HAL
open science

# Etude de l'adaptation de la race Tarentaise aux conditions du stress thermique en Tunisie

Rahma Bellagi

## To cite this version:

Rahma Bellagi. Etude de l'adaptation de la race Tarentaise aux conditions du stress thermique en Tunisie. Agronomie. Université Clermont Auvergne [2017-2020]; Université de Carthage (Tunisie), 2017. Français. NNT : 2017CLFAC026 . tel-01781295

**HAL Id: tel-01781295**

**https://theses.hal.science/tel-01781295v1**

Submitted on 30 Apr 2018

**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.

UNIVERSITE CLERMONT AUVERGNE
D. U. N° 2821 ANNEE 2017

*ECOLE DOCTORALE SCIENCES DE LA VIE, SANTE, AGRONOMIE, ENVIRONNEMENT*
N° d'ordre 720

These

Présentée à l'Université CLERMONT AUVERGNE
pour l'obtention du grade de

**DOCTEUR D'UNIVERSITE**

(SPÉCIALITÉ : NUTRITION ET SCIENCES DES ALIMENTS)

soutenue le
29 juin 2017

RAHMA BELLAGI

---

# Etude de l'adaptation de la race Tarentaise aux conditions du stress thermique en Tunisie

---

Directeurs de thèse : Bruno MARTIN & Taha NAJAR
Co-encadrant : Dominique POMIES

| | |
|---|---|
| Présidente | : Mme Naziha ATTI |
| Rapporteurs | : M. Alessandro PRIOLO & Mme Aziza BOUBAKER |
| Examinatrice | : Mme Corinne MALPUECH-BRUGERE |
| Membre invité | : M. Rachid BOURAOUI |
| Membre invité encadrant | : M. Dominique POMIES |

Unité Mixte de Recherches sur les Herbivores (UMR 1213, PERAQ, INRA France)
INAT, Département des ressources animales, halieutiques et technologies agro-alimentaires, 1082 Tunis, Tunisie

# Remerciements

Cette thèse est loin d'être un travail solitaire, je n'aurais jamais pu réaliser ce travail doctoral sans le soutien, la confiance et la générosité d'un grand nombre de personnes auxquelles je suis entièrement reconnaissante. Malgré les sacrifices et certains obstacles financiers, cette thèse est la meilleure chose qui me soit jamais arrivée, j'ai pu rencontrer des gens formidables, de multiples nationalités, qui m'ont aidé à progresser dans cette phase délicate de ma vie.

Ce travail de thèse est le fruit d'une collaboration entre l'Institut National Agronomique de Tunis et l'Institut National de Recherches Agronomiques, centre Auvergne-Rhônes-Alpes (UMR 1213) et d'une cotutelle avec l'université de Blaise Pascal (Clermont-Ferrand, France). Je tiens à remercier l'Université de Carthage et le laboratoire Matériaux, molécules et Applications de l'IPEST, Tunisie, pour les bourses de mobilité qui m'ont permise d'effectuer de nombreux séjours en France. Merci également à l'équipe SYBEL et COMETE (UMR 1213) pour avoir financé les différentes analyses ainsi que mes participations aux colloques à Paris et à Saragosse.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde reconnaissance à l'un de mes co-encadrant à l'INRA : Dominique Pomiès, qui n'a jamais cessé de me soutenir tout au long de cette thèse. Grâce à toi, j'ai appris énormément de choses. Merci pour ta confiance, ta patience, ton hospitalité, ta générosité, ta bonne humeur et ton investissement dans la correction de ce manuscrit. Merci de m'avoir considérée comme un membre de ta famille. Grâce à toi, j'ai plein de beaux souvenirs à l'INRA et à Clermont-Ferrand.

Sincères remerciements à Bruno Martin, mon autre co-encadrant à l'INRA. Je te remercie pour ta disponibilité, tes idées et tes nombreux conseils qui m'ont beaucoup aidé dans l'interprétation et la discussion des résultats de ce travail de recherche. Merci pour le temps que tu as consacré à la correction de cette thèse. Je suis navrée si je t'ai laissé travailler pendant les week-ends et lors de tes jours de congé. Pour tout cela, je te suis entièrement reconnaissante.

Un grand MERCI à mon encadrant à l'INAT : Taha Najar, pour ses nombreux conseils et sa contribution au bon déroulement de cette thèse. Nous nous connaissons depuis déjà plusieurs années, grâce à toi j'ai pu découvrir une personne d'une grande acuité scientifique et qui de plus entièrement dévouée à son travail et à ses étudiants. Merci pour tes encouragements et ton enthousiasme qui ont fait de moi une meilleure personne.

Je n'oublie pas de remercier Chantale Chassaing pour m'avoir aidé à traiter les données relatives à l'enquête. Merci pour tes bons conseils.

Merci également à Mme Aziza Boubaker et M. Alessandro Priolo d'avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse.

Merci à M. Bouraoui pour vos précieux conseils lors de mes comités de thèse et merci d'avoir accepté d'être membre invité du jury. Je remercie également la présidente du jury Madame Naziha Atti et tous les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Mes remerciements vont également à M. Elyess Hamza, l'ancien directeur de l'INAT. Je vous suis reconnaissante pour m'avoir facilité certaines démarches administratives qui n'étaient pas forcément faciles pour moi. Vous étiez présent dans tout mon parcours académique, depuis l'école préparatoire, au cycle ingénieur et durant toute ma thèse à l'INAT. Merci pour votre confiance.

J'exprime ma profonde gratitude à M. Karim Daoud et sa femme Claire Daoud, les propriétaires de la ferme Tarenty. Sans vôtre confiance, appuie et bien vaillance, cette thèse de doctorat n'aurait jamais vu le jour. Merci pour tous les bons moments que j'ai passé à la ferme grâce à vous.

Je tiens également à remercier tous les membres du GERT, pour m'avoir autorisé à fouiller dans leur archive et de m'avoir communiqué la liste de tous les éleveurs de la race Tarentaise en Tunisie. Un grand MERCI à Mohamed Bjeoui pour m'avoir accompagnée aux exploitations enquêtées.

J'adresse aussi mes remerciements au personnel de l'OEP pour leur disponibilité, leur gentillesse et de m'avoir communiqué la base de données que nous avons utilisée dans le premier dispositif expérimental. Merci également pour m'avoir prêté les compteurs à lait transférés à la ferme lors du deuxième dispositif. Un merci spécial à M. Chokri Barraj et à Rahma Taboubi pour leur patience et leur travail irréprochable.

Je n'oublie pas de remercier le personnel l'Institut National de Météorologie de Tunisie pour leur collaboration et pour nous avoir fournis les données météorologiques que nous avons utilisées dans les deux dispositifs.

Un grand merci à Isabelle Veissier la directrice de l'Unité mixte de recherches sur les herbivores (UMR 1213, INRA Theix) pour m'avoir accueillie à l'INRA et facilité les démarches administratives. Merci également pour tes conseils, ta gentillesse et ton hospitalité. Merci pour les bons plats que tu m'as fait découvrir.

A toute l'équipe de SYBEL, COMETE et PERAQ (UMR 1213, INRA de theix) pour avoir contribué de prés ou de loin à l'avancé de ce projet de thèse. Merci également à Sandrine et à Isabelle pour m'avoir initié au travail au laboratoire, même si j'ai fait plein de bêtises au début. Isabelle, j'ai passé de bons moments avec toi à l'INRA au tour d'une tasse bien chaude de thé vert avec la menthe de ton jardin.

Merci à tous les ouvriers de la ferme Tarenty : Aymen, Fathi, khalifa pour m'avoir aidé à la maintenir les vaches pour faire les mesures des paramètres physiologiques. Merci pour tous ces bons moments.

Ensuite mes remerciements vont à mes plus proches Ami(e)s : Khaoula, Fares, Marwen, Abdou, Mimi, Ahlem et Fedra. Merci pour votre appui durant ces trois ans et demi de thèse, merci d'avoir été présents lors des moments difficiles. Merci d'avoir cru en moi, je vous aime.

Merci également pour Nahla, Rania, Raouia et Rim pour les bons moments que nous avons passé au Clapier de l'INAT. Je vous souhaite beaucoup de bonheur et de réussite.

Parce que chaque être vivant est unique et important, je dédie cette thèse à ma vache préférée « Keswa », grâce à elle je suis passée par des moments inoubliables à la ferme !! Au final, chaque vie compte.

Je vais terminer avec ceux qui me soutiennent depuis toujours malgré les nombreux obstacles : Ma famille. Je dédie cette thèse à mon frère Ahmed qui ne cesse de me supporter, de m'encourager et de croire en moi. Mes parents, les sponsors officiels de cette thèse, je vous suis reconnaissante pour tout. Merci à toi maman pour tous les sacrifices que tu as fait pour que je puisse faire mes études, tu m'as toujours poussé à aller de l'avant. Merci à toi papa d'avoir toujours été à mes côtés. Merci aussi d'avoir été mon chauffeur personnel durant plusieurs années.

« Tout obstacle renforce la détermination. Celui qui s'est fixé un but n'en change pas »

*Léonard De Vinci*

*Ces travaux de thèse ont fait l'objet des publications et communications suivantes :*

**Publications**

- **Article impacté rang A**: Bellagi, R., Martin, B., Chassaing, C., Najar, T., Pomiès, D., 2017. Evaluation of heat stress on Tarentaise and Holstein cow performance in the Mediterranean climate. International Journal of Biometeorology. 61(8): 1371-1379.

- **Article indexé** : Bellagi, R., Pomiès, D., Martin, B., Najar, T., 2016. The interest of a mountain dairy cow breed to cope with Mediterranean summer heat stress. Option Méditerranéennes, A no. 116, 2016. Mountain pastures and livestock farming facing uncertainty : environmental, technical and socio economic challenges. p: 143-147.

- **Article indexé:** Bellagi, R., Pomiès, D., Martin, B., Najar, T., 2015. La Tarentaise semble mieux résister que la Holstein au climat méditerranéen Renc. Rech. Ruminants, 2015, 22 p 88.

- **Article impacté rang A :** Physiological, metabolic and milk yield variations of Tarentaise cows in response to heat stress and to an ameliorated dietary ration (à soumettre dans International Journal of Biometeorology).

**Séminaires**

- Participation par communication orale à : 19 th Meeting of the **FAO-CIHEAM** Mountain Pastures Subnetwork, 14-16 juin 2016. The interest of a mountain dairy cow breed to cope with Mediterranean summer heat stress. Saragosse, Espagne
- Participation par poster aux journées de l'école doctorale JED, 2016, Clermont Ferrand, France

- Participation par poster aux 4ème journées scientifiques de l'agro-alimentaire 20-23 mars 2016. Effet du stress thermique sur la composition du lait chez la vache Tarentaise. Sousse, Tunisie

- Participation par poster aux 22ème journées Rencontres Recherches Ruminants. 2-3 décembre 2015, La Tarentaise semble mieux résister que la Holstein au climat méditerranéen. Paris, France.

# Résumé

La race bovine Tarentaise, originaire des Alpes françaises, est une race mixte rustique de nouveau présente en Tunisie depuis les années 1990. Cette thèse avait pour objectif d'étudier l'adaptation de cette race au stress thermique, dans les conditions climatiques estivales du pays.

Un premier dispositif devait permettre de quantifier l'effet du stress thermique sur les performances de production laitière (**PL**) de la race, en comparaison avec la race Holstein (à partir d'une base de données de 16 400 contrôles laitiers individuels issus de 21 exploitations du nord de la Tunisie) et de définir des relations entre la baisse de la PL estivale et certaines caractéristiques des bâtiments d'élevage (à partir d'une enquête menée dans 19 des 21 exploitations). Lorsque l'index température-humidité (**THI**) est passé d'une valeur moyenne de 53,7 l'hiver à 75,4 l'été, la PL des vaches Holstein et Tarentaise ont baissé respectivement de 0,93 et 0,15 kg/j. Les taux butyreux, protéique et d'urée dans le lait ont chuté de manière identique pour les deux races, alors que le comptage des cellules somatiques a augmenté pour les vaches Holstein (+352 000 /mL) et légèrement baissé pour les Tarentaise (-160 000 /mL). L'enquête a montré que les bâtiments fermés et les toitures métalliques amplifient l'impact du stress thermique et induisent une baisse de PL plus prononcée que les bâtiments ouverts (-1,13 vs -0,27 kg/j) et les autres types de toitures (-1,04 vs -0,15 kg/j).

Un second dispositif expérimental, mis en place en ferme, devait permettre de quantifier les effets du stress thermique estival sur certains paramètres physiologiques des vaches Tarentaise, ainsi que la variation de PL quand ce stress est associé à une amélioration nutritionnelle de la ration estivale. Lorsque le THI est passé de 52,9 l'hiver à 77,4 l'été, comme attendu, les fréquences respiratoire et cardiaque, la température rectale et la teneur en cortisol du lait des vaches ont été plus élevées, mais avec une amplitude moins forte que lors d'essais réalisés avec des vaches Holstein. Par contre, la formule sanguine leucocytaire n'a pas été modifiée. Parallèlement, la distribution d'une ration estivale plus concentrée en énergie et protéines a permis de maintenir le niveau d'ingestion des vaches, un bilan énergétique toujours positif et même d'augmenter leur PL de 7,1 kg/j par rapport à la période hivernale.

Les résultats obtenus dans cette thèse montrent que la race Tarentaise s'avère être bien adaptée aux conditions climatiques estivales de la Tunisie. De plus, il est possible de pallier les effets négatifs du stress thermique sur les performances de production laitière par une ration estivale mieux équilibrée et par une meilleure conception des bâtiments d'élevage.

**Mots clés:** vache laitière, race Tarentaise, stress thermique, adaptabilité, bâtiments d'élevage.

# Abstract

In Tunisia, the Tarentaise cow, a dual-purpose rustic breed was imported from the northern region of the French Alps. The aim of this PhD work was to study the adaptation of Tarentaise breed to heat stress, in particular during summer climatic conditions of Tunisia.

To achieve our goals, two different studies were conducted. The first study was carried out to quantify the effect of heat stress on milk yield and components of Tarentaise in comparison to Holstein cows (by means of a data base of 16,400 monthly individual records of production traits from 21 farms situated in the North of Tunisia), and then to describe the relationship between the variations of milk yield during summer and some characteristics of the barns (by means of a survey carried out on 19 of the 21 previous farms). When the temperature-humidity index (**THI**) increased from an average value of 53.7 in winter to 75.4 in summer, the Holstein and Tarentaise cows decreased their milk yield by 0.93 and 0.15 kg/d, respectively. Milk fat, protein, and urea contents decreased similarly in both breeds, while somatic cell count increased for Holstein (+352,000/mL) and decreased for Tarentaise cows (−160,000/mL). The survey showed that closed buildings amplified the impact of heat stress and led to a more pronounced decrease in milk yield between summer and winter than open buildings (−1.13 vs. −0.27 kg/d), as well as metallic roofs compared to the other roof types (−1.04 vs. −0.15 kg/d).

The second study was implemented in a commercial farm to quantify the effects of summer heat stress on some physiological parameters of Tarentaise cows. At the same time, we studied changes in milk production when we provided to the cows a more balanced diet during heat stress conditions. As expected, when the THI increased on average from 52.9 during winter to 77.4 during summer, cows had higher respiratory rate, heart rate, rectal temperature, and milk cortisol content. Nevertheless, the range of variation was lower compared to Holstein cows from other studies. However, in our trial, the blood leucocytes count was not modified during summer. Simultaneously, during summer, the cows maintained their dry matter intake, were still in positive energy balance and increased their milk yield by 7.1 kg/d compared to winter, in response to a more concentrated energy and protein diet.

Our results suggest that Tarentaise cows are well adapted to the Mediterranean climate of Tunisia. In addition, it is possible to alleviate the negative effects of heat stress with a more balanced diet during summer and a better design of barns for an adequate microenvironment.

**Key words:** dairy cow, Tarentaise breed, heat stress, adaptability, barn characteristics.

# Table des matières

Introduction ..... 1
Etude Bibliographique ..... 5
Chapitre I. Stress thermique chez les ruminants: caractères généraux et principaux moyens de lutte contre la chaleur ..... 5
I. Notion d'homéothermie et définition de la zone de thermo neutralité ..... 5
I.1. Caractères généraux de l'homéothermie ..... 5
I.2. La zone de neutralité thermique ..... 6
II. Principaux mécanismes de la thermorégulation ..... 10
II.1. La thermogenèse ..... 10
II.2. La thermolyse ..... 13
III. Le stress thermique ..... 17
III.1. Définition du stress thermique ..... 17
III.2. Les indices d'évaluation du stress thermique ..... 18
III.3. Evaluation du stress thermique par l'index humidité-température ..... 20
III.4. Les facteurs qui modulent l'effet du stress thermique ..... 23
Chapitre II. Les réponses des vaches laitières face au stress thermique ..... 27
I. Impact du stress thermique sur le comportement physiologique des vaches laitières ..... 27
I.1. Physiologie générale d'un stress ..... 27
I.2. Les réponses physiologiques face au stress thermique ..... 28
I.3. Les réponses physiologiques hormonales face au stress thermique ..... 33
II. Le comportement alimentaire face à un stress thermique ..... 36
II.1. L'ingestion alimentaire ..... 36
II.2. La digestibilité des aliments et des nutriments ..... 39
II.3. Les adaptations métaboliques en réponse à un apport réduit de nutriments ..... 40
III. Impact du stress thermique sur la production et la composition laitière ..... 44
III.1. La production laitière ..... 44
III.2. La composition du lait ..... 47
IV. Impact du stress thermique sur l'immunité des vaches laitières ..... 52
V. Impact du stress thermique sur la reproduction des vaches laitières ..... 55
Chapitre III. Actions de maîtrise et de prévention du stress thermique chez les vaches laitières ... 58
I. Les modifications physiques de l'environnement ..... 58

I.1. Les zones ombragées ..... 58
I.2. La ventilation forcée ..... 59
I.3. Le douchage ..... 60
I.4. La nature du couchage ..... 61
II. Les modifications alimentaires et nutritionnelles ..... 62
II.1. Limitation de la baisse de la prise alimentaire ..... 62
II.2. Complémentation alimentaire ..... 64
II.3. Apports minéraux et abreuvement ..... 65
III. Sélection génétique pour la résistance à la chaleur ..... 66
Problématique, objectifs et stratégies mis en œuvre ..... 70
1. Problématique ..... 70
2. Objectifs et stratégies mis en œuvre ..... 71
Dispositif 1 : Etude comparative des performances de production des vaches Tarentaise et Holstein dans les conditions climatiques méditerranéennes de la Tunisie ..... 73
I. Conditions climatiques au nord de la Tunisie et identification d'un THI seuil ..... 79
II. Effet du stress thermique sur la production laitière, la composition du lait et le comptage des cellules somatiques ..... 81
II.1. La production laitière ..... 81
II.2. La composition du lait et le comptage des cellules somatiques ..... 84
III. Influence de la nature des bâtiments d'élevage sur la production laitière ..... 87
Dispositif 2 : Etude de la physiologie, du métabolisme et de la variation de la production laitière des vaches Tarentaise en réponse au stress thermique et à l'amélioration de la ration estivale, en termes d'équilibre nutritionnel et d'apports énergétiques ..... 92
I. Données météorologiques du site expérimental ..... 101
II. Effet du stress thermique sur les paramètres physiologiques ..... 103
II.1. La fréquence respiratoire ..... 103
II.2. La fréquence cardiaque ..... 103
II.3. La température rectale ..... 105
II.4. Le cortisol du lait ..... 105
III. Effet du stress thermique sur le comportement alimentaire ..... 106
III.1. Effet sur l'ingestion ..... 106
III.2. Effet sur la digestibilité ..... 108
IV. Les réponses métaboliques face au stress thermique ..... 108
IV.1. Effet sur le glucose plasmatique ..... 108
IV.2. Effet sur les acides gras non-estérifiés (AGNE) ..... 109

IV.3. Effet sur le ß-hydroxybutyrate ..... 110
V. Effet du stress thermique sur la production laitière et la composition du lait ..... 110
V.1. La production laitière ..... 110
V.2. Le taux butyreux ..... 113
V.3. Le taux protéique ..... 113
V.4. La teneur en urée du lait ..... 114
V.5. Le comptage des cellules somatiques ..... 114
V.6. Bilans énergétique et protéique ..... 115
VI. Effet du stress thermique sur la formule leucocytaire ..... 115
Discussion générale et perspectives ..... 118
1. Importance du choix de la race ..... 119
2. Importance de l'alimentation sur la résistance au stress thermique ..... 124
3. Importance de la nature du microenvironnement de l'étable ..... 128
Conclusions générales ..... 132
Références bibliographiques ..... 134
ANNEXES ..... 135
PUBLICATIONS ..... 135

