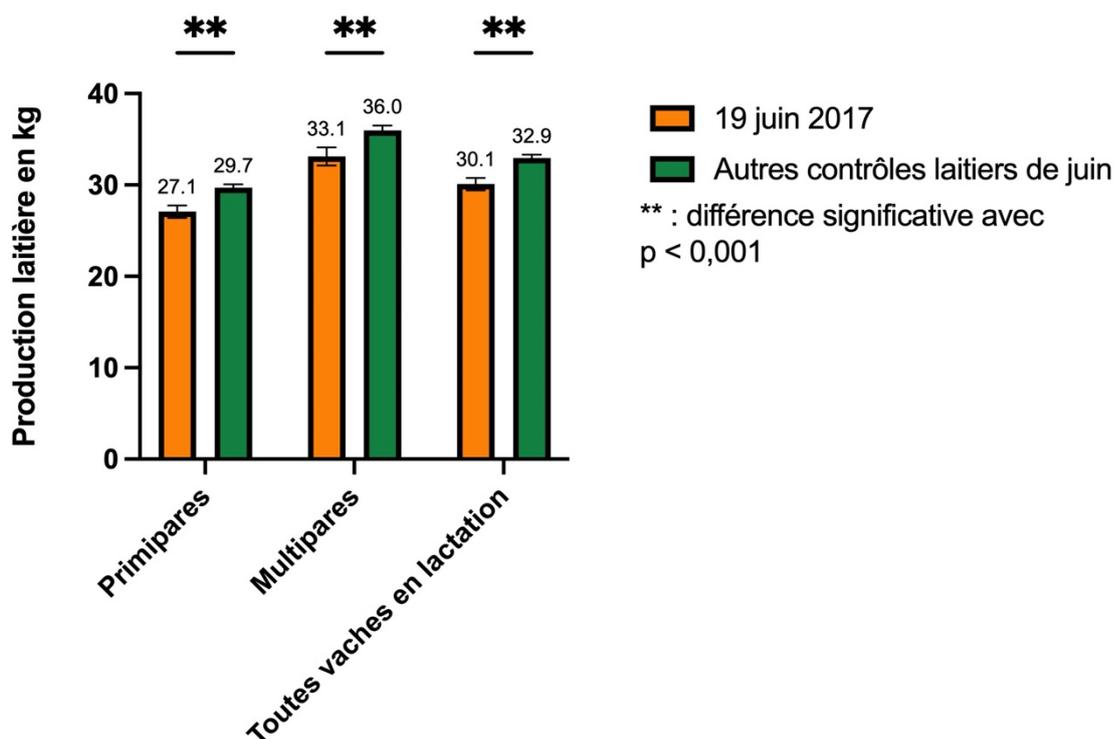
b) Épisode du 19 juin 2017

Cet épisode de stress thermique modéré à sévère, avec un ITH maximal de 89, a eu lieu après un épisode de stress thermique léger à modéré d'une semaine. Cet épisode a été comparé aux contrôles des mois de juin de l'étude, c'est-à-dire ceux du 20 juin 2016, du 11 juin 2019, du 8 juin 2020 et du 28 juin 2021. Les résultats sont présentés dans la Figure 19. On constate une production significativement plus basse lors de l'épisode de stress thermique du 19 juin 2017 comparé aux autres mois de juin, à la fois pour les primipares mais aussi pour les multipares.

Les deux groupes sont comparables d'un point de vue jour moyen de lactation : en effet, lors de l'épisode du 19 juin 2017, le jour moyen de lactation du troupeau est de 251 jours, contre 201 jours en moyenne sur les autres mois de juin. Au niveau de la parité, les deux groupes sont également comparables : la parité moyenne du 19 juin 2017 est de 1,8 contre 2,1 pour l'ensemble des autres contrôles des mois de juin de l'étude.

Figure 19 : Comparaison de l'épisode de stress thermique du 19 juin 2017 avec les contrôles laitiers des mois de juin de l'étude.

Comparaison d'un épisode de stress thermique important au mois de juin avec d'autres contrôles laitiers du mois de juin