# Liste des abréviations

**ADF :** acid detergent fiber

**AGNE** : acides gras non estérifiés

**Bat/min** : battements par minute

**BG** : black globe

**BGT** : black globe temperature

**BILE** : bilan énergétique

**BILP** : bilan protéique

**CCS** : comptage des cellules somatiques

**Sc** : *Sacchaomyces cerevisiae*

**CVMS** : consommation volontaire de matière sèche

**DBT** : dry bulb temperature

**dCo** : digestibilité de la cellulose de la matière organique

**dMO** : digestibilité de la matière organique

**EB** : énergie brute

**EM** : énergie métabolisable

**$EN_I$** : énergie nette ingérée

**$EN_E$** : énergie nette pour l'entretien

**$EN_L$** : énergie nette pour la lactation

**ET** : effective temperature

**ETI** : equivalent temperature index

**FC** : fréquence cardiaque

**FR** : fréquence respiratoire

**GERT** : groupement des éleveurs de la race Tarentaise

**GOD** : glucose oxydase

**H-H** : axe hypothalamo- hypophysaire

**HR** : humidité relative

**HLI** : heat load index

**HSP** : heat protein shock

**IVV** : intervalle vêlage-vêlage

**MAT** : matière azoté totale

**$MAT_f$** : matière azotée totale fécale

**MO** : matière organique

**MS** : matière sèche

**MSI** : matière sèche ingérée

**NDF** : neutral detergent fiber

**NS** : non significatif

**OEP** : office de l'élevage et des pâturages

**$P_1$** : première période expérimentale du 9 février au 9 mars 2015

**$P_2$** : deuxième période expérimentale du 1 au 31 août 2015

**PDI** : protéines digestibles dans l'intestin

**PDIE** : protéines digestibles dans l'intestin quand l'énergie n'est pas le facteur limitant

**PDIN** : protéines digestibles dans l'intestin quand l'azote n'est pas le facteur limitant

**PL** : production laitière

**$PN_E$** : protéines nettes pour l'entretien

**$PN_I$** : protéines nettes ingérées

**$PN_L$** : protéines nettes pour la lactation

**POD** : peroxydase

**Resp/min**: respirations par minute

**SCC** : somatic cell count

**Ta** : temperature ambiante

**TB** : taux butyreux

**Tc** : taux de conception

**TCI** : température critique inférieure

**TCS** : température critique supérieure

**THI** : temperature-humidity index

**TP** : taux protéique

**TR** : température rectale

**$T_4$** : la thyroxine

**$T_3$** : tri-iodothyronine

**UFL** : unité fourragère lait

**WS** : wind speed

**ß-OH** : ß-hydroxybutyrate

**Δ Production laitière** : variation de la production laitière entre l'été et l'hiver

# Liste des figures

**Synthèse bibliographique**


**Figure 1.** Représentation de la production de chaleur en fonction de la température ambiante, mettant en évidence la zone de thermoneutralité (Yousef, 1985)……..8

**Figure 2.** Les différents intervenants de la thermorégulation (Fuquay, 1981)…….....13

**Figure 3.** Effet du stress thermique sur la matière sèche ingérée chez des vaches Holstein élevée en Tunisie suivant leur niveau de production (Rejeb Bellil (2014)……14

**Figure 4.** Diagramme de l'index THI pour l'estimation du degré de stress thermique (Wiersma, 1990)……22

**Figure 5.** Relation entre température, humidité relative et zone de stress thermique chez les bovins (Armstrong, 1994)…….....23

**Figure 6.** Relation entre la digestibilité de la matière organique (DMO) et le niveau d'ingestion chez les ovins et les bovins (Doreau et al., 2000)……..40

**Figure 7.** Variation mensuelle de la production laitière et des valeurs THI (Bouraoui et al., 2013)……..45

**Figure 8.** Production laitière au pic de lactation selon le mois de vêlage (Lefebvre et Lafontaine, 2005)……..47

**Figure 9.** Variation de la production laitière, du taux butyreux et du taux protéique du lait en fonction des mois au Québec. (Lefebvre et Plamodon, 2003)……..49

**Figure 10.** Origine de la variation de l'urémie du lait (Cap élevage, 2008)……..50

**Figure 11.** Évolution mensuelle des teneurs en urée dans le lait (Dufrasne et al., 2010) ……51

**Figure 12.** Variations de la production laitière et du comptage des cellules somatiques (SCC) en fonction des mois (Nickerson, 2014)……..52

**Figure 13.** Relation entre la concentration du cortisol et la L-sélectine de neutrophiles, un marqueur de la fonction immunitaire (d'après Burton et Erskine, 2003)……...53

**Figure 14.** Evolution de la prévalence des mammites en fonction du THI (Bouraoui et al., 2013)……54

**Figure 15.** Variation du taux de conception, de l'intervalle vêlage-vêlage et des THI selon les mois (Bouraoui et al., 2013)…….56

**Figure 16.** Système d'aspersion avec ventilateurs proposé par le site Ontario.ca (2015).....61

**Dispositif 1**

**Figure 1.** Exemple de bâtiment ouvert avec toiture métallique dans la région de Bizerte……..77

**Figure 2.** Valeurs moyennes mensuelles de l'index température-humidité (THI), de l'humidité relative (HR, en %) et de la température ambiante (Ta, en °C) dans les cinq régions du nord de la Tunisie durant les cinq années d'études…….....80

**Figure 3.** Production laitière moyenne des deux races par classe de THI (classification de Silanikove) ; les barres représentent l'erreur standard…….....84

**Figure 4.** Regroupement de vaches laitières à l'ombre et près d'un point d'eau, dans une aire d'exercice à accès libre pendant l'été……..90

**Dispositif 2**

**Figure 1.** Les vaches laitières Eté recevant leur ration de sorgho dans les râteliers…….....93

**Figure 2.** Détermination des matières azotées fécales par l'analyseur Leco FP428…….....98

**Figure 3.** Variation journalière des THI moyens correspondant au site expérimental durant les périodes hivernale ($P_1$) et estivale ($P_2$)……..102

**Figure 4.** Comparaison de nos mesures de fréquence cardiaque en fonction du THI avec celles de Bouraoui et al. (2002) et Rejeb et al. (2012), dans les conditions climatiques méditerranéennes de la Tunisie……104

**Figure 5.** Quantités journalières moyennes de MS ingérées de chacun des composants de la ration totale par chaque vache des lots $P_1$ et $P_2$, en fonction de la saison……107

**Figure 6.** Production laitière moyenne des deux lots de vaches en périodes hivernale (P1) et estivale (P2), en fonction de leur stade de lactation……112

# Liste des tableaux

**Synthèse bibliographique**

**Tableau 1.** Températures physiologiques en degrés Celsius chez les bovins (d'après Gregory et Grandin, cité par Breteau, 2010)……...6

**Tableau 2**. La production laitière et la consommation volontaire de matière sèche (CVMS) et d'eau en fonction des températures ambiantes (NRC, 1989)…….37

**Tableau 3**. Effet du stress thermique sur la matière sèche ingérée chez des vaches Holstein élevée en Tunisie suivant leur niveau de production (Rejeb Bellil (2014)……..38

**Dispositif 1**

**Tableau 1.** Paramètres disponibles pour l'analyse statistique de la base de données……...74

**Tableau 2.** Description des 19 exploitations ayant répondu à l'enquête et des pratiques d'élevage, selon la race dominante…….76

**Tableau 3.** Effets du THI et de la race sur la production laitière et la composition du lait …….83

**Tableau 4.** Relation entre les caractéristiques des bâtiments d'élevage et les différences de production laitière entre l'hiver et l'été (*Δ production laitière*)…….89

**Dispositif 2**

**Tableau 1.** Proportions des différents ingrédients et des mélanges (ration mixte et ration « midi ») des rations totales distribuées durant les périodes hivernale ($P_1$) et estivale ($P_2$)…….95

**Tableau 2.** Données météorologiques (moyenne ± écart type) du site expérimental durant les périodes hivernale ($P_1$) et estivale ($P_2$)……..102

**Tableau 3**. Effets du stress thermique sur la fréquence respiratoire (FR), la fréquence cardiaque (FC), la température rectale (TR) et le cortisol du lait…….106

**Tableau 4**. Ingestion et principales caractéristiques nutritionnelles des rations distribuées pendant les périodes hivernale ($P_1$) et estivale ($P_2$)…….108

**Tableau 5.** Effet du stress thermique sur les concentrations plasmatiques du glucose, des acides gras non-estérifiés (AGNE) et du ß-hydroxybutyrate (ß-OH)……..110

**Tableau 6.** Effet du stress thermique sur la production laitière, la composition du lait et les bilans énergétiques et protéiques……..112

**Tableau 7**. Effet du stress thermique sur les lymphocytes, monocytes, éosinophiles, neutrophiles et basophiles…….116

# Introduction

Le changement climatique représente un des dangers majeurs pour la survie de plusieurs espèces et écosystèmes, ainsi que pour la durabilité des systèmes d'élevage à travers le monde, spécialement dans les zones tropicales et les pays tempérés (Das et al., 2016). En effet, le Panel Intergouvernemental sur le Changement Climatique estime que la température du globe terrestre a augmenté de 0,2 °C par décennie depuis le milieu des années 1970 et prédit que la température moyenne à la surface de la planète augmentera de 1,4 à 5,8 °C d'ici 2100 (IPCC, 2007). Il a été aussi convenu que les pays en voie de développement seront les plus touchés par les événements climatiques extrêmes car ils dépendent des secteurs sensibles aux aléas climatiques dont l'agriculture et la foresterie (IPCC, 2007).

La température ambiante et l'humidité relative de l'air sont les principales origines du stress thermique, qui à son tour, exerce une influence directe sur le bien-être des animaux d'élevage et leurs performances (Kadzere et al., 2002 ; Bernabucci et al., 2010). En effet, le stress thermique induit des dysfonctionnements physiologiques et métaboliques importants qui affectent négativement les capacités productive et reproductrice des vaches laitières, ce qui conduit à des pertes économiques énormes dans le secteur laitier (West, 2003 ; Rosenkrans Jr et al., 2010 ; Bernabucci et al., 2014). Par conséquent, il est primordial de connaître les seuils de températures et d'humidité relative pour lesquelles le confort des animaux est maintenu.

Un index température-humidité (**THI**) a été initialement établi par Thom (1959) pour évaluer le confort thermique chez les humains, il a été par la suite élargi aux bovins laitiers par Berry et al. (1964), permettant ainsi de quantifier l'intensité du stress thermique chez ces animaux. Plusieurs études se sont intéressées à définir les seuils de THI au-dessous desquelles le bien-être et la productivité des vaches laitières ne sont pas affectés (Armstrong, 1994 ; Hammami et al., 2013). A cet égard, Wiersma (1990) et Igono et al. (1992) ont proposé un seuil journalier moyen de THI=72 au-delà duquel les vaches laitières commencent à être thermiquement stressées. Néanmoins, Silanikove (2000) et Kadzere et al. (2002) définissent THI=70 comme étant une valeur critique en dessus de laquelle les vaches

laitières sont considérées hors de leur zone de neutralité thermique. Afin de s'adapter à ces conditions environnementales difficiles, l'organisme déclenche une série de mécanismes thermorégulateurs et d'adaptation comportementale (Broom and Johnson, 1993). En effet, pour dissiper la chaleur depuis la surface corporelle vers l'air ambiant et au fur et à mesure que la température centrale augmente, les vaches développent certaines stratégies physiologiques et thermorégulatrices qui incluent des fréquences respiratoires (Shafie, 1985; Yousef, 1985) et des fréquences cardiaques élevées (Rübsamen et Hales, 1985; Du Preez, 2000). Si malgré ces mécanismes, les vaches laitières n'arrivent pas à baisser leur température centrale, alors la température rectale sera plus élevée (Bouraoui et al. 2002 ; Padilla et al., 2006). De même, des adaptations hormonales ont été observées chez les vaches laitières dans le but de faire face à l'augmentation des températures ambiantes. Par exemple, la sécrétion des corticoïdes surrénaliens, dont principalement le cortisol, stimule les réajustements métaboliques internes et permet aux animaux de mieux tolérer des conditions environnementales stressantes (Christison and Johnson, 1972). D'autre part, le stress thermique conduit à la dépression du système immunitaire et augmente l'incidence des mammites (Wegner et al., 1972).

Plusieurs études stipulent que les climats chauds ont tendance à réduire la matière sèche ingérée (MSI) des vaches laitières, et jusqu'à 40 % lorsque la température ambiante dépasse 30 °C (Kadzere, 2002 ; NRC, 2007). Cummins (1992) rapporte que ce déclin est d'autant plus important que lorsque les rations contiennent des fortes teneurs cellulosiques, probablement à cause de l'augmentation de la chaleur issue de la fermentation ruminale. Le stress thermique induit également une réduction de l'activité ruminale mais aussi de l'absorption des nutriments, ce qui va engendrer une réduction non négligeable de la disponibilité de l'énergie et des nutriments pour la synthèse du lait (Collier et Beede, 1985 ; Collier et al., 2005 ; Yasothai, 2014). Il en résulte aussi un bilan énergétique moindre et des changements d'ordre métaboliques importants avec des altérations considérables du métabolisme lipidique et glucidique (Tian et al., 2015 ; Hao et al., 2016). La baisse de l'ingestion et la réduction des apports nutritionnels couplés aux modifications métaboliques entrainent une baisse significative de la productivité des vaches laitières (Faquay, 1981 ; Bernabucci et al., 2010 ; Wheelock et al., 2010). En effet, McDowell et al. (1972) évoquent que lorsque la température ambiante passe de 18 à 30 °C, l'efficience de l'utilisation de l'énergie pour la synthèse du lait est réduite de 35 % et la production laitière de 15 %.

Pareillement, Bouraoui et al. (2002) ont trouvé que sous les conditions climatiques méditerranéennes de la Tunisie, les vaches laitières de race Holstein ont baissé leur production laitière de 21 % lorsque le THI dépasse le seuil critique de 68 et atteint 78 unités. Ce déclin est généralement associé à une altération de la qualité du lait et à une augmentation du comptage des cellules somatiques (CCS) (Nickerson, 1987 ; Du Preez et al., 1990 ; Rejeb et al., 2012). Toutefois, l'effet du stress thermique est très prononcé chez les vaches hautes productrices telles que la race Holstein, car elles présentent une activité métabolique plus intense et génèrent donc plus de chaleur (West, 1994). La sélection intensive pour des productions laitières élevées sans la considération des caractéristiques relatives à la thermorésistance constitue la cause principale de la sensibilité élevée des vaches Holstein aux fortes chaleurs (Bernabucci et al., 2010 ; Hammami et al., 2013). Selon Smith et al. (2013), la sélection génétique pour les races bovines les mieux adaptées à la chaleur nécessite des études et des observations approfondies des différences qui existent entre les différentes races laitières.

Dans un contexte de réchauffement climatique, la Tunisie, ayant un climat méditerranéen avec des étés chauds et secs, sera elle aussi touchée par ces conditions climatiques extrêmes, d'où l'intérêt de sélectionner des races bovines laitières les mieux adaptées à ce climat. La race Tarentaise a été réintroduite en Tunisie dans le cadre d'une politique d'intensification laitière dans les années 1990. Compte tenu de ses nombreux atouts, cette race est bien appréciée par les éleveurs, qui affirment son adaptation aux conditions tunisiennes. En France, pays d'origine de cette race, la Tarentaise fait partie intégrante des traditions alpestres. Les conditions du milieu en Tunisie, certes différentes de celles des régions Alpestres, entraînent un comportement différent de l'animal dont l'adaptation est liée aux aptitudes génétiques et physiologiques qu'il serait intéressant d'étudier. La sélection génétique constitue, certes, une piste intéressante pour faire face aux aléas climatiques, néanmoins, le rôle que joue un microenvironnement adéquat à l'intérieur de l'étable pour alléger les effets du stress thermique, ne doit surtout pas être négligé. En effet, des facteurs comme le design de l'étable influe considérablement le microenvironnement à l'intérieur des exploitations laitières, de par leur contribution à minimiser le gain de chaleur et par conséquent d'améliorer les réponses des vaches laitières face au stress thermique (Stowel et al., 2001; Janni et Allen, 2001). L'alimentation joue

également un rôle primordial dans l'acclimatation des vaches laitières aux conditions environnementales difficiles, cependant, elle a été très peu étudiée.

Ce manuscrit de thèse débutera par une étude bibliographique qui décrit dans un premier chapitre l'homéothermie chez les bovins laitiers, ainsi que le stress thermique et ses indices d'évaluation. Dans un second chapitre, nous nous sommes intéressés aux réponses physiologiques, métaboliques, immunitaires, hormonales et comportementales qu'adoptent les vaches laitières pour faire face au stress thermique. Finalement dans le dernier chapitre de cette synthèse bibliographique, nous allons énumérer les différents moyens et les stratégies possibles pour pallier les effets du stress thermique.

Dans un second lieu et après avoir défini les objectifs de la thèse et les différentes stratégies expérimentales adoptées, nous allons présenter, premièrement, les résultats de l'étude comparative des performances productives des vaches Tarentaise et Holstein sous les conditions climatiques méditerranéennes de la Tunisie. Ces résultats ont été valorisés sous la forme d'une publication parue dans la revue internationale « International Journal of Biometeorology ». La deuxième partie des résultats présente les réponses adaptatives des vaches Tarentaises en pleine lactation face au stress thermique, ainsi qu'une première approche pour comprendre l'importance d'une alimentation équilibrée pour pallier les effets du stress thermique sur la production laitière. Ces résultats seront valorisés dans un article scientifique qui sera soumis très prochainement.

Nous achèverons ce manuscrit par une discussion générale qui permettra d'analyser et de comprendre la réponse adaptative de la race Tarentaise aux conditions du stress thermique en Tunisie, à la lumière des résultats du premier chapitre relatif à l'étude comparative des performances de production des deux races Tarentaise et Holstein dans ces conditions environnementales difficiles.

# Etude Bibliographique

## Chapitre I. Stress thermique chez les ruminants: caractères généraux et principaux moyens de lutte contre la chaleur

Ce chapitre décrit l'homéothermie chez les bovins et particulièrement chez la vache laitière. Il permet aussi de prendre conscience des différents mécanismes thermorégulateurs mis en œuvre par l'organisme pour rétablir l'homéothermie. Ce chapitre décrit également le stress thermique : définitions, indices d'évaluation, THI, etc.

### I. Notion d'homéothermie et définition de la zone de thermo neutralité

#### I.1. Caractères généraux de l'homéothermie

Les ongulés domestiques notamment les bovins laitiers sont des homéothermes, ils maintiennent leur température corporelle constante lorsque les conditions environnementales varient et ceci grâce à la mise en place d'une série de mécanismes thermorégulateurs (O'Reece, 2004). La température corporelle des homéothermes, ou endothermes, est variable selon les espèces de mammifères ou d'oiseaux ; elle est en général comprise entre 36 et 42°C (Hermann et Cier, 1976). De plus, la température létale de la plupart des organes est comprise entre 43 et 45°C ; c'est la température au-delà de laquelle les systèmes enzymatiques commencent à se désintégrer. La température centrale reflète donc au mieux le niveau moyen de l'énergie thermique de l'organisme ; elle s'exprime en degré Celsius. Elle est proche de la température rectale qui varie essentiellement avec l'espèce, l'âge, la race et le niveau de production (Toutain et Combrisson, 1990). Le tableau 1 présente les températures corporelles en degré Celsius, pour les bovins en production.

Pour Baker (1989), la capacité des bovins à réguler la température centrale est une évolution adaptative permettant aux homéothermes de survivre même suite à une élévation importante de la température ambiante. La température corporelle intérieure est donc utilisée comme un signal pour contrôler les processus physiologiques grâce aux thermorécepteurs périphériques et aux unités thermosensibles du système nerveux central (Baker, 1989). En effet, la température centrale chez les bovins semble être le paramètre le plus constant (à l'inverse de la température de la peau qui varie en fonction du milieu) ; elle se mesure au niveau du rectum. C'est un bon indicateur de l'équilibre thermique entre un individu et son environnement. De ce fait, un changement de 1 °C de la température rectale reflète des modifications physiologiques importantes qui sont à l'origine de la baisse de la productivité des vaches laitières. D'où l'importance du maintien de la température interne dans un intervalle très étroit. Ainsi, les grandes fonctions physiologiques et les réactions métaboliques de l'organisme s'effectueront dans des conditions optimales (Morand-Fehr et Doreau, 2001). L'homéothermie requiert donc que la chaleur produite ou emmagasinée soit égale à la chaleur perdue dans l'environnement.

**Tableau 1**. Températures physiologiques en degrés Celsius chez les bovins (d'après Gregory et Grandin, cité par Breteau, 2010).

| | Température rectale (°C) | Intervalle physiologique |
|---|---|---|
| Vache laitière | 38,6 | 38 - 39,3 |
| Bovin à viande | 38,3 | 36,7 - 39,1 |
| Veau nouveau-né | 39,5 | 38,7 -39,9 |

### I.2. La zone de neutralité thermique

La zone de neutralité thermique, ou thermoneutralité, peut être définie comme étant la zone où la chaleur interne produite par l'organisme est à son minimum tout en ayant une température rectale normale (Kadzere et al., 2002). Elle correspond au segment de températures qui n'entraîne pas une élévation ou une diminution de la chaleur interne pour assurer la régulation thermique. C'est aussi la gamme de températures pour lesquelles la thermogenèse (production de chaleur) est à son minimum et la thermolyse (perte de chaleur) se fait uniquement par des processus physiques autres que l'évaporation (Toutain et Combrisson, 1990). Elle est délimitée par la température critique inférieure et la température

critique supérieure et varie selon l'espèce, l'âge, la race, le stade physiologique de l'animal, la prise alimentaire, la composition du régime alimentaire et les conditions spécifiques des bâtiments d'élevage (Fuquay, 1981 ; Young 1981 ; Shearer et Beede, 1990b). Igono et al. (1992) ont trouvé que la production laitière optimale des vaches Holstein élevées dans un environnement désertique était obtenue pendant la période de neutralité thermique, c'est-à-dire lorsque la température ambiante (**Ta**) ne dépasse pas 21 °C. Donc plus l'animal s'éloigne de cette zone, plus les fortes températures seront susceptibles de modifier négativement les processus de production.