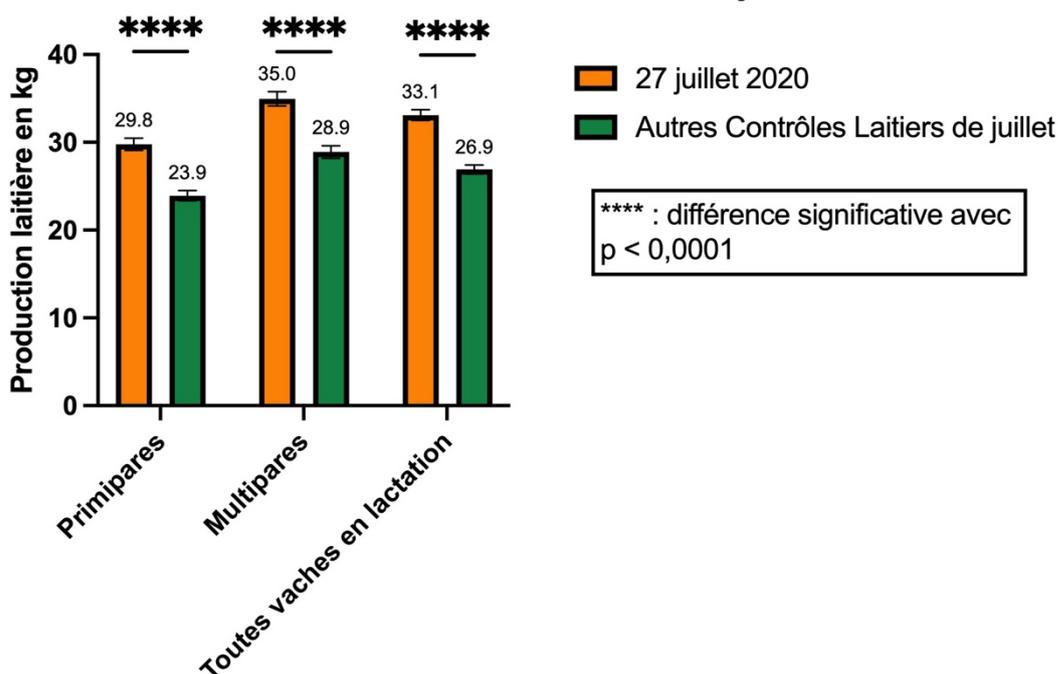
c) Épisode du 27 juillet 2020

Cet épisode de stress thermique modéré à sévère, avec un ITH maximal de 85 a eu lieu après un épisode de stress thermique modéré de 10 jours. Cet épisode a été comparé avec les contrôles du mois de juillet de l'étude, c'est-à-dire celui du 7 juillet 2015 et du 16 juillet 2018. Les résultats sont présentés dans la Figure 20. Cette comparaison des mois de juillet, contrairement aux mois de juin, montre une production significativement plus importante lors de l'épisode de stress thermique intense que lors des autres mois de juillet.

Les deux groupes sont comparables d'un point de vue jour moyen de lactation : en effet, lors de l'épisode du 27 juillet 2020, le jour moyen de lactation du troupeau est de 187 jours, contre 240 jours en moyenne sur les autres mois de juillet. Au niveau de la parité, les deux groupes sont également comparables : la parité moyenne du 27 juillet 2020 est de 2,3 contre 2,1 pour l'ensemble des autres contrôles des mois de juillet de l'étude.

Figure 20 : Comparaison de l'épisode de stress thermique du 27 juillet 2020 avec les contrôles laitiers des mois de juillet de l'étude.

Comparaison d'un épisode de stress thermique important au mois de juillet avec d'autres contrôles laitiers du mois de juillet



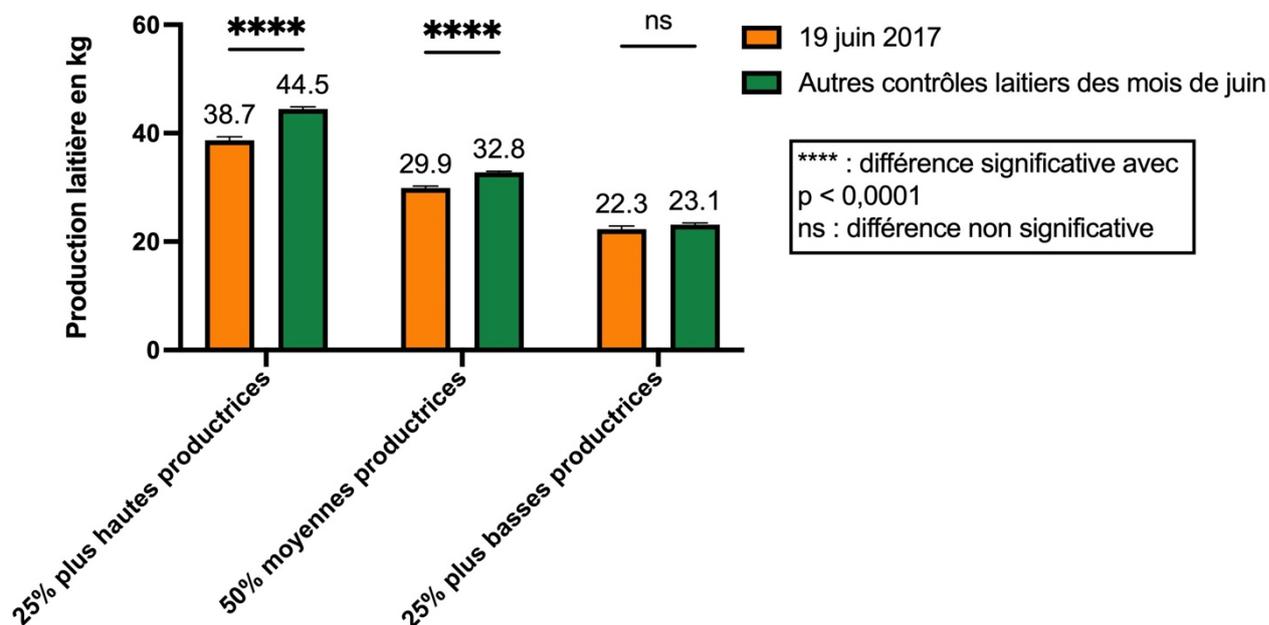
Ainsi, les résultats divergent et ne nous permettent pas de conclure sur l'impact d'un stress thermique plus important comparé aux mêmes mois de l'année.

4. Étude d'un épisode de stress thermique par classes de production laitière

L'épisode de stress thermique le plus sévère de notre étude a eu lieu le 19 juin 2017, avec un ITH maximal de 89. La Figure 21 nous permet de constater que lors d'un épisode de stress thermique sévère, les hautes productrices et les moyennes productrices du troupeau ont une production laitière significativement plus basse que lors d'un contrôle laitier d'un mois comparable. En effet, les hautes productrices produisent 5,8 L de lait de moins lors d'un stress thermique intense et les moyennes productrices en produisent 2,9 L de moins. En revanche, pour les plus basses productrices du troupeau, cette différence n'est pas significative.

Figure 21 : Comparaison par niveau de production de la production laitière lors d'un épisode de stress thermique sévère comparé aux autres contrôles laitiers des mois de juin.

**Comparaison par niveau de production de la production laitière
lors d'un épisode de stress thermique sévère
comparé aux autres contrôles laitiers des mois de juin**



IV. Discussion

A. Biais rencontrés lors de l'étude

1. Les animaux

Les vaches étudiées ici sont considérées comme étant hautes productrices, effet, leur production moyenne est de 11 000 kg de lait par an, contre une moyenne française de 8 707 kg en 2021 d'après l'institut de l'élevage IDELE. L'élevage étudié a donc une production laitière bien supérieure à la moyenne nationale. Ainsi, comme décrit dans la littérature, ces vaches sont plus sensibles au stress thermique (Zimbelman *et al.*, 2009). Ainsi, notre étude ne peut pas être étendue à l'ensemble des vaches laitières, mais plutôt aux vaches laitières hautes productrices.