La zone de neutralité thermique, comme l'indique la figure 1, est subdivisée en trois sous-zones : une zone froide, une zone de confort thermique et une zone chaude. La zone froide correspond à la plage de température ambiante où la production de chaleur reste minimale et l'animal économise de l'énergie par isolation de couverture (horripilation), isolation des tissus (vasoconstriction périphérique) et production de la chaleur induite par le froid (frissons). Par contre, la zone du confort thermique se situe au milieu de plage de la température ambiante à laquelle la production et le rendement sont à leur optimum. La zone chaude est la plage de température ambiante où la production de chaleur est minime, et les réponses thermorégulatrices sont limitées par la baisse de la protection des tissus par vasodilatation et l'augmentation de la surface d'échange en changeant de position (Anderson et Bates, 1984 ; Yousef, 1985).

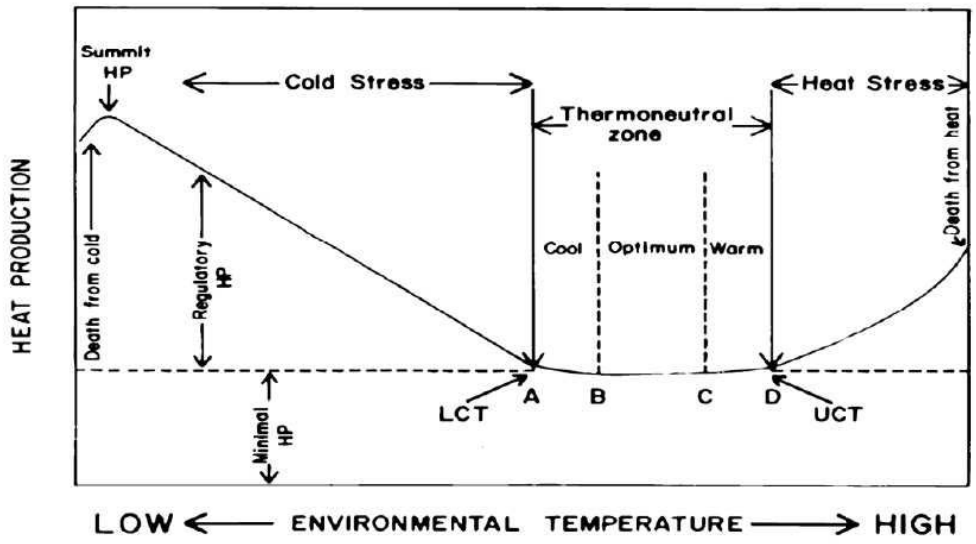



**Figure 1.** Représentation de la production de chaleur en fonction de la température ambiante, mettant en évidence la zone de thermoneutralité (Yousef, 1985)

### I.2.1. La température critique inférieure

La température ambiante en dessous de laquelle le taux de la production de chaleur d'un homéotherme doit augmenter pour maintenir l'équilibre thermique constitue la température critique inférieure (**TCI**, ou LCT en anglais, figure 1). Cela implique que le taux de la production de chaleur est dépendant du niveau thermique ambiant au-dessous de la TCI (Yousef, 1985). En dessous de cette température, le processus de thermorégulation est déclenché suite aux signaux envoyés par le centre hypothalamique thermorégulateur, et par conséquent, la production de chaleur interne augmente au-dessus du seuil minimal (Anderson et Bates, 1984). Toutain et Combrisson (1990) stipulent que lorsque l'animal est en dessous de la TCI, ce dernier est considéré comme étant dans une zone de lutte contre le froid et doit donc augmenter sa thermogenèse pour atteindre un maximum qualifié de métabolisme de sommet.

Pour certains auteurs, les vaches à fortes production laitières (>30kg/j de lait) ont une TCI inférieure à celle des autres vaches, c'est-à-dire qu'elles sont plus résistantes au froid (TCI allant de -16 à -37 °C). En effet, ceci pourrait être expliqué par le fait que les vaches hautes productrices sont caractérisées par une augmentation substantielle de la production de chaleur métabolique (Hamada, 1971 ; Kadzere et al., 2002).

### I.2.2 La température critique supérieure

La température critique supérieure (**TCS**, ou UCT en anglais, figure 1) est la température de l'air à partir de laquelle l'animal diminue sa production de chaleur en réponse à une augmentation de la température corporelle, due à une perte inadéquate de chaleur par évaporation (Yousef, 1985). Quand la température ambiante dépasse la TCS et par la suite la température létale, l'animal n'est plus en mesure à maintenir sa température interne constante. Le centre hypothalamique thermorégulateur déclenche alors une série d'actions thermorégulatrices qui consistent à augmenter le flux sanguin des organes internes vers le tégument, la transpiration et le halètement, et à réduire la prise alimentaire et l'absorption des nutriments (Shearer et Beede, 1990b).

Les plages de la TCS ont été mesurées à partir d'études faites sur des vaches laitières exposées pendant de courtes durées à des températures constantes et régulières dans des chambres climatiques (Kibler, 1964). Ainsi, quand la charge thermique dépasse la capacité de dissiper la chaleur par voie évaporative, la température corporelle augmente, et si cette dernière n'est pas régulièrement contrôlée, l'animal peut mourir d'hyperthermie. Donc, dans les climats chauds, le potentiel de perte de chaleur par voie non-évaporative est réduit et l'animal dépendra de l'évaporation de l'eau pour dissiper l'excès de chaleur générée par les réactions métaboliques (McArthur et Clark, 1988).

La TCS est généralement comprise entre 25 et 26 °C pour les vaches laitières, indépendamment d'une préalable acclimatation ou de leurs productions laitières (Berman et al., 1985). Igono et Johnson (1990) ont montré que les vaches à forte production laitière en début de lactation sont plus sensibles à la chaleur et que la production laitière diminue de façon significative lorsque la température rectale dépasse 39 °C pendant plus de 16 heures. De même, Purwanto et al. (1990) ont rapporté que les vaches à haute production laitière (31,6 kg/j) et celles produisant 18,5 kg/j génèrent respectivement 48,5 et 27,3 % plus de chaleur que les vaches taries. Ceci a été attribué au fait que la production laitière élevée nécessite un apport nutritionnel important qui génère donc une importante production de chaleur métabolique (Kadzere et al., 2002).

Au-delà de la zone de neutralité thermique, l'animal fait des efforts supplémentaires pour s'adapter à son environnement, par la mise en place de mécanismes thermorégulateurs

d'adaptation. Ces mécanismes peuvent être biochimiques, physiologiques ou métaboliques et permettent de maintenir la chaleur interne constante, mais au détriment des performances productives et reproductives des vaches laitières.

## II. Principaux mécanismes de la thermorégulation

Chez les mammifères la température corporelle est maintenue à un niveau relativement constant grâce à la l'équilibre qui s'établit entre la production de chaleur (thermogenèse) et la perte de chaleur (thermolyse). La thermogenèse et la thermolyse représentent donc les facteurs de l'équilibre thermique des homéothermes qui permettent de garder au mieux la température centrale constante (Holmes et Close, 1977 ; Silanikove, 2000). Cet équilibre est donné par l'équation suivante, élaborée par Berman et al. (1985) :

**M = HS + K+ C + R + E** ; M= production de chaleur métabolique, HS = chaleur emmagasinée, K = échange de chaleur pas conduction, C = échange de chaleur par convection, R = échange de chaleur par rayonnement, E = échange de chaleur par évaporation.

### II.1. La thermogenèse

La chaleur produite par l'organisme est une résultante du métabolisme de l'animal ; elle varie pour équilibrer la perte de chaleur vers l'extérieur, afin de maintenir une température corporelle constante chez l'animal (Silanikove, 2000). Chez les vaches laitières, la production de l'énergie calorique, issue des processus métaboliques, est nécessaire pour la régénération cellulaire, la synthèse des tissus de l'organisme et surtout pour la production laitière. Cependant, cette énergie est aussi perdue sous forme de méthane, de gaz respiratoires, de fèces et d'urines (Kadzere et al., 2002). Yousef (1985) définit la thermogenèse comme étant la mesure de la somme totale des transformations d'énergie qui s'établissent dans l'organisme de l'animal à un moment donné. En effet, la thermogénèse se mesure par calorimétrie indirecte à travers l'appréciation de la consommation d'oxygène et les rejets de gaz carbonique, de méthane et d'urine chez les ruminants. La thermogenèse de base correspond à la production thermique minimale enregistrée chez l'animal au repos, à jeun et dans les conditions de neutralité thermique. Elle se mesure par calorimétrie directeet s'exprime en Joule (Toutain et Combrisson, 1990).

La thermogenèse est directement contrôlée par le système nerveux central, par le système endocrinien à travers des modifications au niveau de l'appétit et de la digestion, et indirectement par les modifications de l'activité des enzymes respiratoires et de la synthèse des protéines (Hammel, 1968 ; Yousef, 1985). La température ambiante influe sur la quantité de matière sèche ingérée, sur la production et la thermorégulation, ce qui modifie largement la quantité de chaleur produite (Brody, 1945). D'autre part, ayant un effet important sur le métabolisme, les concentrations des hormones comme la thyroxine, la triiodothyronine, l'hormone de croissance et les glucocorticoïdes sont étroitement liées à thermogénèse (Yousef et Johnson, 1966). D'autres facteurs influent sur la thermogenèse chez les mammifères, comme la taille du corps (Brody, 1945), l'environnement (Salem et al., 1982), l'espèce, la race, la disponibilité en eau et l'alimentation (Graham et al., 1959). Kibler et Brody (1954a, b) ont montré un effet race au niveau de la thermogénèse entre les vaches Jersey et Holstein, qui peut être attribué à la différence de gabarit.

### II.1.1. Production de chaleur pour les besoins d'entretien

La thermogenèse est primordiale pour subvenir aux besoins énergétiques de la vache laitière, surtout pour l'entretien des fonctions vitales de l'organisme. Selon les tables de l'INRA (2007), ces besoins énergétiques, liés à l'entretien, augmentent avec le poids métabolique des vaches laitières à raison de + 0,041 UFL/kg PV $^{0,75}$ soit une augmentation marginale d'environ + 0,006 UFL/kg PV. De même, l'INRA (2007) suggère que ce besoin énergétique doit être augmenté de 10% en stabulation libre avec une aire d'exercice et de 20% au pâturage.

Blaxter (1961) rapporte que l'efficience de l'utilisation de l'énergie métabolisable (**EM**) pour l'entretien est relativement stable, d'après les résultats de ses études calorimétriques portant sur des régimes alimentaires de nature différente. Cependant l'Agricultural Research Council britannique (ARC, 1980) a décrit la variation dans l'efficacité d'utilisation de l'énergie d'entretien ($k_m$) comme étant une fonction du pourcentage de l'énergie métabolisable dans les rations ($Q_m$) de la manière suivante : $\mathbf{k_m = 54{,}6 + 0{,}30 \times Q_m}$.

Taylor et al. (1986) ont suggéré que l'efficacité avec laquelle l'énergie est utilisée pour les processus de maintien des fonctions vitales est variable entre les races et les individus. De même, Kadzere et al. (2002) rapportent qu'il est difficile d'évaluer séparément les

besoins énergétiques d'entretien et l'énergie nécessaire à la production du lait chez un animal en lactation. En effet, Moe et al. (1972) ont réussi à identifier la relation entre la quantité des rations et l'efficience de la production laitière et ont exprimé les besoins énergétiques journaliers en fonction de l'énergie nette pour la lactation (**$EN_l$**). Les besoins d'entretien ont été estimés à 29,2 et 26,6 kJ d'EM ou 18,9 et 16,2 kJ d'$EN_l$/ $kg^{0,75}$.

### II.1.2.Principaux facteurs responsables de l'augmentation de la thermogenèse

Webster et al. (1976) ont discuté d'autres mécanismes de production de chaleur y compris le niveau d'alimentation et la rumination, ainsi que la chaleur produite par la fermentation dans le rumen et l'augmentation de la chaleur produite par les tissus du foie et de l'intestin. Selon Webster et al. (1975), cette augmentation du niveau d'énergie est variable selon la nature de la ration ; elle est de 11J/kJ d'EM pour les fourrages agglomérés, et de 151J/kJ d'EM pour l'herbe fraîche. Ils ont conclu que la dépense énergétique de la rumination pourrait être considérée comme un facteur contribuant à l'augmentation de la chaleur interne. Webster et al. (1976) ont conclu que les processus d'ingestion et de digestion contribuent à environ 25-30 % de la totalité de l'accroissement de la production de chaleur. Armstrong et Blaxter (1957) stipulent que la variation de l'augmentation de la chaleur interne serait en grande partie attribuable à la nature des substrats disponibles pour le métabolisme corporel.

D'autre part, la température ambiante influence de différentes manières l'utilisation totale de l'énergie. En effet, sous des conditions climatiques modérées à chaudes (Ta=15 °C et Ta > 25 °C, respectivement), la vache laitière gagne de la chaleur à partir des rayonnements solaires et des processus métaboliques usuels (Kadzere et al., 2002). En effet, la radiation solaire constitue aussi un facteur important influençant la production de chaleur, lorsque tout ou une partie de l'environnement ambiant est plus froid que la surface de l'animal. En effet, la radiation se fait grâce à des rayonnements électromagnétiques, et la charge thermique provenant du rayonnement solaire est absorbée par l'animal dont la surface est exposée au soleil (Toutain et Combrisson, 1990). Ainsi, la quantité de chaleur absorbée par un objet quelconque à partir des rayonnements solaires directs, dépend non seulement de la température de cet objet mais aussi de sa couleur et sa texture. En effet, à la même température ambiante, les surfaces sombres absorbent d'avantage de chaleur que les surfaces claires (Silanikove, 2000). Un animal avec une robe de couleur foncée aurait une

absorption de 1,0 de la radiation solaire directe, alors que celui avec une robe claire aurait une absorption de 0.37 (Cena et Monteith, 1975).

Lee (1965) a aussi pris en compte toute une compilation de variables constituant l'environnement : température, humidité, circulation de l'air, radiations et précipitations. Cependant, pour cet auteur, l'effet de l'environnement sur la thermogenèse est lui aussi variable en fonction des caractéristiques de l'animal (espèce, race, sexe, âge, statut métabolique, pelage, acclimatation, nutrition et hydratation, maladie et variabilité individuelle) et en fonction de ses potentiels de production et de reproduction. Ceci illustre bien la complexité de la description et de la prédiction de l'impact de l'environnement sur la thermorégulation des bovins laitiers.

## II.2. La thermolyse

Pour comprendre les mécanismes de la thermolyse chez les animaux, il est important de rappeler que la température corporelle est relativement constante grâce à l'équilibre qui existe entre la thermogenèse et la thermolyse (figure 2 ; Fuquay, 1981).

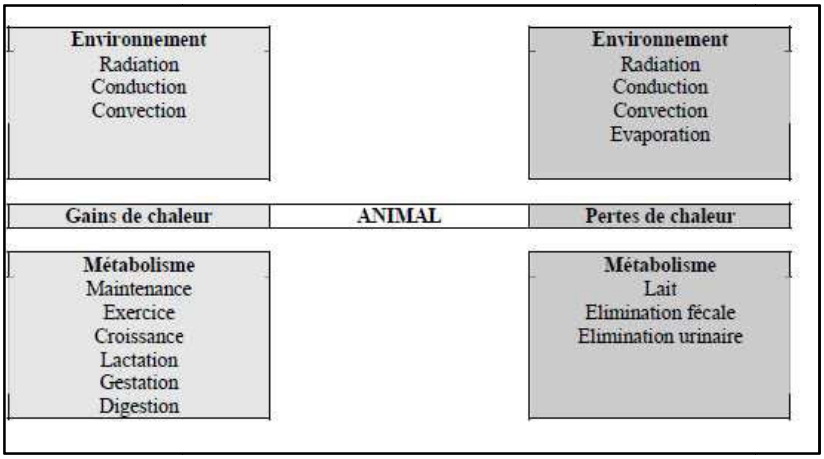



**Figure 2.** Les différents intervenants de la thermorégulation (Fuquay, 1981).

La thermolyse constitue un mécanisme de lutte contre la chaleur par la déperdition de l'énergie calorique en adoptant l'une de ces deux voies (figure 3) : la thermolyse directe ou voie non évaporative dite sensible (radiation, convection et conduction) et la thermolyse indirecte ou la voie évaporative dite insensible, qui représente le moyen le plus efficace pour la lutte contre la chaleur (Berman et al., 1985 ; Toutain et Combrisson, 1990 ; Kadzere et al.,

2002). La thermolyse se mesure par calorimétrie directe et s'exprime en Joule (Toutain et Combrisson, 1990).

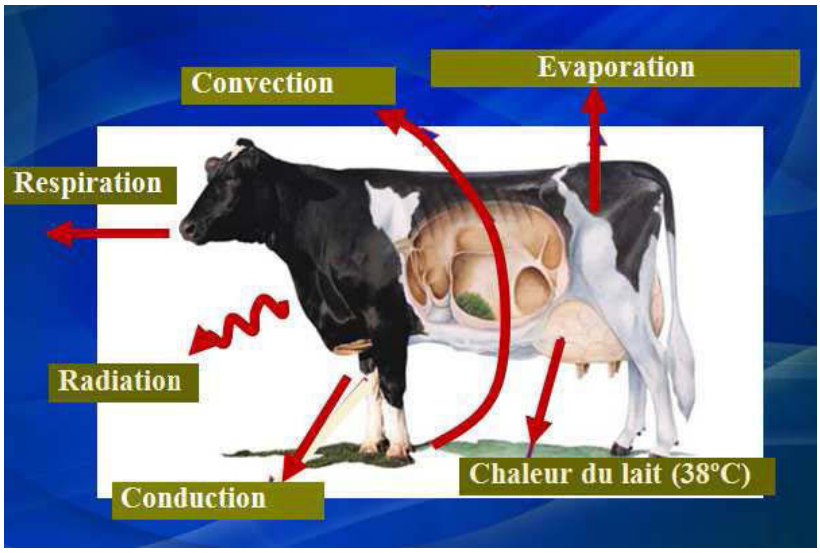



**Figure 3**. Représentation des différents échanges thermiques mis en jeu pour la thermolyse (d'après Kettelwell et al., 2003)

### II.2.1. La thermolyse directe (radiation, convection et conduction)

Le transfert de chaleur radiante entre deux corps prend place dans les deux sens ; si les deux corps ont une température différente, il y aura un transfert net de chaleur depuis le corps le plus chaud vers le moins chaud (Esmay, 1969). En effet, ce transfert de chaleur implique la perte de chaleur par irradiation à travers la réflexion des ondes électromagnétiques infrarouges. Dans leurs expérimentations utilisant des charges thermiques par rayonnements artificiels, Stewart et Brody (1954) ont trouvé que les vaches n'ont pas réagi à la radiation sous une température ambiante de 7,2 °C. Cependant, à des températures de 21,1 °C et 26,7 °C, les vaches Jersey avaient une production de chaleur moyenne de 12 à 14 % en moins, avec une charge thermique par rayonnement maximale. D'autre part, les vaches Holstein ont manifesté des baisses de production de chaleur qui étaient de l'ordre de 26 % à 21,1 °C et de 9 % à 26,7 °C. Dans cette même expérimentation, les vaches Brahman ont montré une réponse beaucoup moins marquée à la radiation puisque

elles n'ont pas augmenté leur production de chaleur. Ces auteurs ont conclu que le manque de réponse observé sur les vaches Brahman, était sûrement dû à leur taux de thermogenèse relativement bas; de ce fait, leur besoin de dissipation de chaleur ne dépassait pas la moitié de ceux des vaches Jersey et Holstein.

Quand l'air frais rencontre un corps chaud, la couche d'air qui entoure la surface du corps est d'abord chauffée puis, s'élève et s'éloigne de ce corps en transportant de la chaleur. Le corps perd alors de la chaleur grâce au phénomène de la convection. Cependant, si la température ambiante est plus élevée que la température de la peau, alors le mouvement de l'air s'établira de sorte que la température ambiante soit égale à la température corporelle jusqu'à ce que le transfert de chaleur cesse (Silanikove, 2000). Le transfert de chaleur pendant la respiration constitue aussi une forme de thermolyse convective. L'air inspiré est ajusté à la température corporelle une fois qu'il atteint la trachée (Yousef, 1985).