Les vaches de l'étude sont des vaches d'expérimentation pour la ferme d'AgroParisTech, de ce fait, à des fins de recherche, leur alimentation est modifiée à une fréquence irrégulière (allant de quelques semaines à plusieurs mois). Des lots sont formés aléatoirement, indépendant du rang de lactation et du niveau de production et chaque lot reçoit une ration différente. Cependant, une base de la composition de la ration reste stable, avec de l'ensilage de luzerne, de l'ensilage de maïs et du tourteau de colza. Les proportions et la qualité de ces fourrages et concentrés varient ainsi que les compléments minéraux et vitamines. Or, l'alimentation et notamment le niveau d'ingestion est directement lié à la production laitière, surtout lors de stress thermique (Kadzere *et al.*, 2002 ; West

et al., 2003). De ce fait, une alimentation qui n'a pas été stable pendant l'étude est un biais majeur de réalisation de l'étude.

Pour faciliter l'étude, les vaches entre deux contrôles laitiers ont été considérées comme indépendantes. Cependant, ce n'est pas systématiquement le cas : une vache a pu assister à plusieurs contrôles laitiers successifs lors de l'étude. Ainsi, on peut se demander si des épisodes de stress thermique successifs peuvent être délétères pour l'animal, et s'ils peuvent avoir un impact négatif sur la production à long terme.

2. Le bâtiment

Les vaches de l'étude sont réparties dans plusieurs zones différentes du bâtiment : une aire paillée et plusieurs zones avec des logettes. Un ventilateur a été installé dans la partie logette depuis juin 2019. Cependant, à des fins expérimentales, les lots de vaches changent régulièrement et il ne nous était pas possible pour l'étude de vérifier l'efficacité ou non de la mise en place des ventilateurs au sein du bâtiment.

De plus, les vaches ne sortent pas durant leur lactation, mais elles peuvent sortir au moment du tarissement si les conditions climatiques le permettent. Nous n'avons pas ces données, de ce fait, nous ne pouvons pas étudier l'effet d'un potentiel épisode de stress thermique lors du tarissement sur la production laitière suivante par exemple.

3. Les données météorologiques

Les données météorologiques utilisées lors de cette étude proviennent d'une station météorologique située à 500 mètres du bâtiment. Ainsi, il en découle plusieurs biais : la température et l'humidité au niveau de la station ne sont pas forcément similaires aux conditions rencontrées par les vaches dans le bâtiment. De plus, nous ne savons pas comment est orienté le capteur comparé au bâtiment : est-il au soleil toute la journée ? Est-il exposé au vent ? En effet, toutes ces indications peuvent modifier l'ITH selon l'équation utilisée.

Le fichier de relevé des données météorologiques a donné accès aux températures minimales, moyennes et maximales, ainsi qu'à l'hygrométrie minimale, moyenne et maximale enregistrées par la station météorologique. Cependant, nous ne savons pas si la température maximale concorde avec l'hygrométrie maximale. Ainsi, nous sommes partis du principe que les deux paramètres avaient lieu au même moment pour le calcul d'ITH, ce qui a pu biaiser les résultats en surestimant l'ITH. De plus, l'équation utilisée est celle de Kendall (Kendall *et al.*, 2006), mais d'autres équations existent et auraient pu modifier les valeurs d'ITH et par conséquent les périodes déterminées comme étant un stress thermique lors de cette étude.

Notre étude, avec les moyens utilisés, nous permettait de mettre en évidence des périodes ponctuelles de stress thermique, lors de certains contrôles laitiers. Même si les données météorologiques nous permettent de voir si l'épisode de stress thermique relié au contrôle laitier est ponctuel ou plus étalé dans le temps, nous n'avons pas pu avoir accès aux données de production des jours précédant et suivant le contrôle. Ainsi, il n'est pas possible ici d'étudier l'effet d'un stress thermique prolongé dans le temps sur la production laitière. Or, cet élément paraît important à étudier car dans certaines régions et notamment en France, les étés sont de plus en plus chauds, et les épisodes caniculaires, où les fortes chaleurs durent dans le temps (de quelques jours à plusieurs semaines), sont de plus en plus fréquents.

4. Les données du contrôle laitier

Les données de productions ont été obtenues lors des contrôles laitiers. Ces contrôles ayant lieu tous les 45 jours environs, seuls 55 contrôles laitiers ont eu lieu lors de la période d'étude. Idéalement, il aurait fallu soit étendre l'étude sur une plus longue période, soit obtenir les données de production d'une autre manière que *via* les contrôles laitiers. Cette dernière option peut facilement être mise en place pour la quantité de lait produite à l'échelle individuelle, notamment pour les élevages qui ont un robot de traite, où ces données sont enregistrées dans le logiciel. En revanche, pour les données qui concernent la qualité du lait, et notamment le TB et le TP à l'échelle individuelle, seul le contrôle laitier peut nous les fournir. Les données fournies par la laiterie quant à elles sont plus fréquentes et régulières mais permettent d'avoir seulement un aperçu global du troupeau, et non pas une approche individuelle.

B. Résultats

1. Mois moyen et jour moyen de lactation

Comme observé sur les figures Figure 8 Figure 9, le mois moyen et le jour moyen lors de l'étude sont stables, et n'expliqueraient pas une diminution ou une augmentation ponctuelle de la production laitière à l'échelle du troupeau. En effet, si le jour moyen se situe à 50 jours en moyenne à l'échelle du troupeau, cela pourrait être lié à une majorité de vaches se situant au niveau du pic de lactation, ce qui influencerait la quantité de lait produite. Ainsi, les contrôles laitiers de l'étude sont comparables sur le mois et le jour moyens de lactation.