Le flux thermique entre deux objets ou deux corps en contact direct est décrit comme étant un échange de chaleur par conduction. Toutain et Combrisson (1990) définissent la conduction comme étant le transfert de chaleur qui s'établit entre un animal et son environnement par l'intermédiaire d'un contact matériel. Elle dépend de la surface d'échange entre un objet et l'animal, de la température de cette surface qui est généralement la peau, de la température de l'air et du facteur de conduction propre à la peau. Pour les vaches hautes productrices, il est important de savoir que l'intensité de l'échange de chaleur par conduction dépend aussi de la nature des matériaux de litière qui sont en contact avec la peau, en particulier avec sa conductivité thermale (Silanikove, 2000). La vasodilatation cutanée permet l'accroissement des pertes par convection. Pour une thermolyse plus efficace, la vasodilatation des vaisseaux cutanés apparaît rapidement et le débit sanguin cutané augmente. Ce phénomène est amplifié par une microcirculation périphérique favorisée et une fermeture des shunts artério-veineux. En effet, dans les conditions normales, 75 % du débit sanguin passe par les shunts et 25 % par les capillaires alors que dans des conditions de Ta élevée, ce phénomène est inversé Cependant, tous ces mécanismes ne sont utilisables et efficaces que si la température extérieure est inférieure à celle du corps. Dans le cas contraire, l'animal emmagasine de la chaleur et le seul mécanisme restant est l'évaporation d'eau (Thibault, 2000).

Pour conclure, l'ensemble convection et conduction représente 12 % des pertes caloriques au repos. Ce sont essentiellement ces phénomènes qui régissent les échanges de chaleur entre le noyau central et l'enveloppe périphérique de l'organisme (Toutain et Combrisson, 1990).

### II.2.2. La thermolyse indirecte ou l'évaporation

Le refroidissement via la voie évaporative, depuis la surface externe d'un bovin, est un processus important (Kadzere et al., 2002). Cette méthode de dissipation de chaleur est la plus efficace dans les conditions environnementales chaudes et humides. La proportion de la chaleur métabolique qui est dissipée depuis le corps de l'animal augmente avec des températures ambiantes élevée, mais aussi avec des gradients de températures faibles entre l'animal et l'air. Johnson (1976) a montré que le ratio [refroidissement par évaporation / chaleur totale dissipée] variait selon les espèces, et que ce ratio chez les bovins commençait à augmenter significativement à des températures ambiantes de 16,6 à 18,3 °C. En effet, sous des conditions de Ta élevée, les bovins augmentent le processus de thermolyse par évaporation par le biais du halètement et de la transpiration (McLean, 1963). L'évaporation se fait donc au niveau de la peau ou par des échanges respiratoires. En effet, l'évaporation d'un gramme d'eau représente une perte de 2400 J pour l'animal. Ainsi, un bovin de 600 kg perd en moyenne 12 L d'eau par jour dans des conditions favorables. L'évaporation dépend du gradient d'humidité relative entre les surfaces de l'animal en contact avec l'air et l'air lui-même (Larroy et al., 1995 ; Toutain et Combrisson, 1990).

Les facteurs influant l'efficacité de la thermolyse par voie évaporative, sont généralement représentés par la densité et la fonction des glandes sudoripares, la densité et l'épaisseur du pelage, la longueur et la couleur du poil, et la régularité de l'approvisionnement vasculaire vers le tissu épidermique (Bernabucci et al., 2010). Les bovins possèdent une seule glande sudoripare associée à chaque fibre capillaire, la densité capillaire affecte ainsi directement le nombre des glandes sudoripares. D'autre part, le diamètre et la longueur du poil affectent la thermolyse par voie évaporative (Gebremedhin et Wu, 2001 ; Olson et al., 2006).

Dans les climats chauds le potentiel de dissipation de chaleur par voie non-évaporative est réduit et les animaux s'appuient uniquement sur l'évaporation de l'eau pour dissiper

l'excès de chaleur produite par le métabolisme (McArthur et Clark, 1988). Cependant, l'efficacité de la thermolyse par évaporation diminue considérablement avec un degré d'humidité relative important. Ceci a été démontré par le fait que la production laitière à 32 °C chutait entre 20 % et 45 % d'humidité relative (Johnson et Vanjonack, 1976). Cette différence d'humidité relative a réduit la respiration évaporative ainsi que la surface d'évaporation, ce qui a induit l'augmentation de la température rectale, la chute de la prise alimentaire et de la production laitière (Kadzere et al., 2002).

## III. Le stress thermique

### III.1. Définition du stress thermique

Dans les environnements difficiles, le stress chez les animaux d'élevage est une réaction de réflexe qui a des conséquences néfastes pouvant parfois conduire à la mort (Das et al., 2016). En effet, le stress débute lorsque l'animal, pour s'adapter à son environnement, fait des efforts physiologiquement inhabituels et tente de rétablir son homéostasie. L'organisme lutte alors contre les agents stressants par le déclanchement d'une série de réponses (biochimiques, physiologiques et comportementales) qui porte atteinte au bien-être de l'animal et à son homéostasie, primordiaux à une production et à une reproduction satisfaisantes (Breteau, 2010). Ce stress peut être thermique, nutritionnel, social, ou provenir de désordres physiologiques ou métaboliques (Besnard, 1985).

Les températures très hautes ou très basses associées à une humidité relative élevée sont les principales origines du stress thermique. En règle générale, chez les ruminants, le stress thermique est souvent induit par la hausse des températures ambiantes. Bernabucci et al. (2014) soulignent que le stress thermique est atteint lorsque l'animal n'arrive plus à dissiper sa chaleur interne de manière adéquate. Ce qui provoque alors des dysfonctionnements physiologiques rapides qui affectent négativement la production et la reproduction des vaches laitières, conduisant ainsi à d'énormes pertes économiques (West et al., 2003 ; Rosenkrans Jr et al., 2010).

Yousef (1985) définit le stress thermique comme étant l'effet des forces liées aux fortes températures qui induisent des ajustements au niveau des cellules de l'animal dans le but d'aider la vache à éviter ces dysfonctionnements physiologiques et à mieux s'adapter à son environnement. Piton (2004) explique que lorsque l'animal est en stress thermique, il

entre en hyperthermie, ce qui va nécessairement l'amener à rétablir son équilibre thermique au détriment de sa capacité productive et reproductive. En effet, la capacité des homéothermes à maintenir la température corporelle interne dans les normes est essentielle pour le bon fonctionnement des processus physiologiques et les réactions biochimiques qui reflètent un métabolisme sain (Shearer et Beede, 1990). Donc, afin de maintenir son homéostasie, la vache laitière doit être en équilibre thermique avec son environnement qui est principalement conditionné par le rayonnement solaire, la température de l'air, le mouvement de l'air et l'humidité (Kadzere et al., 2002).

Les animaux d'élevage et plus précisément les vaches laitières préfèrent les températures ambiantes qui sont comprises entre 5 et 25 °C. Dans cette zone de thermoneutralité, les vaches laitières maintiennent une température physiologique interne de l'ordre de 38,4 à 39,1 °C (Yousef, 1985 ; Roenfeldt, 1998). A des températures ambiantes supérieures à 26 °C, le gain de chaleur est supérieur à la chaleur dissipée par l'organisme, ce qui entraîne un stress thermique chez la vache laitière, qui ne peut désormais plus se refroidir de façon adéquate (Vale, 2007 ; Sunil Kumar et al., 2011).

Les vaches laitières subissant un stress thermique, selon plusieurs études, ont une production laitière moindre de 15 à 20 %, mais aussi un taux de conception réduit de 20 à 30% par rapport aux vaches laitières non exposées au stress thermique (St-Pierre et al., 2003 ; West, 2003 ; Garcia-Ispierto et al., 2006). Il est donc primordial, pour le bien-être des vaches laitières, mais aussi pour limiter les pertes économiques, de connaître les seuils de températures ambiantes et d'humidité relative pour lesquels la production n'est pas modifiée.

### III.2. Les indices d'évaluation du stress thermique

Dans les climats chauds, les fortes températures ambiantes, les radiations solaires (directes ou indirectes), l'humidité relative de l'air et l'absence de vent constituent les principaux facteurs environnementaux imposant un stress thermique aux animaux (Finch, 1984). La mesure de la plage de température ambiante dans laquelle l'homéostasie est maintenue semble être primordiale pour déterminer l'environnement adéquat d'une espèce ou d'une race particulière (Finch, 1984). Ainsi, il est possible de mesurer ou calculer des indices pour estimer le stress thermique ; ces indices vont de la simple mesure de la

température ambiante aux mesures qui essayent de fournir une estimation pondérée de tous les facteurs environnementaux précédents. La température de rayonnement, mesurée avec un capteur « globe noir » (appelée communément « température globe noir »), combine les effets des rayonnements entrants totaux depuis le soleil, l'horizon, le sol et tous les autres objets ayants une température ambiante, avec une vitesse de vent (Bond et Kelly, 1955). La combinaison de la température globe noir avec la température humide (appelée communément « température du thermomètre mouillé ») permet de calculer l'indice de température au thermomètre-globe mouillé (Buffington et al., 1983). Cet indice composite (ou index) représente probablement l'un des meilleurs indices pour estimer le stress thermique dans les espaces ouverts. Cependant, il représente seulement 24 % de la variation de la chute de la production du lait chez les vaches laitières en relation avec le stress thermique (Buffington et al., 1983), en partie à cause des variations individuelles importantes et parce que l'animal est relié à son environnement d'une manière beaucoup plus complexe que celle représenté par cet index.

Le rayonnement solaire a un effet majeur sur la thermorégulation des ruminants au pâturage (Gebremedhin, 1985). Yamamato et al. (1994) ont calculé une température « effective » (effective temperature, **ET**) à partir de la température ambiante (dry bulb temperature, **DBT**) et du rayonnement (black globe temperature, **BGT**) par une analyse de régression multiple utilisant la fréquence respiratoire et la température corporelle comme variables dépendantes. Ils ont trouvé que : $\mathbf{ET = 0{,}24 \times DBT + 0{,}76 \times BGT}$. Cette équation suggère que les rayonnements solaires de courte ou grande longueur d'onde, mesurés par la température du globe noir, contribuent considérablement plus à la charge thermique que ne le fait la température ambiante.

Baeta et al. (1987) ont développé l'**ETI** (equivalent temperature index), index basé sur la combinaison des effets de la température, de l'humidité et le mouvement de l'air, pour les vaches laitières logées dans des conditions où la température est supérieure à la zone de neutralité thermique. L'exclusion du rayonnement solaire et l'inclusion de la vitesse du vent ont permis un index ETI plus réaliste, pour une évaluation plus complète de l'état de l'organisme. Cependant, Gaughan et al. (2008) ont développé un index plus large, le **HLI** (heat load index) ; il intègre la température du globe noire (**BG**), l'humidité relative (**RH**) et la vitesse du vent (**WS**), et son expression varie en fonction de la race concernée. Deux

équations différentes ont été établies. Si la température du globe noire est strictement supérieure à 25 °C alors le **HLI=8,62 + (0,38 × RH) + (1,55 × BG) − (0,5 × WS) + e** $^{2,4 - WS}$. Par contre si BG est strictement inférieure à 25 °C, alors le **HLI= 10,66 + (0,28 × RH) + (1,3 × BG) − WS**. Si HLI est strictement inférieur à 70, alors les animaux sont considérés en conditions de thermoneutralité. Cependant, si HLI dépasse la valeur seuil de 86, les conditions climatiques sont considérées comme extrêmement chaudes et les bovins seront moins capables de dissiper la chaleur. Ces seuils sont réduits de 5 unités si les bovins sont malades ou ne sont pas acclimatés aux conditions climatiques estivales (Gaughan et al.,2008).

### III.3. Evaluation du stress thermique par l'index humidité-température

Le stress thermique chez la vache laitière conduit à une chute considérable de la production laitière amenant à d'énormes pertes économiques (West et al., 2003 ; Wheelock et al., 2010). Il est donc primordial, afin de limiter ces pertes, de connaître les seuils de température ambiante et d'humidité relative pour lesquels le confort des animaux est maintenu. A cet égard, un index température-humidité (temperature humidity index, **THI**) a été proposé pour la première fois pour les humains par Thom (1959) puis élargi par la suite aux bovins laitiers par Berry et al. (1964). Cet index constitue un indicateur permettant d'évaluer le niveau de stress thermique chez la vache laitière (Johnson, 1985 ; Bohmanova et al., 2007).

Les formules mathématiques qui permettent de calculer cet index varient d'une expérimentation à une autre (Kibler, 1964 ; McDowell et al., 1976). Il est largement appliqué depuis les climats tempérés jusqu'aux climats chauds et humides, permettant ainsi de tenir compte des conditions environnementales liées à la vitesse du vent et aux charges du rayonnement thermique (NOAA, 1976). Le THI constitue un facteur standard pour la classification des ambiances thermiques dans de nombreuses expérimentations animales, dans le but de mieux gérer les systèmes d'élevages pendant la saison estivale (Hahn et al., 2003). Combinant température ambiante et humidité relative, cet index a été validé comme plus efficace que la température seule dans l'évaluation des aléas climatiques sur la vache laitière (Igono et al., 1992), car lorsque les températures ambiantes sont élevées, l'action de la température est accentuée par l'humidité relative élevée de l'air (Bianca, 1965 ; Fuquay, 1981). McDowell et al. (1976) suggèrent aussi que le THI est un bon indicateur des

conditions climatiques stressantes. Le THI est calculé alors en fonction de la température humide (Wet bulb temperature, **W**) et de la température sèche (dry bulb temperature, **D**), pour un jour bien déterminé, suivant cette équation : **THI= 0,72 × (W+D) + 40,6**. Cependant, d'autres équations ont été aussi élaborées par plusieurs auteurs dont Kibler (1964) [**THI=1,8×Ta – (1-HR) × (Ta-14,3) + 32**] et Hahn (1999) [**0,81×Ta + HR × (Ta – 14,4) + 46,4**] ; Ta étant exprimé en °C et HR étant l'humidité relative exprimée en %.

Différentes classes de THI ont été établies dans le but de qualifier l'effet du stress thermique sur les caractéristiques de production chez la vache laitière (Hammami et al., 2013a). En effet, de nombreuses publications se sont basées sur l'index THI pour délimiter les zones du bien-être de l'animal et du stress thermique (Bianca, 1962 ; McDowell et al., 1976 ; Fuquay, 1981). Les classifications de THI varient selon l'intensité des réponses physiologiques et productives (principalement la production laitière) des bovins face au stress thermique. L'évaluation de ces réponses a permis de classer le niveau d'impact du stress thermique sur les bovins: stress léger, modéré et sévère (Whittier, 1993 ; Armstrong, 1994).

Wiersma (1990) a développé un diagramme de THI qui prend en compte la température ambiante et l'humidité relative pour estimer l'intensité du stress thermique. Il a établi les classes suivantes : pas de stress pour une valeur de THI inférieure à 72 ; léger stress entre 72 et 78 ; stress sévère pour la vache laitière entre 78 et 89 ; au-dessus de la valeur 89 le stress devient très important et lorsqu'il dépasse la valeur de 96 celui-ci provoque la mort de l'animal. (Figure 4).

| Themperature | | % Relative Humidity | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| °F | °C | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 65 | 70 | 75 | 80 | 85 | 90 |
| 72 | 22.0 | 64 | 65 | 65 | 65 | 66 | 66 | 67 | 67 | 67 | 68 | 68 | 69 | 69 | 69 | 70 | 70 | 70 | 71 | 71 |
| 73 | 23.0 | 65 | 65 | 66 | 66 | 66 | 67 | 67 | 68 | 68 | 68 | 69 | 69 | 70 | 70 | 71 | 71 | 71 | 72 | 72 |
| 74 | 23.5 | 65 | 66 | 66 | 67 | 67 | 67 | 68 | 68 | 69 | 69 | 70 | 70 | 70 | 71 | 71 | 72 | 72 | 73 | 73 |
| 75 | 24.0 | 66 | 66 | 67 | 67 | 68 | 68 | 68 | 69 | 69 | 70 | 70 | 71 | 71 | 72 | 72 | 73 | 73 | 74 | 74 |
| 76 | 24.5 | 66 | 67 | 67 | 68 | 68 | 69 | 69 | 70 | 70 | 71 | 71 | 72 | 72 | 73 | 73 | 74 | 74 | 75 | 75 |
| 77 | 25.0 | 67 | 67 | 68 | 68 | 69 | 69 | 70 | 70 | 71 | 71 | 72 | 72 | 73 | 73 | 74 | 74 | 75 | 75 | 76 |
| 78 | 25.5 | 67 | 68 | 68 | 69 | 69 | 70 | 70 | 71 | 71 | 72 | 73 | 73 | 74 | 74 | 75 | 75 | 76 | 76 | 77 |
| 79 | 26.0 | 67 | 68 | 69 | 69 | 70 | 70 | 71 | 71 | 72 | 73 | 73 | 74 | 74 | 75 | 76 | 76 | 77 | 77 | 78 |
| 80 | 26.5 | 68 | 69 | 69 | 70 | 70 | 71 | 72 | 72 | 73 | 73 | 74 | 75 | 75 | 76 | 76 | 77 | 78 | 78 | 79 |
| 81 | 27.0 | 68 | 69 | 70 | 70 | 71 | 72 | 72 | 73 | 73 | 74 | 75 | 75 | 76 | 77 | 77 | 78 | 78 | 79 | 80 |
| 82 | 28.0 | 69 | 69 | 70 | 71 | 71 | 72 | 73 | 73 | 74 | 75 | 75 | 76 | 77 | 77 | 78 | 79 | 79 | 80 | 81 |
| 83 | 28.5 | 69 | 70 | 71 | 71 | 72 | 73 | 73 | 74 | 75 | 75 | 76 | 77 | 78 | 78 | 79 | 80 | 80 | 81 | 82 |
| 84 | 29.0 | 70 | 70 | 71 | 72 | 73 | 73 | 74 | 75 | 75 | 76 | 77 | 78 | 78 | 79 | 80 | 80 | 81 | 82 | 83 |
| 85 | 29.5 | 70 | 71 | 72 | 72 | 73 | 74 | 75 | 75 | 76 | 77 | 78 | 78 | 79 | 80 | 81 | 81 | 82 | 83 | 84 |
| 86 | 30.0 | 71 | 71 | 72 | 73 | 74 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 78 | 79 | 80 | 81 | 81 | 82 | 83 | 84 | 84 |
| 87 | 30.5 | 71 | 72 | 73 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 85 |
| 88 | 31.0 | 72 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 86 |
| 89 | 31.5 | 72 | 73 | 74 | 75 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 86 | 87 |
| 90 | 32.0 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 86 | 87 | 88 |
| 91 | 33.0 | 73 | 74 | 75 | 76 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 86 | 87 | 88 | 89 |
| 92 | 33.5 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 |
| 93 | 34.0 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 80 | 81 | 82 | 83 | 85 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 |
| 94 | 34.5 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | 86 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 | 92 |
| 95 | 35.0 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 |
| 96 | 35.5 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 |
| 97 | 36.0 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 |
| 98 | 36.5 | 76 | 77 | 78 | 80 | 80 | 82 | 83 | 83 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 |
| 99 | 37.0 | 76 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 |
| 100 | 38.0 | 77 | 78 | 79 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 98 |
| 101 | 38.5 | 77 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 98 | 99 |
| 102 | 39.0 | 78 | 79 | 80 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 | 89 | 90 | 91 | 92 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 100 |
| 103 | 39.5 | 78 | 79 | 81 | 82 | 83 | 84 | 86 | 87 | 88 | 89 | 91 | 92 | 93 | 94 | 96 | 97 | 98 | 99 | 101 |
| 104 | 40.0 | 79 | 80 | 81 | 83 | 84 | 85 | 86 | 88 | 89 | 90 | 91 | 93 | 94 | 95 | 96 | 98 | 99 | 100 | 101 |
| 105 | 40.5 | 79 | 80 | 82 | 83 | 84 | 86 | 87 | 88 | 89 | 91 | 92 | 93 | 95 | 96 | 97 | 99 | 100 | 101 | 102 |
| 106 | 41.0 | 80 | 81 | 82 | 84 | 85 | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 | 93 | 94 | 95 | 97 | 98 | 99 | 101 | 102 | 103 |
| 107 | 41.5 | 80 | 81 | 83 | 84 | 85 | 87 | 88 | 89 | 91 | 92 | 94 | 95 | 96 | 98 | 99 | 100 | 102 | 103 | 104 |

< 72 : Absence de stress

72-78 : Stress léger

78-89 : Stress important

89-96 : Stress très important

>96 : Mort de la vache

**Figure 4.** Diagramme de l'index THI pour l'estimation du degré de stress thermique (Wiersma, 1990)

Armstrong (1994) a représenté un autre diagramme de l'index THI (Figure 5), qui permet de visualiser les zones pour lesquelles on considère qu'il y'a absence de stress thermique (THI<75), stress moyen (THI<78), stress modéré (THI<83), stress sévère (THI < 84) et stress pouvant conduire à la mort (THI≥84).

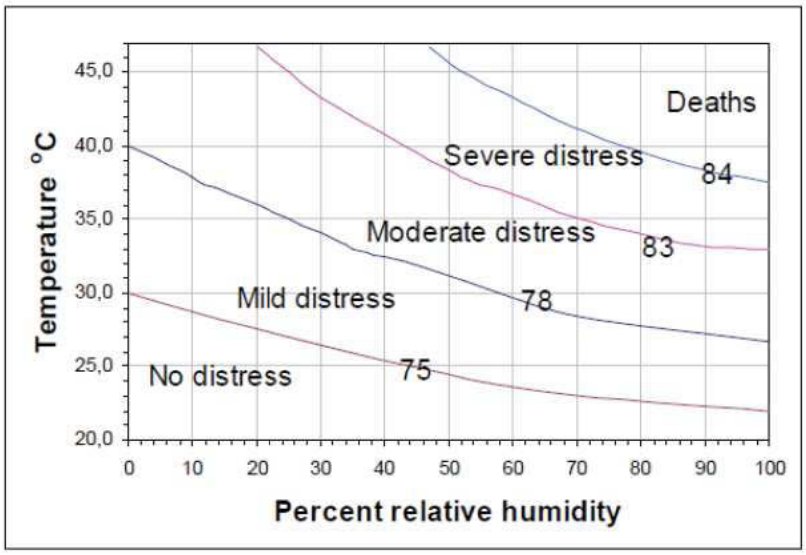



**Figure 5.** Relation entre température, humidité relative et zone de stress thermique chez les bovins (Armstrong, 1994)

Huhnke et al. (2001) ont divisé les valeurs de THI en deux catégories : la première présente une situation dangereuse lorsque 79 ≤ THI ≤ 83 et une autre qu'il qualifie d'urgente lorsque le THI > 84. Thom (1959) a classé le THI de la manière suivante : si 70 ≤ THI < 75 alors il s'agit d'une situation inconfortable pour la vache laitière, si 75 ≤ THI < 80 c'est un niveau très inconfortable et si le THI atteint une valeur supérieure à 80 c'est alors un inconfort grave. Par contre, McDowell et al. (1976) rapportent que le confort de l'animal est assuré jusqu'à une valeur de THI égale à 78.

### III.4. Les facteurs qui modulent l'effet du stress thermique

Certains facteurs sont capables d'amplifier ou de réduire l'effet du stress thermique sur les bovins et plus précisément sur les vaches laitières.

#### III.4.1. La race

Plusieurs études ont montré la différence de sensibilité au stress thermique entre les races de bovins (Ragsdale et al., 1953 ; Correa-Calderón, 2004 ; Smith et al., 2013). Elles se sont basées sur la mesure des différences de fréquences respiratoires et des températures centrales mais aussi sur les différences de potentiels de production dans les conditions de stress thermique. Par exemple la race Charolaise réagissait plus précocement que la race

Angus en augmentant sa fréquence respiratoire lors d'une élévation de température. Il a été aussi démontré que le gène culard modifiait la sensibilité au stress thermique (Halipre, 1973). Pour Finch (1984), les races bovines originaires des environnements tropicaux et subtropicaux sont généralement plus performantes que les races des régions tempérées en termes de survie, reproduction et expression de leur potentiel génétique de croissance et de production laitière. Silanikove (1992) a attribué ces caractéristiques à une meilleure capacité de maintenir l'appétit sous des conditions de stress thermique pendant la lactation.

Mullick (1960) a trouvé que les buffles présentent une meilleure adaptation aux climats tropicaux chauds grâce à leur grande tolérance à la chaleur et leur résistance aux maladies. D'autre part, au sein d'une même espèce, différentes races ont montré des variabilités de niveau d'adaptation en réponse au stress thermique (Kadzere et al., 2002). D'où l'importance d'utiliser des animaux adaptés aux climats chauds car ils sont généralement caractérisés par une tolérance à la chaleur par le maintien de la température centrale dans les limites physiologiques. Il s'est aussi avéré que ces animaux ont une couche de graisse sous-cutanée fine qui leur permettrait une perte de chaleur plus efficace à travers la peau par vasodilatation et sudation. En effet, les mécanismes de sudation et d'évaporation pulmonaire sont bien développés chez ces animaux ce qui traduit un pouvoir de thermolyse bien plus efficace (Ledger, 1959 ; Yousef, 1985).

### III.4.2. Le type et le niveau de production

Les conséquences du stress thermique pour les vaches hautes productrices sont amplifiées car leur activité métabolique génère plus de chaleur. La production de chaleur est telle que ces individus ont une faible aptitude à supporter des températures très élevées. Ainsi la production de chaleur chez les femelles taries est largement inférieure à celles en lactation (Berbigier, 1988b). Pour Silanikove (1992), le stress thermique chez les vaches gestantes et celles en pleine lactation se traduit pas une baisse plus significative de la prise alimentaire. En effet, cette différence a été attribuée au fait que la déshydratation chez les animaux à haut potentiel productif est plus rapide que chez les autres animaux, ce qui conduirait à une élévation plus rapide de la température interne.

Le stade de lactation chez les vaches laitières peut être aussi considéré comme un facteur amplifiant la sévérité du stress thermique. Les vaches qui sont en milieu de leur

lactation sont généralement plus sensibles à la chaleur que celles qui sont en début ou en fin de lactation (Basirico et al., 2009 ; Bernabucci et al., 2010). La réduction de la production laitière due au stress thermique a été estimée à 14 % chez les vaches en début de lactation et 35 % en milieu de lactation. De même, Kumar et al. (2014) ont trouvé que les hautes températures couplées avec une humidité élevée pendant la mise-bas avaient des conséquences néfastes sur la durée et l'importance de la lactation chez les vaches croisées Holdeo (Holstein Friesian × Deoni).

### III.4.3. Le niveau alimentaire et le niveau d'hydratation

Après la prise alimentaire la température rectale augmente de quelques dixièmes de degré. Ceci est dû à l'action des muscles masticateurs et des sécrétions digestives. D'autant plus que chez les ruminants, la fermentation digestive par les microorganismes du rumen crée d'avantage de chaleur. En effet, les rations riches en glucides et lipides sont à l'origine de réactions exothermiques et produisent donc d'avantage de chaleur. D'autre part, un déséquilibre alimentaire ou le manque d'un nutriment oblige l'animal à augmenter sa chaleur métabolique pour le synthétiser. Le bovin, donc, tolère d'autant mieux la chaleur lorsqu'il ingère peu d'aliment, d'où la diminution de la consommation de la MS lors d'un stress thermique (Berbigier, 1988a).

En ce qui concerne le niveau d'hydratation, la privation d'eau augmente en général l'effet du stress thermique, car l'eau est nécessaire au bien fonctionnement de la thermorégulation par évaporation. En effet, la déshydratation et l'augmentation de la concentration des ions dans le sang va réduire la capacité d'évaporation et donc conduire à une augmentation plus rapide de la température rectale (Silanikove, 2000).

**A Retenir**

Les températures élevées compromettent la capacité des vaches laitières à dissiper leur extra-chaleur dans l'environnement, la différence entre leur température corporelle et celle de l'air ambiant étant réduite. Lorsqu'un animal n'est plus dans sa zone de neutralité thermique, il fournit des efforts supplémentaires pour rétablir son homéothermie, indispensable non seulement au maintien d'un bon niveau productif et reproductif, mais également à sa survie. Une humidité relative élevée complique encore cette situation, en diminuant l'efficacité du principal moyen de dissipation de la chaleur corporelle : l'évaporation par la transpiration ou par la respiration. Lorsque de fortes températures ambiantes sont associées à une humidité relative élevée, les animaux d'élevage sont considérés en état de stress thermique. Pour de nombreux auteurs, ce stress résulte d'une combinaison de paramètres environnementaux dont la température ambiante, l'humidité relative, la vitesse du vent, le rayonnement solaire, etc.

Différents index ont été établis pour définir les zones d'inconfort où les animaux subissent un stress thermique. L'index température humidité (THI), le plus utilisé dans les travaux de recherches, est calculé à partir des données brutes de température ambiante et d'humidité relative, faciles à mesurer et dont l'acquisition est souvent possible à partir des services météorologiques. D'autres paramètres environnementaux comme la vitesse du vent ou le rayonnement solaire (qui contribue pourtant fortement à l'augmentation de la charge thermique) ne sont pas toujours disponibles et leur interprétation demeure donc plus limitée.

Certains facteurs peuvent significativement moduler l'effet du stress thermique sur les vaches laitières. Dans le cadre de ce travail de thèse, nous nous sommes intéressés au rôle de la race et à la nature de l'alimentation dans l'adaptation aux conditions de stress thermique.

## Chapitre II. Les réponses des vaches laitières face au stress thermique

Ce chapitre décrit les réponses physiologiques, métaboliques, productives et reproductives ainsi que le comportement alimentaire des vaches laitières soumises à un stress thermique.

### I. Impact du stress thermique sur le comportement physiologique des vaches laitières

#### I.1. Physiologie générale d'un stress

La physiologie d'un stress quelconque peut être définie comme l'ensemble des réponses biochimiques, physiologiques et comportementales d'un animal par rapport aux facteurs nouveaux de son environnement. Les travaux de Selye et Cannon dans les années 1930 ont permis de définir la réaction de l'organisme à toutes les sollicitations auxquelles il est soumis ; cette réponse est non spécifique et se décompose en trois phases (Selye, 1936 ; Cannon, 1939).

-La réponse primaire ou la réaction d'alarme : En premier lieu, le système nerveux autonome intervient par la sécrétion des catécholamines (réponse adrénergique). Ensuite il ya la mise en jeu de l'axe hypothalamo-hypophysaire (**H-H**) et la sécrétion des hormones corticostéroidiennes (réponse de l'axe H-H). Les catécholamines mises en jeu dans ces réactions sont en général les adrénalines et les noradrénalines, qui ont des actions sur les muscles squelettiques en augmentant la glycogenèse et sur les cellules adipeuses en augmentant la lipolyse. Elles sont responsables de l'augmentation de la fréquence cardiaque, de la pression artérielle, mais aussi de la fréquence respiratoire afin d'assurer une oxydation maximale. En ce qui concerne les hormones corticostéroidiennes (cortisol dans la plus part du temps) mises en jeu lors de la réponse de l'axe H-H, elles sont généralement responsables de l'affaiblissement du système immunitaire lors d'un stress chronique.

-La réponse secondaire ou le stade de résistance : Il s'agit d'un processus compensatoire pour restaurer l'équilibre physiologique de l'organisme par la prolongation de l'action des catécholamines. On assiste ensuite à des changements biochimiques et physiologiques dus à l'actions des hormones synthétisées. Le cortisol lors du stade de résistance est responsable

de la mobilisation des réserves énergétiques pour faire face à la demande de l'organisme en énergie. Mais il agit aussi sur la formule leucocytaire et entraîne une baisse des défenses immunitaires.

-La réponse tertiaire ou le stade d'épuisement : L'organisme ne parvient plus à tolérer les effets défavorables du stress. Plus les modifications de l'environnement sont chroniques plus on assiste à d'importants changements au sein de l'individu concerné (production, reproduction, résistance immunitaire ou encore comportement alimentaire).

Sous des conditions de stress thermique, le réchauffement de la région pré-optique de l'hypothalamus conduit à l'activation des mécanismes physiologiques et comportementaux afin de réduire la chaleur interne (Baker, 1989). Les réponses physiologiques suite à un stress thermique chez les mammifères se traduisent en général par une fréquence respiratoire élevée (Yousef, 1985), un halètement, une salivation accrue, une transpiration abondante (Blazquez et al., 1994) ainsi que par la modification des réponses hormonales.

## I.2. Les réponses physiologiques face au stress thermique

### I.2.1. La fréquence respiratoire

La mesure de la fréquence respiratoire semble être la méthode la plus accessible pour évaluer l'impact du stress thermique sur un bovin. En effet, lorsque la température ambiante s'élève, la fréquence respiratoire augmente dans un laps de temps très court en réponse aux différents signaux envoyés par le système neuroendocrinien. Selon Coppock et al. (1982), l'augmentation de la fréquence respiratoire fait partie des réajustements physiologiques dont l'organisme dispose pour faire face à la chaleur. La fréquence respiratoire chez les bovins est classiquement de l'ordre de 20 respirations par minute (**resp/min**) (Thomas et Pearson, 1986), elle est légèrement plus élevée (25-30 resp/min) chez les caprins (Robertshaw et Damiel, 1983) et chez les ovins (Hales et Brown, 1974). Par conséquent, l'augmentation de la fréquence respiratoire au-delà de 40 resp/min peut être considérée comme un halètement, qui permet d'améliorer le refroidissement du corps de l'animal à travers l'évaporation respiratoire (Silanikove, 2000). Mesurer la fréquence respiratoire chez les bovins, décider si l'animal a atteint le stade d'halètement et quantifier la sévérité du stress thermique selon le rythme d'halètement (bas : 40-60 resp/min, moyen : 60-80 resp/min, élevé : 80-120 resp/min et stress thermique sévère : >120 resp/min) représente le moyen le plus facile et le plus

accessible pour évaluer l'impact du stress thermique sur des animaux d'élevage exposés à des conditions climatiques sévères (Silanikove, 2000).

L'augmentation de la fréquence respiratoire chez des vaches laitières exposées à des conditions de stress thermique a été soulignée par plusieurs études (Berman et al., 1985 ; Correa-Calderón et al., 2004). Baumgard et al. (2011) ont montré que les vaches laitières soumises à des conditions de thermoneutralité (THI=63,5) pendant 48h suivies de stress thermique (THI=79,6) pendant 16h/j et durant 3jours successifs, avaient des fréquences respiratoires plus élevées (50 et 71 resp/min, respectivement). Une augmentation du rythme respiratoire de 20 resp/min à 100 resp/min (ou plus) a été aussi observée par Johnston et al. (1959) lorsque le climat passe de frais à chaud avec une température ambiante supérieure à 32 °C. Ingram et Mount (1975) stipulent que lorsque la contrainte thermique dépasse un certain seuil, la thermorégulation se dérègle, le rythme respiratoire diminue et on observe l'apparition d'une respiration profonde, dite de 2$^{ème}$ phase.

Kibler et Brody (1954a) ont montré qu'il n'y avait pas de véritable différence de fréquence respiratoire entre les races bovines à des températures basses. Cependant, à des hautes températures, les vaches Jersey avaient une fréquence respiratoire plus prononcée que celle des vaches Holstein. Ceci a été attribué au fait que les Jersey avaient une meilleure capacité à dissiper de la chaleur lors d'une augmentation de la température ambiante. D'autre part, Berman et al. (1985) dans leur étude sur les vaches hautes productrices dans un environnement subtropical, ont trouvé que la fréquence respiratoire commençait à augmenter de 50-60 respirations / min à partir de températures supérieures à 25 °C. Ces auteurs ont établi des équations de régression qui mettaient en évidence le rapport entre la température ambiante (**Ta**) et la fréquence respiratoire (**FR**) : **FR = 0,5 + 2,5 Ta** ; ($r^2$ = 0,67). Cependant Muller et al. (1994b) ont établi deux équations de régression différentes suivant si les vaches laitières étaient exposées ou non à l'ombre : **FR = 14,92 + 1,75 Ta** ; ($r^2$ = 0,81) pour des vaches à l'ombre et **FR = - 29,60 + 3,79 Ta** ; ($r^2$ = 0,92) pour des vaches sans ombre.

### I.2.2. La fréquence cardiaque

La fréquence cardiaque a été aussi étudiée comme indicateur du stress thermique chez les vaches laitières. Les résultats des observations diffèrent, néanmoins, d'une étude à une autre. En effet, Worstell et Brody (1953) stipulent que le pouls commence à baisser, dans une chambre climatique, à partir d'une température ambiante égale à 27 °C pour les vaches Holstein et à partir de 35 °C pour les vaches Brahman. Selon Kadzere et al. (2002), la réduction du rythme cardiaque chez les vaches laitières est le mécanisme le plus typique dans des conditions de stress thermique, car il est souvent associé à une baisse de la production de chaleur.

Cependant, Richards (1985) a mesuré une augmentation de la fréquence cardiaque chez des vaches Holstein-Friesian en lactation, exposées 7h/jour pendant 3 semaines à des conditions climatiques sévères, avec une température ambiante de 38 °C et une humidité relative de 80 %. Richards explique cette augmentation du pouls par le fait que les vaches ne se sont pas acclimatées aux conditions tropicales et que cette augmentation n'est qu'une réponse à un tel stress thermique. Bianca (1959) a aussi rapporté que la fréquence cardiaque augmentait lorsque les bovins sont exposés au stress thermique pendant une courte durée, et qu'elle baissait quand l'exposition devenait chronique. Une fréquence cardiaque normale chez les bovins est comprise entre 55 et 70 battements par minute (**bat/min**) ; au fur et à mesure que la température ambiante augmente jusqu'à des conditions de stress thermique, cette fréquence va augmenter en réponse à la baisse de la pression artérielle et de la résistance périphérique totale (Rübsamen et Hales, 1985).

Rejeb et al. (2012), dans une étude portant sur l'impact du stress thermique sur les paramètres physiologiques chez des vaches Holstein, ont trouvé que la fréquence cardiaque est plus élevée en été comparé au printemps. En effet, lorsque le THI est passé de 65,6 à 83,3, le rythme cardiaque moyen enregistré chez des vaches laitières hautes productrices a varié de 62,1 à 80,3bat/min. Pour la même variation du THI, le pouls des vaches à faible production laitière est passé de 61,9 à 75,8 bat/min. A partir d'une valeur de THI de 85,0 il y a eu chute de la fréquence cardiaque, lorsque le stress devient relativement chronique. Les résultats précédents concordent bien avec ceux rapportés par Hafez (1968), qui a montré que l'exposition d'un animal à un stress thermique sévère pendant une longue période diminue la fréquence cardiaque.

Pour Janzekovic (2005), l'augmentation de la fréquence cardiaque en réponse au stress thermique, est attribuable au fait que l'organisme a un besoin plus élevé en oxygène et donc d'un apport accru de sang, ce qui entraîne l'accélération du rythme cardiaque. Du Preez (2000) stipule que l'augmentation du débit et de la fréquence cardiaque est l'effet le plus évident qu'a le stress thermique sur la fonction cardiovasculaire des vaches laitières. McManus et al. (2009) ont expliqué que l'augmentation de la fréquence cardiaque permet à l'animal de perdre de la chaleur interne et ainsi de prévenir l'augmentation de la température rectale quand la dissipation de la chaleur par le processus d'évaporation n'est plus possible. Silva (2000) a étudié la variation de la fréquence cardiaque avec une baisse compensatrice de la pression artérielle causée par une vasodilatation périphérique chez les vaches laitières ; néanmoins aucun résultat significatif n'a été observé à cause de la masse corporelle élevée des animaux examinés.

### I.2.3. La température rectale

La température interne, dite centrale, est un bon indicateur de la réponse physiologique au stress thermique car elle est relativement constante dans des conditions environnementales normales. En effet, la température centrale peut être mesurée à partir de plusieurs sites ; pour des raisons pratiques le site de mesure le plus commun est le rectum, en prenant la température pendant une minute (Du Preez, 2000). La régulation de la température centrale, dans les limites de la zone de thermoneutralité, est réalisée par l'autocontrôle de la fonction du système vasculaire cutané et par des moyens comportementaux comme le changement de la posture (Bligh, 1985). La température corporelle normale chez les bovins, selon McDowell (1958), varie entre 38,3 et 38,8 °C.

Johnson (1980) stipule que la température rectale renseigne sur l'équilibre thermique chez les bovins. En effet, elle permet d'évaluer l'impact de la chaleur sur la croissance, la productivité et la reproduction des vaches laitières. Une augmentation de l'ordre de 1 °C ou moins au niveau de la température rectale, est suffisante pour réduire les performances des animaux d'élevage (McDowell et al., 1976). La température rectale peut varier de 38,1 à 39,1 °C chez les bovins de race à viande, de 38,0 à 39,3 °C chez les vaches laitières (Robinson, 1999) et de 38,0 à 39,0 °C chez les bovins adultes en général (Dirksen et al., 1993). D'autre part, la température rectale des vaches en production est supérieure de 0,9 °C à celle des vaches taries, conduites dans les mêmes conditions (Shalit et al., 1991). Ceci

s'explique par le fait que les vaches laitières produisent plus de chaleur que les vaches taries. Johnson et al. (1963) ont rapporté que pour chaque élévation de 0,55 °C au niveau de la température rectale, la production de lait et l'ingestion chutaient respectivement de 1,8 et 1,4 kg/j.

Il semble qu'il existe des différences importantes entre sous-espèces ou races dans leur capacité à réguler la température rectale. En effet, Finch (1986) a trouvé que la température rectale chez les *Bos taurus* est supérieure à celle des *Bos indicus*. Ce qui veut dire que les *Bos taurus* sont plus sensibles au stress thermique que les *Bos indicus*. De même, Correa-Calderón et al. (2004) ont montré que les vaches Brown Swiss avaient une température rectale inférieure à celles des vaches Holstein (39,2 et 39,7 °C respectivement) lorsque le THI atteignait une valeur maximale de 82. Ces auteurs ont conclu que les vaches Brown Swiss sont beaucoup moins sensibles au stress thermiques que les Holstein.