2. La production laitière

On peut constater avec les résultats obtenus dans notre étude que la différence observée est significative, ainsi on observe une diminution en moyenne de 0,4 L de lait produit lorsque les vaches souffrent de stress thermique. Cette diminution est encore plus marquée pour les multipares qui voient leur production diminuer de 2 L lors d'ITH supérieur à 65. Ces résultats sont en accord avec la bibliographie, en effet les vaches ont une diminution de la production laitière moyenne de 2,5 L de lait par jour lorsque l'ITH passe de 60 à 80 (Zimbelman *et al.*, 2009). Ainsi, les vaches en lactation lors d'un stress thermique modéré à sévère ont une production laitière significativement inférieure aux vaches en lactation lors d'un stress thermique moindre.

Cependant, selon l'étude de Rhoads (Rhoads *et al.*, 2009), la diminution de la production laitière est expliquée à 35 % par une baisse de la MSI. Dans notre étude, nous n'avons pas du tout d'information sur la ration, sur la MSI par vache ou du troupeau au cours de l'étude. La ration n'étant pas stable dans l'élevage étudié, il s'agit d'un biais majeur de notre étude, qui pourrait influencer la MSI de par l'appétence et la composition énergétique, et par conséquent la production laitière.

3. La qualité du lait

a) Le TB

Les résultats de notre étude comparant le TB des vaches en stress thermique et celles qui ne le sont pas, ne permettent pas d'observer de différence significative. Ces résultats sont en accord avec la littérature, où le stress thermique ne semble pas impacter le TB (Ma *et al.*, 2019). Le TB a

tendance à diminuer lors des jours longs, donc par extrapolation, lors des jours à risque de stress thermique (Legarto *et al.*, 2014). De plus, l'alimentation est encore une fois un facteur pouvant influencer le TB, notamment lors d'apport d'aliments riches en sucres simples (betterave, mélasse, ensilage de maïs) car augmentent la production ruminale de butyrate ce qui augmente de fait le TB. Ainsi, le TB n'est pas directement influencé par le stress thermique, mais d'autres facteurs rentrent en compte dans sa variation.

b) Le TP

En revanche, lors de notre étude, nous avons montré qu'il existe une diminution significative du TP pour les vaches en lactation lors d'un stress thermique. Ces résultats sont en accord avec la littérature, où les vaches en stress thermique ont un TP plus faible que les vaches n'ayant pas subi de stress thermique (Nardone *et al.*, 2010 ; Cowley *et al.*, 2015)

c) Le taux cellulaire

Le taux cellulaire ne semble pas varier en fonction du stress thermique lors de notre étude. Dans la littérature, aucune étude ne prouve le contraire. De plus, le taux cellulaire peut être influencé par le stress, mais aussi par la santé de la mamelle, qui passe également par l'hygiène de traite et du logement. Nous n'avons pas de données quant à l'hygiène de la traite dans notre élevage. Aussi, certaines vaches étant en logettes et d'autres en aire paillée, la propreté de la litière n'est pas comparable, l'aire paillée ayant tendance à être plus humide que les logettes. De ce fait, le taux cellulaire ne semble pas être directement influencé par le stress thermique.

4. Comparaison d'un épisode de stress thermique avec les moyennes des mois comparables

Nous avons souhaité comparé les trois plus gros épisodes de stress thermique de l'étude, qui ont lieu en juin juillet et août, avec respectivement les autres mois de juin juillet et août de l'étude, afin d'avoir le moins de biais possibles pour cette comparaison. Nous avons obtenu des différences significatives pour les mois de juin et d'août (19 juin 2017 et 23 août 2016), témoignant ainsi qu'un épisode de stress thermique intense influence encore plus la production laitière que lors de contrôles laitiers ayant eu lieu dans ces mêmes mois mais avec des données météorologiques plus clémentes.

En revanche, pour le contrôle du mois de juillet étudié (27 juillet 2020), nous obtenons des résultats significativement plus élevés que lors des autres contrôles des autres mois de juillet. Cette différence, opposée à ce que l'on pouvait attendre, peut s'expliquer par plusieurs éléments : nous n'avons que deux contrôles laitiers au mois de juillet, qui dataient de 2015 et 2016. Cependant, le cheptel depuis 2015 s'est agrandi et la production a augmenté petit à petit grâce à une meilleure technicité de l'élevage et à une génétique qui a évolué. Ainsi, on peut se questionner quant à la comparabilité de ces trois mois de juillet à propos de la production laitière.

5. Étude d'un épisode de stress thermique par classes de production laitière

Les vaches hautes productrices étant plus sensibles au stress thermique (West *et al.*, 2003 ; Bernabucci *et al.*, 2010), nous avons souhaité séparer le troupeau en trois catégories lors du contrôle avec plus gros stress thermique de notre étude, le 19 juin 2017. Ainsi, le troupeau a été divisé en trois catégories : les 25 % plus grandes productrices, les 50 % moyennes productrices et les 25 %

plus petites productrices. Ces données ont été comparées avec les quatre autres contrôles des mois de juin, où le troupeau a été divisé de la même façon. Les différences obtenues sont significatives pour les hautes productrices et les moyennes productrices, avec une différence d'autant plus marquée pour les hautes productrices (5,8 L de différence contre 2,9 L pour les moyennes productrices). En revanche, cette différence n'est pas significative pour les plus petites productrices, pour qui le stress thermique a moins de répercussion sur la production laitière. Ainsi, les résultats obtenus concordent avec la littérature quant au fait que les vaches hautes productrices sont plus sensibles au stress thermique (West *et al.*, 2003).