### I.2.4. Equilibre minéral du sang

Le maintien d'un pH sanguin constant constitue une priorité homéostatique pour l'organisme. Le pH sanguin dépend principalement des concentrations relatives d'acide carbonique ($H_2CO_3$) et du $HCO_3$- dans le sang (Coppock et al., 1982). Ces mêmes auteurs ont rapporté que la mesure de la température corporelle, de la fréquence respiratoire, de la production laitière ainsi que de la composition du lait permettait d'évaluer l'équilibre acido-basique. Dans une chambre climatique, Schneider et al. (1988) ont mis en évidence que des vaches laitières qui avaient subi un stress thermique présentaient un pH sanguin plus élevé durant une période de chaleur que celles élevées dans des conditions de thermoneutralité. Ces mêmes auteurs ont aussi signalé qu'il y avait une compensation rénale apparente à l'alcalose dans des conditions de stress thermique, détectée par un pH urinaire élevé. L'élévation du pH urinaire a été attribuée à l'élévation de l'excrétion de $HCO_3$- dans l'urine (Bianca, 1965) et la hausse de la pression partielle d'oxygène dans le sang à l'augmentation de la ventilation alvéolaire (Hales et Findlay, 1968).

### I.2.5. La transpiration

Lors d'un stress thermique, la quantité de chaleur dissipée par transpiration est nettement supérieure à celle perdue par halètement (McLean, 1963). Cependant, ce système ne fonctionne correctement que si l'humidité relative n'est pas trop élevée. Une certaine

énergie est alors perdue par une diffusion passive de la vapeur d'eau à travers la peau. La transpiration est alors d'autant plus importante que la température ambiante est élevée (Berbigier, 1988a).

Cependant, la mesure du taux de transpiration chez les bovins demeure très difficile, d'autant plus que les résultats sont très variables. Robertshaw et Vercoe (1980) ont rapporté que le taux de perte d'eau par transpiration au niveau du scrotum a doublé quand les animaux étaient exposés à une température ambiante supérieure à 40 °C (77 g/m$^2$/h). Toutefois, Blazquez et al. (1994) ont rapporté un effet beaucoup plus marqué puisque le taux de sudation mesuré à partir du scrotum était cinq fois plus important lorsque la température ambiante augmente et atteint 36,2 °C (279 g/m$^2$/h). Finch (1986) a montré que le taux de transpiration chez des *Bos indicus* augmentait exponentiellement alors que chez des *Bos taurus* il avait tendance à atteindre un plateau après une augmentation initiale. Ferguson et Dowling (1955) et Allen (1962) ont attribué le taux de sudation élevé chez les *Bos indicus* et les bovins Zébu à leur grande densité de glandes sudoripares. Singh et Newton (1978) ont trouvé des taux de transpiration plus élevés ($P<0,05$) chez des veaux Ayrshire en comparaison avec des veaux Guernsey, suggérant que ces derniers étaient beaucoup moins adaptés aux climats chauds que les Ayshire.

### I.3. Les réponses physiologiques hormonales face au stress thermique

#### I.3.1. Les glucocorticoïdes (le cortisol)

L'activation de la région pré-optique stimule l'hypothalamus à libérer la corticolibérine (CRH) qui agit sur l'hypophyse antérieur et qui à son tour libère l'hormone adrénocorticotrope (ACTH). Ceci stimule le cortex surrénal à produire des glucocorticoïdes (principalement le cortisol). L'activation de l'axe hypothalamo-hypophyso-surrénalien et l'augmentation du cortisol plasmatique représentent les réponses les plus marquantes d'un animal soumis à des conditions de stress, thermique ou autre. La sécrétion du cortisol provoque des réajustements physiologiques qui permettent à l'animal de tolérer le stress causé par un environnement chaud (Christison et Johnson, 1972 ; Silanikove, 2000). Collins et Weiner (1986) stipulent que les réactions initiales d'un animal soumis à un stress thermique sévère représentent une réponse émotionnelle plutôt que thermorégulatrice. Cependant, sous ces conditions climatiques sévères, l'action hyper-glycémique du cortisol

est vraisemblablement requise pour provoquer l'augmentation attendue de la mobilisation du glucose. Du Preez (2000) stipule que le cortisol est le premier glucocorticoïde à être synthétisé par le cortex surrénal et a de multiples actions physiologiques, puisqu'il influe sur l'intensité du métabolisme corporel, la distribution de l'eau corporelle, l'équilibre électrolytique et la pression artérielle. Thompson (1985) a mis en évidence que le cortisol influe aussi sur le métabolisme mammaire, puisqu'il intervient dans l'approvisionnement de la mamelle en glucose.

Selon Christison et Johnson (1972), le cortisol plasmatique peut augmenter dans un laps de temps très réduit après l'exposition à un stress thermique sévère avant d'atteindre un plateau. En effet, après 20 min d'exposition dans une chambre climatique à Ta=35 °C et à HR= 50 %, le cortisol plasmatique chez des vaches Jersey taries est passé de 30 à 37µg/L, et a atteint une valeur plateau de 43µg/L après deux heures d'exposition. Le cortisol plasmatique, selon Habeeb et al. (1992) augmente considérablement quand les bovins sont sévèrement exposés à des conditions de stress thermique et diminue quand ce stress devient chronique. Cependant, Muller et al. (1994b) ont trouvé que sous les conditions estivales méditerranéennes de l'Afrique du Sud, des vaches disposant d'ombre ont maintenu des concentrations en cortisol plasmatique relativement faibles parallèlement à des températures rectales et des fréquences respiratoires constantes durant les périodes de pic du stress thermique. Ceci suggère que les vaches sont sensibles au stress thermique même sous un environnement tempéré, et que les concentrations plasmatiques basales du cortisol peuvent augmenter d'avantage chez les vaches soumises à un stress thermique chronique qui s'intensifie.

Néanmoins, les concentrations du cortisol plasmatique sont facilement affectées par la façon de collecter le sang (Hopster et al., 2005). Pour cette raison, plusieurs chercheurs ont adopté des procédures de prélèvement non-invasives, dont la détermination du cortisol dans l'urine (Higashiyama et al., 2007), dans la salive (Negrao et al., 2004) et dans le lait (Verkerk et al., 1998 ; Wenzet et al., 2003). Le cortisol du lait représente le moyen le plus facile et le plus accessible d'évaluer les adaptations individuelles des vaches laitières, car la traite est une procédure quotidienne de routine qui ne perturbe pas les animaux. Selon Fukasawa et al. (2008) le cortisol du lait pourrait révéler une relation génétique et

phénotypique entre les performances des vaches laitières et leurs capacités adaptatives au stress thermique.

### I.3.2. L'hormone de croissance

L'hormone de croissance est très importante pour la croissance et l'intensité de la lactation chez la vache laitière, vue son influence sur l'équilibre de l'azote et sur l'amélioration de la biosynthèse protéique. Cette hormone peut être aussi considérée comme vitale pour les vaches hautes productrices (Johnson et Vanjonack, 1976). L'exposition aigue à la chaleur environnante ou aux stimuli externes provoque la libération immédiate de cette hormone à partir de l'hypophyse (Mitra et al., 1972). Néanmoins, quand les bovins ont subi une exposition prolongée de plusieurs jours ou plusieurs semaines à un environnement stressant, la concentration de l'hormone de croissance est réduite, ce qui implique des taux de croissances faibles, moins de rétention de l'azote et des performances de production laitières peu satisfaisants (Mitra et al., 1972). Plusieurs études ont également montré qu'il existe des corrélations positives entre l'hormone de croissance et la production de lait (Capuco et al., 2001 ; Hadsell et al., 2008). L'administration de cette hormone provoque une augmentation significative de la production laitière, qui à son tour provoque l'augmentation de la température rectale (Rejeb et al., 2016).

### I.3.3. Les hormones thyroïdiennes

Le lobe antérieur de la glande hypophysaire produit la thyrotropine qui agit principalement sur la glande thyroïdienne et la stimule à libérer la thyroxine (**$T_4$**) et la tri-iodothyronine (**$T_3$**). Ces hormones influencent plusieurs processus cellulaires, en particulier l'activité de la thermogenèse qui représente approximativement 50% du métabolisme de base chez les animaux sains. Cependant, certains facteurs de stress physique ont tendance à inhiber les sécrétions de la tyroïde (Habeeb et al., 1992). Plusieurs études ont montré que les concentrations plasmatiques de $T_4$ et $T_3$ diminuent jusqu'à 25 % sous des conditions de stress thermique (Magdub et al., 1982 ; Beede et Collier, 1986). La réponse est cependant, moins rapide que celle décrite pour le cortisol, car cela prend plusieurs jours pour que les niveaux de $T_4$ et $T_3$ atteignent un nouvel état stationnaire (Kamal et Ibraim, 1969). Le réajustement de la réponse thyroïdienne est chronique et par conséquence, son activité pendant l'été est réduite par rapport à l'hiver (Habeeb et al., 1992). Les modifications de

l'activité thyroïdienne sont accompagnées par une diminution de l'intensité du métabolisme corporel, de la prise alimentaire, de la croissance et de la production laitière, dans des conditions de stress thermique (Beede et Collier, 1986).

### I.3.4. La prolactine

La prolactine est primordiale pour l'initiation et le maintien de la lactation chez les vaches laitières. Les effets d'agents stressants comme le bruit ou la peur sur la prolactine ont été largement étudiés (Raud et al., 1971 ; Johnson et Vanjonack, 1975). Koprowski et Tucker (1973) ont étudié l'effet de la saison sur la prolactine des vaches laitières et ont trouvé que cette dernière était significativement plus élevée en été en comparaison avec l'automne et le printemps. En effet, la valeur maximale de la prolactine prélevée 5min après la traite a été enregistrée pendant le mois de juillet (125 ng/mL) alors que la valeur minimale a été enregistrée pendant le mois de janvier (69 ng/mL). Cependant, d'autres études incluant d'autres facteurs environnementaux comme la durée du jour, l'intensité de la lumière et la température ambiante sont nécessaires pour mieux cerner l'effet de la saison sur la sécrétion de la prolactine.

## II. Le comportement alimentaire face à un stress thermique

### II.1. L'ingestion alimentaire

Lorsque la température ambiante s'élève au-dessus de 25-30 °C, de nombreux auteurs ont montré que la consommation de matière sèche diminuait et en revanche celle d'eau augmentait (Bouraoui et al., 2002 ; Kadzere et al., 2002 ; Yasothai, 2014). Berman (2005) estime qu'une charge thermique au-delà d'une valeur seuil de 35 °C chez les vaches laitières, provoque une série de réponses adaptatives dont principalement la baisse de la prise alimentaire. West (2003) stipule qu'il y'a une baisse de l'ingestion à raison de 0,85 kg de MS pour chaque degré Celsius de plus au-delà de la zone de thermoneutralité de la vache laitière.

Selon le National Research Council (1989), la prise alimentaire chez les vaches laitières commence à baisser à partir de températures ambiantes égales à 25 °C. Cette chute est d'autant plus rapide lorsqu'on enregistre plus de 30 °C, et la consommation de la matière sèche peut alors être réduite de 40 %. Le tableau 2 met en évidence les changements relatifs

dans la consommation volontaire de la matière sèche (**CVMS**), le rendement laitier et la consommation d'eau selon l'augmentation de la température ambiante du milieu. La réduction de la matière sèche ingérée est directement associée à un bilan énergétique négatif (Wheelock et al., 2010). Par ailleurs, les besoins énergétiques pour l'entretien augmentent de 30 % chez les animaux thermiquement stressés, par conséquent, l'apport énergétique n'est plus suffisant pour couvrir les besoins journaliers pour la production laitière (NRC, 2007).

**Tableau 2**. La production laitière et la consommation volontaire de matière sèche (CVMS) et d'eau en fonction des températures ambiantes.

| Température ambiante (°C) | Production laitière (kg/j) | CVMS (kg) | Consommation d'eau (L) |
|---|---|---|---|
| 20,0 | 27,0 | 18,2 | 68,1 |
| 25,0 | 25,0 | 17,7 | 73,8 |
| 30,0 | 23,0 | 16,9 | 79,1 |
| 35,0 | 18,0 | 16,7 | 120 |
| 40,0 | 12,0 | 10,2 | 106 |

Sources: National Research Council. (1989)

Le niveau d'ingestion est un critère très révélateur de la capacité adaptative des animaux à tolérer la chaleur (Silanikove, 1992). La diminution de l'ingestion chez les vaches laitières en réponse au stress thermique est volontaire et vise à réduire la production de chaleur métabolique. Pour Murphy (1992), la différence de température entre le jour et la nuit influence notablement les quantités d'aliments ingérés et d'eau bue. En effet, si l'animal peut retrouver des températures nocturnes tempérées, il aura moins besoin de diminuer son ingestion car les processus de thermorégulation ne seront pas mis en œuvre. D'autant plus que la production maximale de chaleur survient environ 4 à 5 heures après l'ingestion d'un repas. En conséquence, il est souhaitable de servir les repas en dehors des périodes de températures extrêmes, soit tôt le matin, soit le soir (Lefebvre et Lafontaine, 2007). De même, Schneider et al. (1988) ont indiqué que les vaches qui ont subi un stress thermique dans une chambre climatique ont changé de rythme alimentaire et ne mangeaient que lorsque la température redevenait plus fraîche.

Selon Albright et Alliston (1972), la réduction de la prise alimentaire serait attribuable au fait que le stress thermique entraîne le refroidissement du centre rostral de l'hypothalamus afin de stimuler le centre médial de la satiété et donc l'inhibition du centre latéral de l'appétit. La réduction de l'ingestion dès le premier jour du stress est, selon Chilliard et al. (1995), un bon moyen pour diminuer la production de chaleur liée à la fermentation ruminale et à l'activité masticatoire mais aussi aux déplacements et aux mouvements liés à la recherche d'aliments. Cummins (1992) stipule que le pourcentage de déclin de la prise alimentaire suite à une exposition aux fortes températures serait beaucoup plus élevé pour les rations très cellulosiques car elles génèrent plus de chaleur à partir de la fermentation ruminale. Ainsi, la diminution de la consommation alimentaire fait partie intégrante des moyens dont dispose le ruminant pour s'adapter aux fortes chaleurs et réguler sa température interne.

Le tableau 3 représente la variation de l'ingestion alimentaire au cours de la saison estivale et la saison printanière chez des vaches Holstein, en Tunisie, selon leur niveau de production. Rejeb (2014) a enregistré une diminution significative de l'ingestion lorsque le THI passe de 65,6 à 83,3. En effet, pour les vaches hautes productrices, la quantité de matière sèche ingérée est passée de 24,1kg/j au printemps à 20,5 kg/j en été. D'autre part, les vaches hautes productrices nécessitent des apports alimentaires et ont des activités métaboliques deux à quatre fois plus élevés que pour les autres vaches laitières (Kadzere et al., 2002). En effet, le stress thermique affecte l'ingestion des vaches à haut potentiel en entraînant des réductions notables dans la consommation de fourrages et dans la rumination, puisque la vache tente de maintenir sa température par une diminution de la consommation des fourrages dans une proportion plus grande que les concentrés (Collier et al., 1982).

**Tableau 3**. Effet du stress thermique sur la matière sèche ingérée chez des vaches Holstein élevée en Tunisie suivant leur niveau de production.

| THI | Matière ingérée (kg Ms/j) | |
|---|---|---|
| | Vaches fortes productrices | Vaches faibles productrices |
| 65,62 | 24,07 (±0,63) | 18,55 (±0,63) |
| 83,27 | 20,46 (±0,90) | 16,10 (±0,60) |

Rejeb Bellil (2014)

## II.2. La digestibilité des aliments et des nutriments

Les variations thermiques de l'environnement peuvent provoquer des dépressions de l'activité et de la fonction du système digestif, indépendamment des changements de la prise alimentaire (Christopherson et Kennedy, 1983). En effet, Graham et al. (1959) et Blaxter et Wainman (1961) ont indiqué qu'il y'a une relation positive entre la température ambiante et la digestion. Morand-Fehr et Doreau (2001) prétendent que sous des conditions contrôlées, l'effet isolé de l'augmentation de la température ambiante (+10 °C) tend à améliorer la digestibilité de la ration de 0,2 point par degré Celsius à même niveau d'ingestion. Dans la pratique, excepté en cas de sous-alimentation, la digestibilité est améliorée, car à l'effet de l'augmentation de la température ambiante, s'ajoute celui de la baisse des quantités ingérées. La baisse de l'ingestion irait donc de pair avec une meilleure digestibilité (Figure 6 ; Doreau et al., 2000).

D'autre part, les variations de digestibilité d'une ration de composition déterminée s'expliquent aussi par des variations du temps de rétention des aliments dans le rumen, de l'activité microbienne ou de la réduction des aliments en fines particules. L'accroissement de température entraîne, à un même niveau d'ingestion, une augmentation du temps de rétention des particules dans le rumen qui suffit à expliquer l'augmentation de la digestibilité (Warren et al., 1974). Le ralentissement du passage des aliments et l'élévation du temps de rétention sous l'effet du stress thermique s'explique par une réduction de la motricité ruminale (Attebery et Johnson 1969), en particulier de la fréquence et l'amplitude des contractions du rumen. Effectivement, lorsque la température ambiante passe de 18 à 30 °C, le temps de rétention peut augmenter de 18% (Warren et al., 1974). Kennedy et al. (1977) ont démontré que l'action de l'augmentation de température sur le transit via la motricité ruminale était liée à une baisse de sécrétion d'hormones thyroïdiennes.

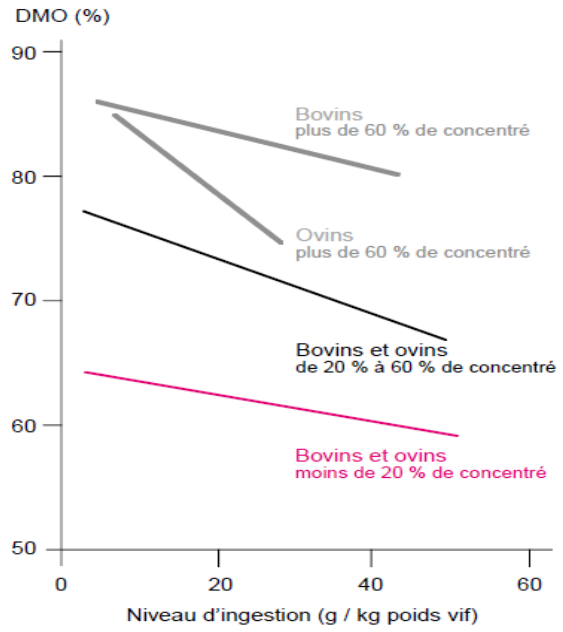



**Figure 6**. Relation entre la digestibilité de la matière organique (**DMO**) et le niveau d'ingestion chez les ovins et les bovins (Doreau et al., 2000)

### II.3. Les adaptations métaboliques en réponse à un apport réduit de nutriments

#### II.3.1. Métabolisme lipidique

Le stress thermique affecte négativement le métabolisme lipidique (Hao et al., 2016). En effet, Ronchi et al. (1999) stipulent que le stress thermique réduit l'ingestion des vaches laitières et ainsi la concentration des acides gras non-estérifiés (**AGNE**) dans le plasma. Comme l'hyperthermie entraîne la réduction de la concentration en cétones du sang et pas celle de l'urine, la réduction des AGNE n'est pas due à une oxydation renforcée ni à une conversion accélérée en corps cétoniques, mais vraisemblablement à des changements dans le métabolisme lipidique causés par le stress thermique (Dale et al., 1954 ; Baumgard et al., 2013). En cas d'augmentation de l'enzyme lipoprotéine-lipase, connue pour son rôle dans l'assimilation et le stockage des triglycérides dans l'intestin et le foie (Sanders et al., 2009), les animaux souffrant d'un stress thermique auront une capacité particulière à la lipogenèse tandis que la lipolyse sera affaiblie (Baumgard et al., 2013). Ceci traduit donc que l'aptitude à mobiliser le tissus adipeux est réduite chez les animaux subissant un stress thermique, ce qui expliquerait en grande partie la baisse des AGNE plasmatiques (Bauman et al., 1988 ; Dunshea et al., 1990).

Plusieurs études portant sur la métabolomique des vaches laitières, montrent que le stress thermique provoque l'augmentation de la concentration de l'acide acétylacétique, de l'acétone et de l'acide hydroxybutyrique dans le sang, modifiant ainsi la distribution de l'énergie et la synthèse de la matière grasse du lait (Peterson et al., 2012 ; Tian et al., 2015). Tian et al. (2015) stipulent que la réduction de l'apport énergétique et l'équilibre énergétique négatif sont des performances adaptatives en réponse à l'augmentation de la concentration de tous ces métabolites. Dunning et al. (2014) ont montré que durant le stress thermique, les concentrations du cortisol, de l'adrénaline et de la noradrénaline (les indicateurs qui reflètent le catabolisme) ont considérablement augmenté. Ces auteurs ont conclu que l'augmentation de ces paramètres a probablement stimulé la décomposition des lipides et la mobilisation des triglycérides du tissu adipeux, afin de subvenir aux besoins de l'organisme via la ß-oxydation et donc pour produire de nouveaux acides gras libres pour générer de l'énergie. Tous ces résultats reflètent les altérations du métabolisme lipidique provoquées par l'hyperthermie.