6. Conséquences économiques

L'élevage de notre étude transformant lui-même une partie de la production, il est compliqué de calculer la perte économique liée au stress thermique. De plus, la rémunération du lait étant instable et laiterie-dépendante, les chiffres calculés ne seraient pas stables dans le temps et ne pourraient pas être étendus à d'autres élevages travaillant avec d'autres laiteries.

C. Pistes d'amélioration en élevage

Ce travail vient appuyer les nombreuses études réalisées sur le sujet. Cependant, peu de vétérinaires ruraux et d'éleveurs sont sensibilisés au sujet du stress thermique. Ainsi, il pourrait être intéressant de sensibiliser davantage ces derniers afin d'adapter leurs bâtiments et les rations de leur troupeau.

Pour les éleveurs ayant un robot de traite, il peut être intéressant de comparer grâce à l'interface digitale du robot de traite, différents jeux de données comme la production laitière, la part de refus, la rumination ou encore le nombre de pas réalisés, entre les périodes de stress thermique et les périodes où la température est plus basse. Ainsi, sans forcément faire d'analyse statistique, l'éleveur pourra à l'aide des courbes, visualiser les tendances et voir ou non une différence entre ces deux périodes. Cela pourrait être un argument en faveur de l'installation de ventilateurs ou de brumisateurs. Cet éleveur pourra également, à l'aide de son vétérinaire ou d'un technicien, réaliser une ration adaptée pour l'été par exemple, afin d'optimiser la densité énergétique de la ration pour maximiser la production laitière.

Conclusion

De nombreuses études ont été menées à travers le monde, et notamment dans les climats secs et arides, sur l'effet du stress thermique sur l'élevage bovin, que ce soit d'un point de vue production laitière, reproduction ou au niveau de l'engraissement pour la production de viande. Cependant, peu d'études ont été réalisées dans des climats tempérés comme en Île-de-France et plus largement dans la partie Nord-Ouest de la France, important bassin d'élevage laitier.

Ainsi, les résultats obtenus semblent indiquer qu'un épisode de stress thermique a des conséquences néfastes sur la production laitière, en termes de quantité produite mais également au niveau du taux protéique du lait. En effet, lors d'un épisode de stress thermique, avec un ITH supérieur à 68, on observe une diminution de la production laitière de 1,2 L pour les primipares contre 2 L pour les multipares. Pour le TP, on observe une diminution de 1 g/kg de TP pour les primipares subissant un stress thermique contre 1,4 g/kg pour les multipares. En revanche, aucune différence significative n'a été mise en évidence dans cette étude pour le TB ou le taux cellulaire. De plus, un épisode de stress thermique très important semble toucher plus fortement les vaches hautes productrices que les vaches basses productrices : les 25 % plus hautes productrices du troupeau produisent en moyenne 5,8 L de lait de moins que lors de mois comparables et les 50 % moyennes productrices du troupeau produisent 2,9 L de moins, aucune différence significative n'étant observée pour les basses productrices.

Pour limiter cet impact, des solutions peuvent être mises en place comme des méthodes de rafraîchissement ou des adaptations de la ration. Malheureusement ces solutions sont parfois compliquées à mettre en place et onéreuses pour l'éleveur.

Cette étude a des limites, ce qui laisse la place à de futures études pour comparer la production laitière plus régulièrement et sur d'autres élevages. En effet, la question du réchauffement climatique étant devenue au fil des années un enjeu sociétal majeur, il est important de commencer à mettre en place dès maintenant des stratégies pour pallier à ces effets néfastes pour adapter l'élevage de demain. Cependant, il semblerait que les effets du réchauffement climatique se fassent plus ressentir au niveau de la gestion des cultures avec un manque d'eau, un sol moins fertile et une diffusion des pathogènes plus importante, qu'au niveau de l'élevage à proprement parler car les animaux arrivent à s'adapter à la chaleur, notamment si on les aide en adaptant leurs rations, leurs bâtiments et en répondant à leurs besoins (Nardone *et al.*, 2010).

Liste des références bibliographiques

- AL-KATANANI Y.M., WEBB D.W., P. J. Hansen (1999) Factors Affecting Seasonal Variation in 90-Day Nonreturn Rate To First Service in Lactating Holstein Cows in a Hot Climate. *Journal of Dairy Science* 82(12), 2611-2616
- ALLEN J.D., HALL L.W., COLLIER R.J., SMITH J.F. (2015) Effect of core body temperature, time of day, and climate conditions on behavioral patterns of lactating dairy cows experiencing mild to moderate heat stress. *Journal of Dairy Science* 98(1), 118-127
- AL-QAISI M., HORST E., MAYORGA J., *et al.* (2020) Effects of a *Saccharomyces cerevisiae* fermentation product on heat-stressed dairy cows. *Journal of Dairy Science* 103(10), 9634-9645
- BASIRICÒ L. L., MORERA P., LACETERA N., *et al.* (2011) Down-regulation of hepatic ApoB 100 expression during hot season in transition dairy cows. *Livestock Science - LIVEST SCI* 137(1), 49-57
- BEEDE D., COLLIER R. (1986) Potential nutritional strategies for intensively managed cattle during thermal stress. *Journal of Animal Science* 62(2), 543-554
- BERMAN A. (2006) Extending the Potential of Evaporative Cooling for Heat-Stress Relief. *Journal of Dairy Science* 89(10), 3817-3825
- BERNABUCCI U., LACETERA N., BAUMGARD L.H., *et al.* (2010) Metabolic and hormonal acclimation to heat stress in domesticated ruminants. *Animal* 4(7), 1167-1183
- BERNABUCCI U., BIFFANI S., BUGGIOTTI L., *et al.* (2014) The effects of heat stress in Italian Holstein dairy cattle. *Journal of Dairy Science* 97(1), 471-486
- BERNABUCCI U., CALAMARI L. (1998) Effects of heat stress on bovine milk yield and composition. *Zootecnica E Nutrizione Animale* 24, 247-257
- BIANCA W. (1962) Relative importance of dry- and wet-bulb temperatures in causing heat stress in cattle. *Nature* 195, 251-252
- COIMBRA P.A.D., MACHADO FILHO L.C.P., HÖTZEL M.J. (2012) Effects of social dominance, water trough location and shade availability on drinking behaviour of cows on pasture. *Applied Animal Behaviour Science* 139(3), 175-182
- COLLIER R.J., RENQUIST B.J., XIAO Y. (2017) A 100-Year Review: Stress physiology including heat stress. *Journal of Dairy Science* 100(12), 10367-10380
- COLLIER R.J., COLLIER J.L. (2012) *Environmental Physiology of Livestock*. John Wiley & Sons
- CONTE G., CIAMPOLINI R., CASSANDRO M., *et al.* (2018) Feeding and nutrition management of heat-stressed dairy ruminants. *Italian Journal of Animal Science* 17(3), 604-620
- COWLEY F.C., BARBER D.G., HOULIHAN A.V., POPPI D.P. (2015) Immediate and residual effects of heat stress and restricted intake on milk protein and casein composition and energy metabolism. *Journal of Dairy Science* 98(4), 2356-2368

- DIKMEN S., ALAVA E., PONTES E., *et al.* (2008) Differences in Thermoregulatory Ability Between Slick-Haired and Wild-Type Lactating Holstein Cows in Response to Acute Heat Stress. *Journal of Dairy Science* 91(9), 3395-3402
- DIKMEN S., COLE J., NULL D., HANSEN P. (2013) Genome-Wide Association Mapping for Identification of Quantitative Trait Loci for Rectal Temperature during Heat Stress in Holstein Cattle. *PLoS One* 8, e69202
- DIMICELI V.E., PILTZ S.F., AMBURN S.A. (2011) Estimation of Black Globe Temperature for Calculation of the Wet Bulb Globe Temperature Index. *Lecture Notes in Electrical Engineering* 170(1), 323-334
- DO AMARAL B.C., CONNOR E.E., TAO S., *et al.* (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
- FRAZZI E., CALAMARI L., CALEGARI F., STEFANINI L. (2000) Behavior of dairy cows in response to different barn cooling systems. *Transactions of the ASAE* 43(2), 387-394
- GALÁN E., LLONCH P., VILLAGRÁ A., *et al.* (2018) A systematic review of non-productivity-related animal-based indicators of heat stress resilience in dairy cattle. *PLoS One* 13(11), e0206520
- GEBREMEDHIN K.G., HILLMAN P.E., LEE C., *et al.* (2008) Sweating Rates of Dairy Cows and Beef Heifers in Hot Conditions. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers* 51(6), 2167-2178
- HAMMAMI H., BORMANN J., M'HAMDI N., MONTALDO H.H., GENGLER N. (2013) Evaluation of heat stress effects on production traits and somatic cell score of Holsteins in a temperate environment. *Journal of Dairy Science* 96(3), 1844-1855
- HERBUT P., ANGRECKA S., WALCZAK J. (2018) Environmental parameters to assessing of heat stress in dairy cattle—a review. *International journal of biometeorology* 62(12), 2089-2097
- HILLMAN P.E., SCOTT N.R., VAN TIENHOVEN A. (1985) Physiological responses and adaptations to hot and cold environments. *In Stress Physiology in Livestock*. CRC Press, pp 1-71
- HILLMAN P., LEE C., CARPENTER J., BAEK K., PARKHURST A. (2001) Impact of Hair Color on Thermoregulation of Dairy Cows to Direct Sunlight. *In ASAE Annual International Meeting*, Sacramento, CA. July 29-August 1 2001.
- JOHNSON H.D. (1987) *Bioclimatology and the adaptation of livestock*. Amsterdam, Elsevier
- KADZERE C.T., MURPHY M.R., SILANIKOVE N., MALTZ E. (2002) Heat stress in lactating dairy cows: a review. *Livestock Production Science* 77(1), 59-91
- KAUFMAN J., BAILEY H., KENNEDY A., LÖFFLER F., RÍUS A. (2020) Cooling and dietary crude protein affected milk production on heat-stressed dairy cows. *Livestock Science* 240, 104111
- KENDALL P.E., NIELSEN P.P., WEBSTER J.R., *et al.* (2006) The effects of providing shade to lactating dairy cows in a temperate climate. *Livestock Science* 103(1), 148-157
- KNAPP J.R., LAUR G.L., VADAS P.A., WEISS W.P., TRICARICO J.M. (2014) Invited review: Enteric methane in dairy cattle production: quantifying the opportunities and impact of reducing emissions. *J Dairy Sci* 97(6), 3231-3261
- KOCH F., THOM U., ALBRECHT E., *et al.* (2019) Heat stress directly impairs gut integrity and recruits distinct immune cell populations into the bovine intestine. *PNAS* 116(21), 10333-10338