### II.3.2. Métabolisme glucidique

Streffer (1988) suggère que le stress thermique modifie le métabolisme glucidique. En effet, la glycogenèse et la néoglucogenèse sont majoritairement responsables de l'accroissement de la mobilisation du glucose hépatique lors d'un stress thermique (Collins et al., 1980 ; Streffer, 1988).De plus, Wheelock et al. (2010) ont trouvé que le stress thermique chez les vaches laitières réduisait la production du lactose du lait d'environ 200 à 400 g/j comparé à des vaches dans des conditions de thermoneutralité. Le taux de sécrétion du lactose et du glucose sont souvent similaires (Kronfeld, 1982), néanmoins le mécanisme sous-jacent par lequel la production du lactose est réduite, demeure incertain. Cependant, une épreuve d'hyperglycémie provoquée au glucose a montré que les vaches consommaient du glucose exogène plus rapidement lorsqu'elles sont exposées à des conditions de stress thermique (Wheelock et al., 2010). Par ailleurs, il a été prouvé que l'expression du gène codant pour l'enzyme pyruvate carboxylase, qui régularise l'implication du lactate et de l'alanine dans la voie néoglucogénique, est régulée en amont par le foie chez de multiples animaux souffrant de stress thermique (Rhoads et al., 2011). Il a été aussi démontré que sous des conditions de stress thermique, des taurillons à l'engraissement avaient des concentrations plasmatiques en lactate élevées, en réponse aux sécrétions du muscle

squelettique (Yaspelkis et al., 1993). Ceci illustre donc que la glycolyse aérobie dans les tissus périphériques a augmenté dans une certaine mesure. En outre, Monteiro et al. (2016) stipulent que la progéniture de vaches ayant subi un stress thermique pendant leur gestation avaient des métabolismes altérés et des croissances retardées suite à la réduction de l'ingestion des aliments de démarrage mais aussi une disponibilité améliorée du glucose indépendant de l'insuline (Chen et al., 2010).

Tian et al. (2015), dans une étude métabolomique visant à étudier les altérations de la voie métabolique glucidique lors d'un stress thermique, ont trouvé que celui-ci réduisait le niveau de glucose dans le sang mais augmentait le lactate et le pyruvate, ainsi que l'activité du lactate déshydrogénase. D'autre part, Tao et al. (2013) ont trouvé qu'une glycolyse et une respiration anaérobie permettaient de maintenir l'équilibre énergétique de l'organisme durant le stress thermique. Récemment, des chercheurs ont montré que le stress thermique amplifie la consommation myocardique et musculaire d'oxygène, réduisant ainsi l'approvisionnement en oxygène et conduisant à une fermentation anaérobie (Hao et al., 2016). Ces changements dans la voie métabolique détériorent donc davantage le bilan énergétique déjà négatif induit par la réduction de la prise alimentaire durant le stress thermique (Wheelock et al., 2010).

### II.3.3. Métabolisme protéique

Le stress thermique affecte le métabolisme protéique en changeant les tissus maigres de la carcasse (Close et al., 1971 ; Lu et al., 2007). Plusieurs études ont montré que le catabolisme des muscles squelettiques est renforcé et que les taux d'azote uréique dans le plasma sont considérablement plus élevés pendant le stress thermique. Ce qui laisse entendre que le stress thermique conduit à la redistribution de l'azote depuis la protéine à l'urée (Hall et al., 1980 ; Wheelock et al., 2010). D'autre part, le stress thermique atténue l'aptitude des glandes mammaires à la synthèse protéique en réduisant les teneurs en caséines du lait (Bernabucci et al., 2002). Cependant, Rhoads et al. (2011) ont suggéré que le stress thermique n'a pas d'influence sur le taux protéique du lait, néanmoins il réduit le rendement total en protéines du lait à cause de la diminution de la production laitière (Tissieres et al., 1974).

En outre, le stress thermique chez les vaches laitières altère la concentration plasmatique en acides aminés (Tian et al., 2015). Pour fournir de l'énergie, la phosphocréatine est mobilisée depuis les tissus musculaires conduisant ainsi à l'augmentation de la créatine et de la créatinine chez les vaches thermiquement stressées (Koubkova et al., 2002 ; Scharf et al., 2010). Tian et al. (2015) ont trouvé que la concentration plasmatique de certains acides aminés (dont la proline, la glycine, la thréonine, l'isoleucine et l'arginine) a augmenté chez les vaches laitières exposées à un stress thermique.

### II.3.4. Métabolisme énergétique

Le métabolisme énergétique du corps d'un animal et le métabolisme des substances sont étroitement liés. En effet, l'énergie découle des processus d'oxydation des glucides, des lipides et des protéines. La voie métabolique des substances varie considérablement avec un métabolisme énergétique altéré (Hao et al., 2016). Le stress thermique chez les vaches laitières conduit principalement à la baisse de la prise alimentaire et à un équilibre énergétique négatif lorsque l'énergie nette d'entretien et de lactation sont faibles. En effet, elle implique des altérations hormonales et enzymatiques qui engendrent des modifications dans l'anabolisme et le catabolisme des nutriments (Silanikove, 2000 ; Bernabucci et al., 2010).Toutefois, Rhoads et al. (2009) et Wheelock et al. (2010) ont montré que l'hyperthermie induit directement des changements dans le partitionnement des nutriments, indépendamment de la prise alimentaire.

Les glucides représentent la source principale d'énergie pour les vaches laitières. Ils sont généralement absorbés et utilisés sous deux formes. Premièrement, les glucides sont fermentés pour produire des acides gras volatiles dans le rumen, qui seront utilisés après leur passage dans le foie. D'un autre côté, les glucides sont absorbés et utilisés sous forme de glucose dans l'intestin grêle (Hao et al., 2016). Abeni et al. (2007) ont montré que les concentrations plasmatiques du glucose, chez des vaches laitières en stress thermique, sont significativement inférieures à celles de vaches soumises à des conditions de thermoneutralité. Le métabolisme du glucose hépatique est alors modifié puisque le stress thermique a altéré les enzymes de la néoglucogenèse (Hao et al., 2016).

D'autre part, les vaches soumises à des conditions de stress thermique vont augmenter la mobilisation de leurs tissus adipeux périphériques dans le but de compenser la déficience en énergie provoquée par un apport en nutriments inadéquat. La quantité de cétones présente dans le foie des vaches thermiquement stressées va elle aussi augmenter et ceci à travers la ß-oxydation des acides gras (Hao et al., 2016). Flamenbaum et al. (1995) et Ronchi et al. (1999) ont montré que les concentrations plasmatiques des AGNE diminuent en réponse à des températures ambiantes élevées alors que celles du β-hydroxybutyrate augmentent. Ceci reflète donc que l'utilisation des AGNE comme source d'énergie a augmenté dans les tissus périphériques et dans le foie, conduisant ainsi à la baisse des AGNE plasmatiques.

## III. Impact du stress thermique sur la production et la composition laitière

Le stress thermique affecte négativement la production laitière ainsi que la composition du lait chez les bovins laitiers, spécialement chez les animaux de valeur génétique élevée (Bouraoui et al., 2002 ; Wheelock et al., 2010).

### III.1. La production laitière

Plusieurs études ont rapporté que le stress thermique induit une baisse significative de la production laitière (Gantner et al., 2011 ; Gorniak et al., 2014). Selon Bouraoui et al. (2002), la production laitière est négativement corrélée avec les THI moyens journaliers. En effet, lorsque le THI passe de 68 à 78, l'ingestion chez des vaches Holstein élevées dans le centre de la Tunisie baisse de 9,6 % et la production laitière de 21 %. Dans une étude plus récente et moyennant une enquête sur dix ans, Bouraoui et al. (2013) ont enregistré une diminution marquée de la production chez des vaches Pie-noire Holsteinisées (élevées aussi au centre de la Tunisie) pendant les mois d'août et septembre. Comme le montre la figure 7, la production par vache passe de 19,6 kg/j au mois de mars à 15,7 kg/j en moyenne aux mois d'août et septembre ; soit une diminution de 28 % pour des valeurs de THI passant de 60 en mars à 79 en août. Spiers et al. (2004) suggèrent que la production laitière chute de 0,41 kg/j par vache, pour chaque unité de THI au-delà de 69.

Le stade de la lactation représente un facteur important qui contribue à la sévérité du stress thermique. En effet, les vaches qui sont en milieu de lactation sont beaucoup plus

sensibles au stress thermique que les vaches en début ou en fin de lactation (Basirico et al., 2009 ; Bernabucci et al., 2010). Le déclin enregistré dans la production laitière a été estimé à 14 % chez les vaches en début de lactation et à 35 % en milieu de lactation. Joksimoviæ-Todoroviæ et al. (2011) ont montré que la production laitière moyenne chez des vaches Pie-noire Holsteinisées, pendant la première phase de lactation (60 premiers jours), est significativement plus élevée au printemps (42,74 ± 4,98 L) qu'en été (39,60 ± 5,09 L).

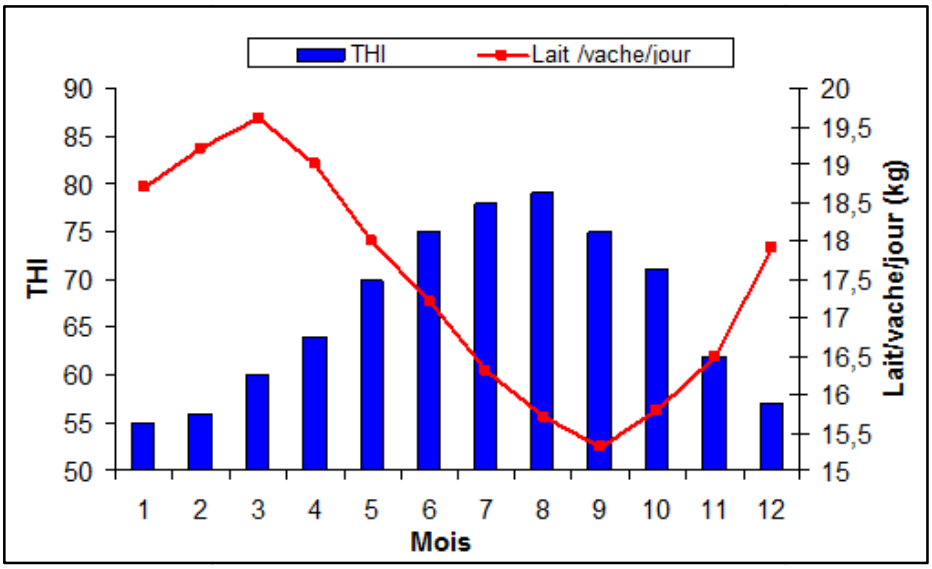



**Figure 7**. Variation mensuelle de la production laitière et des valeurs THI (Bouraoui et al., 2013)

D'autre part, pour les vaches hautes productrices, l'effet du stress thermique est amplifié car ces vaches présentent une activité métabolique plus intense et produisent donc plus d'extra-chaleur que les faibles productrices (West, 1994). Kadzere et al. (2002) ont montré que le potentiel génétique de vaches laitières hautes productrices ne s'est pas exprimé lorsque ces vaches ont été transférées vers des régions à climat tropical. En effet, les vaches laitières s'adaptent graduellement aux environnements chauds, ce qui permet de conclure que les vaches hautes productrices sont elles aussi sujettes à une acclimatation graduelle pendant les mois chauds de la saison estivale (Prosser and Brown, 1969). Pour rétablir l'homéothermie, les vaches laitières réduisent leur consommation de matières sèches et, en conséquence, on enregistre une chute de production laitière de 5 % à 20 °C et de 25 % à 30 °C (West, 1994).

Selon Tao et Dahl (2013), un stress thermique pendant la période de tarissement conduit à une réduction de la prolifération des cellules épithéliales de la glande mammaire, ce qui induit par la suite une chute de production laitière lors de la lactation suivante. D'autre part, le mois de vêlage peut aussi considérablement influencer la production laitière au pic de lactation, comme le montre la figure 8. On voit que les vaches laitières qui vêlent au cœur de l'été ont de plus grandes difficultés à atteindre des niveaux de production élevés en début de lactation, leur pic de production étant de 2 kg inférieur à la moyenne annuelle (Lefebvre et Lafontaine, 2005).

Dans des études portant sur des vaches laitières subissant un stress thermique, Wayman et al. (1962) ont montré que la diminution importante de la production du lait est le résultat direct de la réduction de la prise alimentaire. Ils ont aussi montré que la baisse de la production laitière à cause du stress thermique peut être réduite en plaçant les aliments non-ingérés par l'animal directement dans son rumen. Il est tout aussi important de noter que les vaches subissant un stress thermique montrent une diminution dans l'efficacité d'utilisation de l'énergie nécessaire à la production laitière. McDowell et al. (1976) stipulent que, lorsque la température ambiante passe de 18 à 30 °C, l'efficience de l'énergie utilisée pour la production laitière est réduite de 35 %, ce qui engendre une diminution de 15% dans la quantité totale de lait produite. En effet, une prise alimentaire réduite sous des conditions de stress thermique, conduirait à une diminution de l'activité ruminale ainsi que de l'absorption des nutriments. Ceci va conduire à une baisse significative de la disponibilité de l'énergie et des nutriments indispensables à la synthèse du lait par le glande mammaire (Collier et Beede, 1985; Collier et al., 2005).

Rhoads et al. (2009) et Wheelock et al. (2010) ont prouvé que la chute de la production laitière n'est qu'en partie (35%) attribuable à la baisse de la prise alimentaire causée par le stress thermique. Il existe d'autres réponses métaboliques mises en place par les vaches laitières pour réduire la chaleur interne, qui sont largement responsables du déclin de la synthèse du lait. Ainsi, la production laitière d'un groupe de vaches soumises à des conditions de stress thermique a chuté de 45 % contre seulement 19 % pour le groupe témoin non soumis au stress thermique mais ayant reçu les mêmes quantités d'aliments (Baumgard et Rhoads, 2007). En effet, le stress thermique altère les métabolismes glucidique, protéique et lipidique, indépendamment d'une prise alimentaire réduite

(Baumgard et Rhoads, 2013). Il a été démontré que chez les vaches thermiquement stressées, l'augmentation des concentrations basales d'insuline, couplée avec une meilleure réponse à l'insuline chez les vaches, seraient à l'origine de la réorientation de l'utilisation du glucose par des tissus autres que ceux de la glande mammaire, affectant ainsi la synthèse du lait (Wheelock et al., 2010 ; Baumgard et Rhoads, 2013 ; Rhoads et al., 2013).

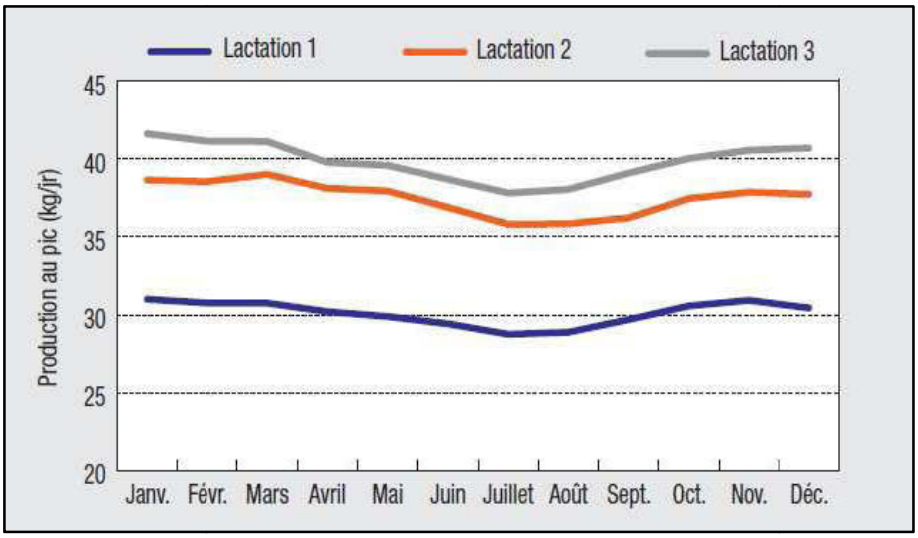



**Figure 8.** Production laitière au pic de lactation selon le mois de vêlage (Lefebvre et Lafontaine, 2005)

### III.2. La composition du lait

#### III.2.1. La teneur en protéines et en matières grasses

Un environnement chaud et humide affecte non seulement la production laitière mais aussi la qualité du lait (Rodriguez et al., 1985 ; Berbigier, 1988b ; Sharma et al.,1988). McDowell et al. (1976), ont signalé que lorsque des vaches Holstein en pleine lactation subissent un changement de température de 18 à 30 °C, la teneur du lait en matières grasses et en matière protéique diminue respectivement de 39,7 % et de 16,9 %. D'autre part, Lefebvre et Plamondon (2003) ont observé que, au Québec, de juin à mi-septembre 2002 l'indice THI a dépassé la valeur seuil de 72, au-delà de laquelle les vaches laitières commencent à éprouver un stress thermique. Au cours de cette période la production laitière

ainsi que la teneur du lait en matières grasses et en protéines ont été affectées par cette canicule estivale (figure 9).

Sous les conditions climatiques méditerranéennes de la Tunisie, Bouraoui et al. (2002) ont aussi trouvé que pendant la saison estivale, les matières grasses et les matières protéiques du lait étaient plus faibles que pendant la saison printanière (3,24 et 2,88 % contre 3,58 et 2,96 %, respectivement). De plus, dans une autre étude menée sur des vaches Holstein élevées en Tunisie et exposées à des conditions de stress thermique, Rejeb (2014) a rapporté que le taux butyreux du lait est passé de 3,82 à 3,65 % pour les hautes productrices (34 ± 3kg/j) et de 3,76 à 3,65 % pour les plus faibles productrices (23 ± 1,25 kg/j) quand le THI augmentait de 65,6 à 83,3. De même, le taux protéique est passé de 3,33 % à 3,26 % pour les vaches hautes productrices et de 3,28 % à 3,22 % pour les plus faibles productrices. La modification de la qualité nutritionnelle du lait dans l'étude précédente a été attribuée à la baisse de la consommation alimentaire et à la diminution de l'ingestion des fourrages, principales conséquences d'un stress thermique.

Plusieurs travaux de recherches se sont intéressés aux variations des taux butyreux et protéique du lait dans les conditions de stress thermique (Moran, 1989 ; Bernabucci et al., 2002 ; Bernabucci et al., 2010). Ominski et al. (2002) ont observé que les baisses des matières grasses du lait suite à une exposition à la chaleur sont associées à la baisse de la consommation des fourrages, ce qui va principalement augmenter le rapport acétate/propionate dans le rumen. Thatcher (1974) et Johnson (1976) ont signalé que la réduction de la matière grasse du lait est considérée comme la résultante directe du stress thermique, qui affecte négativement la fonction sécrétoire des glandes mammaires (Silanikove, 1992). D'autre part, l'analyse des fractions protéiques a également montré une réduction des taux de caséine, lactalbumine et immunoglobulines G et A (Nardone et al., 2006). Ces derniers auteurs ont rapporté que 80 % de ces changements sont liés à la baisse de la production laitière et 20 % à des problèmes d'ordre sanitaire qui ont probablement bouleversé les mécanismes internes d'homéostasie. Néanmoins, Bernabucci et al. (2002) ont signalé que la réduction du taux protéique du lait dans les conditions de stress thermique est attribuée principalement à la diminution du taux de caséines, notamment la teneur en ß-caséines. Selon Das et al. (2016), la sélection génétique intensive pour l'augmentation des performances de production laitière a accentué la sensibilité des vaches laitières au stress

thermique, conduisant ainsi à une tendance vers la baisse des courbes de lactation et à une qualité de lait appauvrie.

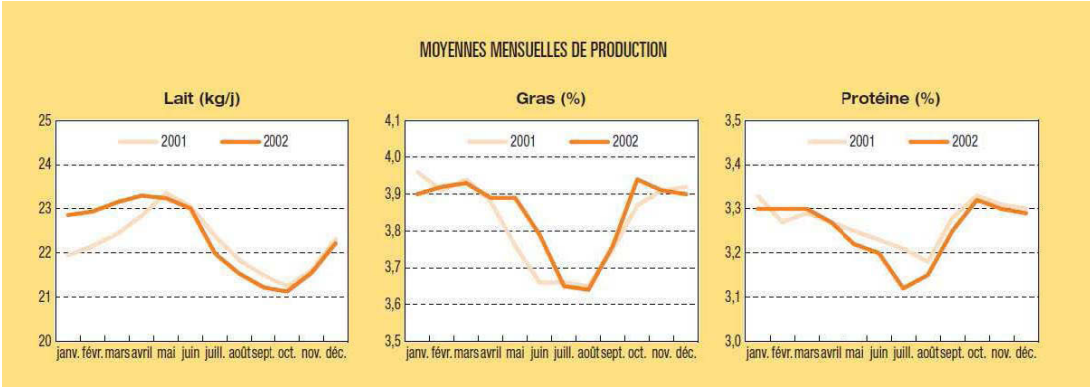



**Figure 9**. Variation de la production laitière, du taux butyreux et du taux protéique du lait en fonction des mois au Québec. (Lefebvre et Plamodon, 2003)

### III.2.2. La teneur en urée

L'urée est synthétisée dans le foie à partir de l'ammoniaque issu des fermentations des matières azotées dans le rumen et de l'excès de protéines digestibles dans l'intestin grêle (Dufrasne et al., 2010). En effet, lorsqu'il y a excès de protéines dégradables dans la ration, l'excèdent (transformé en ammoniac) passe dans le sang pour être rapidement détoxifiéé dans la salive, ou au travers de la paroi du rumen pour être réutilisé par les microbes. L'essentiel de l'urée est épurée par le rein, puis excrétée dans l'urine. Cependant, avant d'être excrétée, l'urée diffuse dans tous les liquides corporels. Elle est donc présente dans le lait à une concentration voisine de celle du sang (Satter et Roffler, 1975). Les teneurs en urée donnent des indications sur l'efficience de l'utilisation des protéines dégradables dans le rumen et peuvent servir aussi à évaluer l'équilibre énergie-azote de la ration (Geerts et al., 2004) et les rejets azotés (De Campeneere et al., 2006). Comme l'indique la figure 10, l'INRA en 1995 expliquait par trois facteurs les variations de la teneur d'urée du lait : la principale était le bilan de nutrition de la flore ruminale (PDIN-PDIE), l'excès de PDIE par rapport aux besoins protéiques et, de façon plus secondaire, le niveau de production laitière.