- LAMBERT G.P. (2009) Stress-induced gastrointestinal barrier dysfunction and its inflammatory effects1. *Journal of Animal Science* 87(suppl_14), E101-E108
- LEGARTO J., GELÉ M., FERLAY A., *et al.* (2014) Effets des conduites d'élevage sur la production de lait, les taux butyreux et protéique et la composition en acides gras du lait de vache... *INRAE Productions Animales* 27(4), 269-282
- MA L., YANG Y., ZHAO X., *et al.* (2019) Heat stress induces proteomic changes in the liver and mammary tissue of dairy cows independent of feed intake: An iTRAQ study. *PLoS One* 14(1), e0209182
- MADER T.L., DAVIS M.S., BROWN-BRANDL T. (2006) Environmental factors influencing heat stress in feedlot cattle.. *J Anim Sci* 84(3), 712-719
- MAGDUB A., JOHNSON H.D., BELYEA R.L. (1982) Effect of Environmental Heat and Dietary Fiber on Thyroid Physiology of Lactating Cows1. *Journal of Dairy Science* 65(12), 2323-2331
- MAUGER G., BAUMAN Y., NENNICH T., SALATHÉ E. (2015) Impacts of Climate Change on Milk Production in the United States. *The Professional Geographer* 67(1), 121-131
- MCDOWELL R.E., HOOVEN N.W., CAMOENS J.K. (1976) Effect of Climate on Performance of Holsteins in First Lactation. *Journal of Dairy Science* 59(5), 965-971
- MILLÉRIOUX M. (2021) Stress thermique : comprendre et limiter les perturbations acido-basiques. *In SNGTV*. [<https://www2.sngtv.org/article-bulletin/stress-thermique-comprendre-et-limiter-les-perturbations-acido-basiques/>] (consulté le 08/07/2022).
- Ministères Écologie Énergie Territoires (2022) Impacts du changement climatique : Atmosphère, Températures et Précipitations. [<https://www.ecologie.gouv.fr/impacts-du-changement-climatique-atmosphere-temperatures-et-precipitations>] (consulté le 08/09/2022).
- MORETTI R., BIFFANI S., CHESSA S., BOZZI R. (2017) Heat stress effects on Holstein dairy cows' rumination. *Animal* 11(12), 2320-2325
- NARDONE A., RONCHI B., LACETERA N., BERNABUCCI U. (2006) Climatic Effects on Productive Traits in Livestock. *Veterinary Research Communications* 30(Suppl 1), 75-81
- NARDONE A., RONCHI B., LACETERA N., RANIERI M.S., BERNABUCCI U. (2010) Effects of climate changes on animal production and sustainability of livestock systems. *Livestock Science* 130(1-3), 57-69
- NASROLLAHI S.M., ZALI A., GHORBANI G.R., *et al.* (2019) Effects of increasing diet fermentability on intake, digestion, rumen fermentation, blood metabolites and milk production of heat-stressed dairy cows. *Animal* 13(11), 2527-2535
- OUELLET V. (2019) Le stress de chaleur chez la vache laitière : effets sur les performances de production des troupeaux laitiers québécois. *Thèse Université de Laval, Québec*, 171
- PEARCE S.C., SANZ-FERNANDEZ M.V., HOLLIS J.H., BAUMGARD L.H., GABLER N.K. (2014) Short-term exposure to heat stress attenuates appetite and intestinal integrity in growing pigs1. *Journal of Animal Science* 92(12), 5444-5454
- PERDOMO M.C., MARSOLA R.S., FAVORETO M.G., *et al.* (2020) Effects of feeding live yeast at 2 dosages on performance and feeding behavior of dairy cows under heat stress. *Journal of Dairy Science* 103(1), 325-339

- POLSKY L., VON KEYSERLINGK M.A.G. (2017) Invited review: Effects of heat stress on dairy cattle welfare. *Journal of Dairy Science* 100(11), 8645-8657
- PURWANTO B.P., ABO Y., SAKAMOTO R., FURUMOTO F., YAMAMOTO S. (1990) Diurnal patterns of heat production and heart rate under thermoneutral conditions in Holstein Friesian cows differing in milk production. *The Journal of Agricultural Science* 114(2), 139-142
- RAVAGNOLO O., MISZTAL I. (2000) Genetic Component of Heat Stress in Dairy Cattle, Parameter Estimation. *Journal of Dairy Science* 83(9), 2126-2130
- RENAUDEAU D., COLLIN A., YAHAV S., *et al.* (2012) Adaptation to hot climate and strategies to alleviate heat stress in livestock production. *Animal* 6(5), 707-28
- RHOADS M.L., RHOADS R.P., VANBAALE M.J., *et al.* (2009) Effects of heat stress and plane of nutrition on lactating Holstein cows: I. Production, metabolism, and aspects of circulating somatotropin. *Journal of Dairy Science* 92(5), 1986-1997
- 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
- ROWSELL H.C. (1972) A Guide to Environmental Research on Animals. *Can Vet J* 13(8), 196
- SCHÜLLER L.K., 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
- SHWARTZ G., RHOADS M.L., VANBAALE M.J., RHOADS R.P., BAUMGARD L.H. (2009) Effects of a supplemental yeast culture on heat-stressed lactating Holstein cows 1. *Journal of Dairy Science* 92(3), 935-942
- SILANIKOVE N., SHAPIRO F., SHINDER D. (2009) Acute heat stress brings down milk secretion in dairy cows by up-regulating the activity of the milk-borne negative feedback regulatory system. *BMC physiology* 9, 13
- THOM E.C. (1959) The Discomfort Index. *Weatherwise* 12(2), 57-61
- TORRES-JÚNIOR J.R. de S., PIRES M. de F.A., DE SÁ W.F., *et al.* (2008) Effect of maternal heat-stress on follicular growth and oocyte competence in *Bos indicus* cattle. *Theriogenology* 69(2), 155-166
- TURNER L.W., CHASTAIN J.P., HEMKEN R.W., GATES R.S., CRIST W.L. (1992) Reducing Heat Stress in Dairy Cows Through Sprinkler and Fan Cooling. *Applied Engineering in Agriculture* 8(2), 251
- VIZZOTTO E.F., FISCHER V., NETO A.T., *et al.* (2015) Access to shade changes behavioral and physiological attributes of dairy cows during the hot season in the subtropics. *Animal* 9(9), 1559-1566
- WEST J.W., MULLINIX B.G., BERNARD J.K. (2003) Effects of Hot, Humid Weather on Milk Temperature, Dry Matter Intake, and Milk Yield of Lactating Dairy Cows. *Journal of Dairy Science* 86(1), 232-242
- WHEELOCK J.B., RHOADS R.P., VANBAALE M.J., SANDERS S.R., BAUMGARD L.H. (2010) Effects of heat stress on energetic metabolism in lactating Holstein cows. *J. Dairy Sci.* 93(2), 644-655
- YOUSEF M.K. (1985) *Stress physiology: definition and terminology* Boca Raton, CRC Press
- ZIMBELMAN R., RHOADS R., RHOADS M., *et al.* (2009) A Re-evaluation of the Impact of Temperature Humidity Index (THI) and Black Globe Humidity Index (BGHI) on Milk Production in High Producing Dairy Cows. *In Western Dairy Management Conference, Reno, NV*, pp 113-125

ZIMBELMAN R.B., BAUMGARD L.H., COLLIER R.J. (2010) Effects of encapsulated niacin on evaporative heat loss and body temperature in moderately heat-stressed lactating Holstein cows. *Journal of Dairy Science* 93(6), 2387-2394

RELATION ENTRE STRESS THERMIQUE ET PRODUCTION LAITIÈRE : ÉTUDE PRÉLIMINAIRE À PARTIR DE L'EXEMPLE D'UN ÉLEVAGE LAITIER D'ÎLE-DE-FRANCE

AUTEUR : Juliette WAUBANT

RÉSUMÉ :

Le stress thermique est un état de stress provoqué par de fortes chaleurs qui peut engendrer chez les animaux d'élevage et notamment les bovins laitiers, des dysfonctionnements qui peuvent mener à des baisses de production, notamment au niveau de la quantité de lait produite et du taux protéique du lait. Avec le réchauffement climatique, ces épisodes de stress thermique sont de plus en plus fréquents et longs, ce qui accentue les effets néfastes sur les bovins laitiers. De nombreuses études ont été réalisées dans des climats arides et ont montré l'impact du stress thermique sur la production laitière. Ainsi, ce travail vise à étudier les effets d'épisodes de stress thermique sur la production laitière dans un climat plus tempéré comme celui de l'Île-de-France.

Sur la période étudiée, soit de janvier 2015 à octobre 2021, 55 contrôles laitiers ont été analysés dont 16 en période de stress thermique, avec un ITH supérieur à 68. En les comparant aux contrôles laitiers ayant eu lieu à des températures considérées comme confortables, une différence significative a été mise en évidence pour la quantité de lait produite et le taux protéique : lors d'un stress thermique, les vaches primipares produisent en moyenne 1,2 L de lait de moins contre 2 L pour les multipares, et le taux protéique chute de 1 g/kg pour les primipares contre 1,4 g/kg pour les multipares. En revanche, le stress thermique n'engendre pas de différence significative pour le taux butyreux et le taux cellulaire du lait pour les vaches de cet élevage. Les épisodes intenses de stress thermique affectent plus les vaches hautes productrices que les vaches basses productrices : les 25 % plus hautes productrices du troupeau produisent en moyenne 5,8 L de lait de moins que lors de mois comparables, et les 50 % moyennes productrices du troupeau produisent 2,9 L de moins ; aucune différence significative n'est observée pour les vaches basses productrices.

Ainsi, même dans un climat tempéré, le stress thermique est présent et peut affecter la production laitière des bovins, altérant surtout la quantité de lait produite et le taux protéique. Ces deux éléments faisant partie du barème de rémunération du lait, l'impact économique du stress thermique n'est pas négligeable. C'est pourquoi il est important de sensibiliser éleveurs et vétérinaires au stress thermique, afin de mettre en place des solutions, comme des modifications de rations ou des aménagement de bâtiments, pour pallier aux épisodes de fortes températures de plus en plus fréquents en France.

MOTS CLÉS :

STRESS THERMIQUE ; PRODUCTION LAITIÈRE ; ÉLEVAGE BOVIN ; VACHE LAITIÈRE

JURY :

Présidente : Dr Julie RIVIÈRE

Directeur de thèse : Dr Vincent MAUFFRÉ

Examinateur : Pr Yves MILLEMANN

RELATIONSHIP BETWEEN HEAT STRESS AND MILK PRODUCTION: PRELIMINARY STUDY USING THE EXAMPLE OF A FARM IN ILE-DE-FRANCE)

AUTHOR: Juliette WAUBANT

SUMMARY:

Heat stress is caused by high temperatures that can lead to dysfunctions in livestock, especially dairy cattle. This can lead to decreased production, especially in the volume of milk produced and its protein content. With global warming, these heat stress episodes are becoming more frequent and longer, which accentuates the adverse effects on dairy cattle. Many studies have been conducted in arid climates and have shown the impact of heat stress on milk production. Thus, this work aims to study the effects of heat stress episodes on milk production in a more temperate climate such as in Ile-de-France.

Over the study period (January 2015 to October 2021), 55 milk samples were analyzed. 16 of the samples were produced under heat stress, with a thermohygrometric index (THI) higher than 68 and compared to milk samples produced at temperatures considered as comfortable. A significant difference was found for the volume of milk produced and protein content: during heat stress, first-calf heifers produced on average 1.2 liters per day less milk compared to 2 liters per day for multiparous cows, and protein content dropped by 1 g/kg for first-calf heifers compared to 1.4 g/kg for multiparous cows. On the other hand, heat stress did not cause any significant difference in milk fat and cell content. Intense heat stress episodes affected high-producing more than low-producing cows: the 25% highest producing cows in the herd produced on average 5.8 liters per day less milk than in comparable months, and the 50% average producing cows produced 2.9 liters per day less, with low producing cows showing no significant difference.

Thus, even in a temperate climate, heat stress occurs and can affect the milk production of cattle, especially altering the volume produced and its protein content. As these two elements are part of the remuneration scale for milk, the economic impact of heat stress is real. This is why it is important to educate farmers and veterinarians about heat stress, in order to implement solutions, such as changes in rations or improved building insulation, to mitigate the effect of high temperature events that are becoming more frequent in France.

KEYWORDS:

HEAT STRESS; DAIRY PRODUCTION; CATTLE; DAIRY COW

JURY:

Chairperson: Dr Julie RIVIÈRE

Thesis Director: Dr Vincent MAUFFRÉ

Reviewer: Pr Yves MILLEMANN