Plusieurs études se sont intéressées à la variation du taux d'urée du lait en fonction des facteurs saisonniers (Refsdal et al., 1985 ; Carlsson et Perhson, 1993 ; Hojman et al., 2005).

Carlsson et Pehrson (1993) ont clairement montré que la moyenne du taux d'urée était supérieure lorsque les vaches étaient au pâturage. De même, Dufrasne et al. (2010) ont trouvé que les valeurs d'urée dans le lait les plus élevées ont été enregistrées au mois d'août (338 mg/L) et les plus faibles en décembre (200 mg/L) (figure 11). L'augmentation des teneurs en urée dans le lait a été attribuée en grande partie au changement de ration, surtout lorsque les vaches laitières en stabulation sont mises à l'herbe, mais aussi à la variation des teneurs en MAT de l'herbe pâturée qui augmentent linéairement de 18 % en avril à 24 % en octobre (Dufrasne et al., 2008). Par ailleurs, d'autres paramètres comme la teneur en sucres solubles de l'herbe, qui diminue pendant la saison de pâturage, pourrait aussi contribuer à expliquer l'augmentation des teneurs en urée dans le lait, en réduisant l'énergie fermentescible rapidement disponible pour la flore du rumen (Dufrasne et al., 2010).

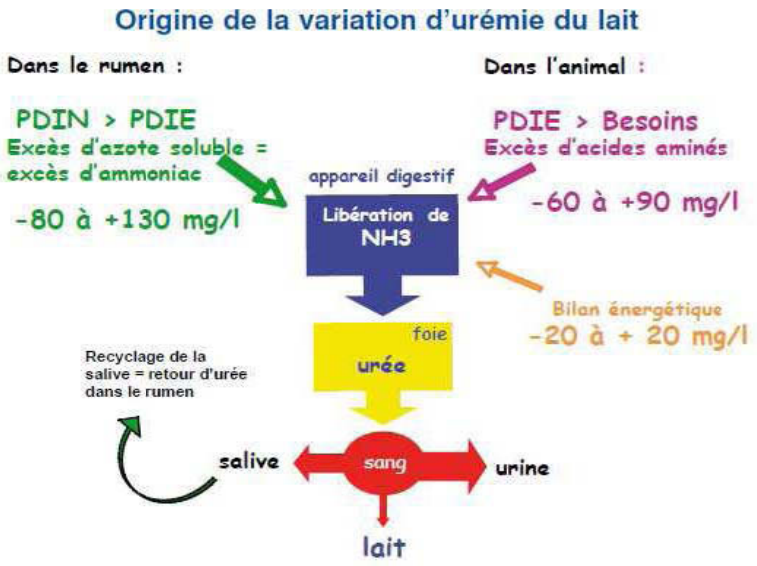



**Figure 10**. Origine de la variation de l'urémie du lait (Cap élevage, 2008)

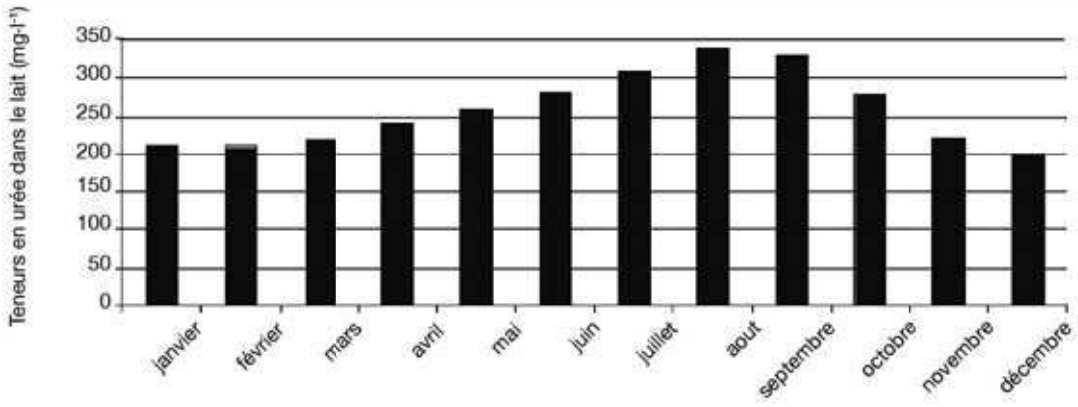



**Figure 11**. Évolution mensuelle des teneurs en urée dans le lait (Dufrasne et al., 2010)

### III.2.3. Le comptage des cellules somatiques

Bouraoui et al. (2002) et Waage et al. (1998), ont constaté qu'il existe une corrélation positive entre la chaleur et l'augmentation du nombre des cellules somatiques dans le lait. Dans les travaux de Bodoh et al. (1976) et (Bossuyt et al. 1976), un pic de cellules somatiques a été enregistré pendant le mois d'août. Wegner et al. (1976) ont même signalé que le nombre croissant des cellules somatiques, atteint en été, persiste après la diminution du THI. Dans la figure 12 (Nickerson, 2014), on voit très bien que le nombre de cellules somatiques est faible pendant l'hiver, puis il augmente au début de l'été, développant ainsi un pic observée le plus souvent pendant le mois d'août et qui reste relativement élevé jusqu'à mi-septembre. Hammami et al. (2013a) expliquent que l'augmentation du comptage des cellules somatiques du lait suite à l'élévation des THI est attribuable à un dysfonctionnement du système immunitaire qui est lui-même provoqué par un stress oxydatif. Cependant, Roussel et al. (1969) et Paape et al. (1973) ont montré que le nombre de cellules somatiques n'a pas varié malgré la manifestation de tous les signes physiologiques d'un stress thermique. Paape et al. (1973) ont expliqué que comme leurs essais sont réalisés dans une chambre climatique (THI maximum = 82), il est plus facile de contrôler le statut bactériologique et d'autres symptômes relatifs à la santé des mamelles des vaches laitières, permettant ainsi une interprétation constructive et plus précise des données de comptage des cellules somatiques. Ces derniers auteurs stipulent que les résultats significatifs trouvés dans les études précédentes sont probablement dus à la présence de vaches ayant des mammites subcliniques et donc un comptage de cellules somatiques à la base assez élevé (Smith et Schultze, 1967 ; Ward et Schultz, 1971).

D'autre part, (Reneau, 1986) stipule que l'ingestion des aliments et la consommation de l'eau ont un effet important sur la diminution de la production laitière et l'élévation du nombre des cellules somatiques. En effet, lorsque la production laitière baisse en réponse aux fortes chaleurs, la concentration des cellules somatiques dans le lait augmente mathématiquement.

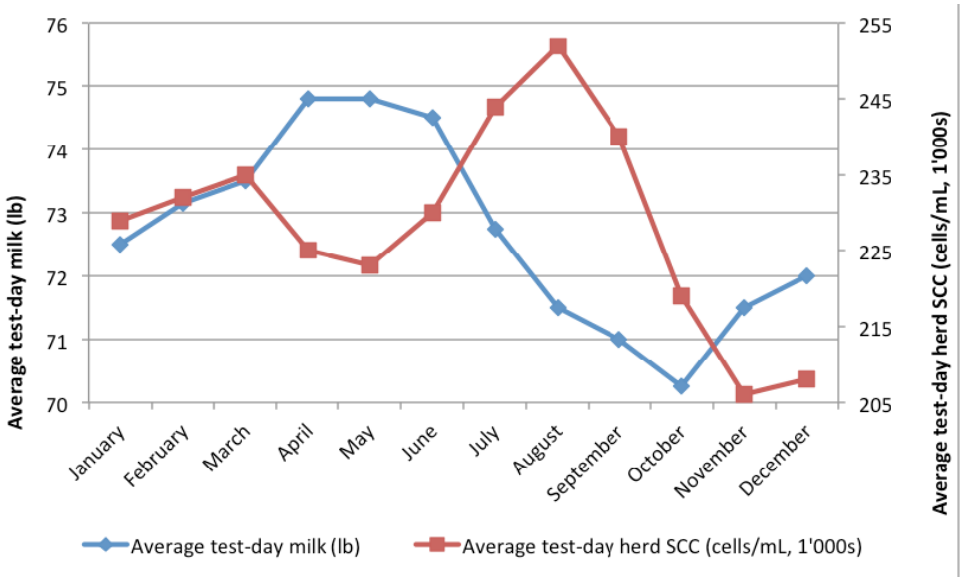



**Figure 12.** Variations de la production laitière et du comptage des cellules somatiques (SCC) en fonction des mois (Nickerson, 2014).

### IV. Impact du stress thermique sur l'immunité des vaches laitières

Le stress thermique affaiblit aussi le système immunitaire des vaches laitières et le rend plus sensible à plusieurs types d'infections. Le stress thermique comme n'importe quel agent stressant, active l'axe hypothalamo-hypophyso-surrénalien. L'activation de cet axe conduit à l'élévation de la concentration des glucocorticoïdes (cortisol) plasmatiques (Burton, 2007). En effet, Scott et al. (1970) ont montré que l'exposition aiguë des vaches laitières à des températures élevées causait d'importantes augmentations de la concentration du cortisol plasmatique. Ces augmentations provoquent une diminution de l'expression de la L-sélectine à la surface des neutrophiles (figure 13), ces neutrophiles étant considérés comme la première ligne de défense de la vache laitière contre les agents pathogènes (Weber et al., 2004). De même, la L-sélectine constitue un marqueur de l'immunité innée et sa diminution

entraîne un dysfonctionnement des neutrophiles qui ne peuvent plus pénétrer dans les tissus envahis. Cette situation a des conséquences négatives sur la réponse immédiate du système immunitaire à une agression quelconque (Kansas, 1996).

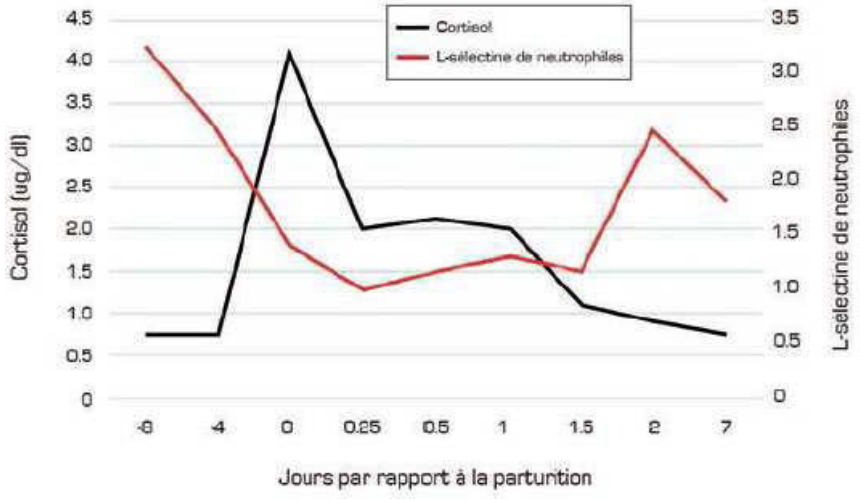



**Figure 13**. Relation entre la concentration du cortisol et la L-sélectine de neutrophiles, un marqueur de la fonction immunitaire (d'après Burton et Erskine, 2003)

D'autre part, l'augmentation de la concentration du cortisol en réponse au stress thermique, provoque une hausse des concentrations cellulaires des heat shock proteins (**HSP**), qui sont les protéines de choc thermique (Collier et al., 2008). Le nombre des HSP augmente pendant une période d'hyperthermie et leur rôle consiste à protéger et à fortifier les cellules durant un stress quelconque. Les HSP servent de signal pour le système immunitaire et incitent les neutrophiles et les macrophages à mieux se défendre contre les agents agresseurs (Campisi et al., 2003 ; do Amaral et al., 2011). De plus, Heasman et al. (2003) et Burton et Erskine (2003) ont constaté que les mécanismes de défense de l'organisme, à savoir les phagocytoses et les flambées oxydatives (production de radicaux libres oxydatifs qui affectent les fonctions de la membrane cellulaire), sont ralentis lorsque les concentrations en cortisol augmentent. Do Amaral et al. (2011), ont également trouvé que le stress thermique avait un effet rémanent sur le système immunitaire durant la lactation. En effet, les neutrophiles prélevés chez des vaches laitières exposées au stress

thermique pendant le tarissement et le vêlage présentaient une activité phagocytaire et de flambée oxydative moindre, durant 20 jours après le vêlage.

Les vaches dont le système immunitaire a été affaibli sont plus sujettes aux mammites et aux autres types de maladies infectieuses ou métaboliques (Goff et Kimura, 2002). Dans ce cadre, Bouraoui et al. (2013) ont étudié la variation du taux de mammites en fonction des THI (Figure 14). Ces auteurs ont trouvé que les mammites étaient plus fréquentes pendant la saison estivale, qui présentait des valeurs élevées de THI. Le pourcentage le plus élevé de mammites a été enregistré pendant le mois de juillet (24,3 %), contre seulement 5 % ou moins par mois de décembre à mai. L'augmentation du taux de mammites a été attribuée à une diminution des défenses immunitaires des vaches laitières en condition de stress thermique. Selon Godden et al. (2003), une forte chaleur et un taux d'humidité relative élevée ont conduit à l'augmentation de la charge en agents pathogènes influant ainsi l'incidence des mammites.

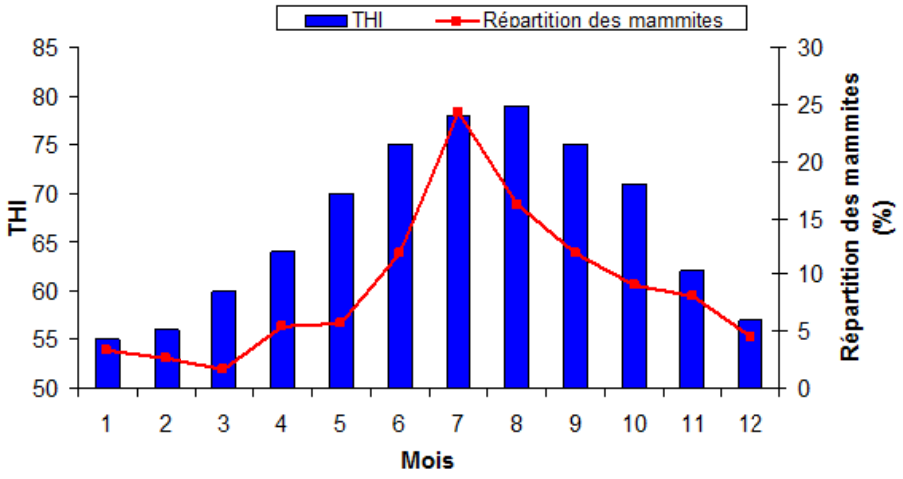



**Figure 14**. Evolution de la prévalence des mammites en fonction du THI (Bouraoui et al., 2013)

## V. Impact du stress thermique sur la reproduction des vaches laitières

Les températures élevées peuvent altérer d'une façon considérable les profils hormonaux et donc l'activité ovarienne des vaches laitières. Ceci est principalement dû aux modifications observées au niveau de l'axe H-H et à une diminution de la sécrétion de GnRH (Dobson, 2001). Plusieurs auteurs ont aussi observé une diminution de la sécrétion de LH et de sa pulsatilité (amplitudes et fréquences des pulses), ainsi qu'une réduction de son pic pré-ovulatoire (Wise et al., 1988). D'autre part, des concentrations plasmatiques d'œstradiol réduites ont été observées chez des femelles ayant subi un stress thermique, et un retard de lutéolyse a été rapporté (Wolfenson et al., 1997 ; Wilson et al., 1998)

Ces perturbations hormonales pourraient également induire une altération de la qualité de l'ovocyte qui expliquerait une moins bonne fertilité. Smith et Dobson (2002) suggèrent que le cortisol pourrait jouer le rôle d'interface entre un stresseur et la baisse d'efficacité de la reproduction. Le stress thermique semble aussi nuire au développement folliculaire et altérer la fonction du follicule dominant de la première vague, et celle du follicule pré-ovulatoire (Wolfenson et al., 1995). Le stress thermique conduit aussi à la libération d'ovocytes âgés, ce qui diminue irrémédiablement la fertilité (Mihm et al., 1999).

D'autre part, plusieurs études (Gwazdauskas et al., 1975 ; Tucker, 1982) ont montré une baisse de l'intensité et de la durée de l'œstrus lors de températures supérieures à 25-30 °C. L'expression des chaleurs est ainsi passée de 14-18 heures à 8-10 heures. Un allongement du cycle (allant jusqu'à 25 jours) a également été observé chez des femelles subissant un stress thermique (Tucker, 1982). Le stress thermique peut aussi conduire à des ovulations silencieuses et à des chaleurs réduites en intensité et en durée (Christison et al., 1972). Ces conclusions semblent être en accord avec les résultats de Hall et al. (1959) cités par Faget (1992). En effet, lors d'expériences menées sous un climat subtropical, la durée de l'œstrus était de 11,9 heures et un anœstrus survenait au moins une fois chez 33,4 % des animaux. Exposées à des températures de 32 °C, les génisses avaient un œstrus plus court de 5 heures par rapport à celles maintenues à 21,3 °C. L'anœstrus semble d'ailleurs être une constante lorsque des génisses sont soumises à une température supérieure à 38 °C (Bond et Mc Dowell, 1972).

Bouraoui (2013) a également étudié la variation du taux de conception ainsi que l'intervalle vêlage-vêlage des vaches Pie Noir Holsteinisées élevées au centre de la Tunisie (Figure 15). On constate une chute du taux de conception (**TC**) pendant la saison estivale caractérisée par des THI élevés. Le TC le plus bas était de 25 % au mois de juin contre un TC de 43,5 % pendant le mois de novembre. Ces résultats confirment ceux trouvés par Roman-Ponce et al. (1977) qui indiquaient une chute du TC de 44,4 à 25,3 % lorsque la température passait de 28,4 à 36,7 °C. En ce qui concerne la variation de l'intervalle vêlage-vêlage (**IVV**), les vaches qui vêlent du mois d'avril au mois de juillet ont les IVV les plus longs. Par contre les vêlages de septembre, octobre et novembre se traduisent par les IVV les plus courts.

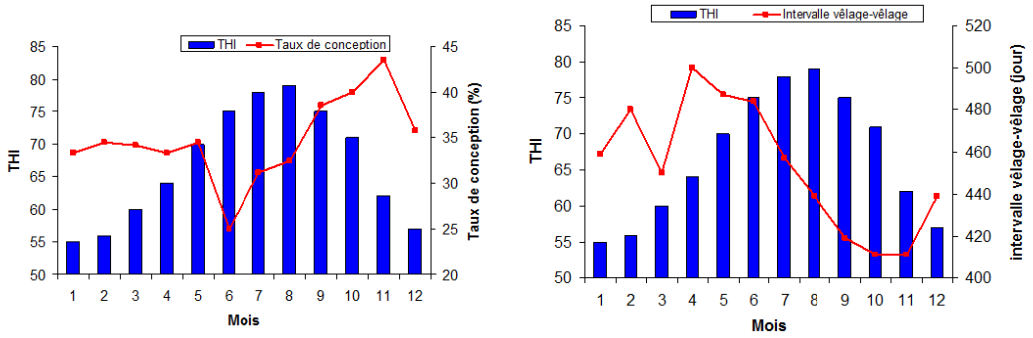



**Figure 15.** Variation du taux de conception, de l'intervalle vêlage-vêlage et des THI selon les mois (Bouraoui et al., 2013)

**A Retenir**

Les conséquences du stress thermique sur les vaches laitières sont multiples: modification des paramètres physiologiques dont la fréquence respiratoire, la fréquence cardiaque et la température rectale ; modification du profil hormonal ; diminution de la consommation de matière sèche ; altération des métabolismes lipidique, protéique, glucidique et énergétique ; baisse de la production laitière et modification de la composition du lait ; dysfonctionnement du système immunitaire ; baisse de l'expression des chaleurs et de la fertilité. On a longtemps présumé que le stress thermique exerçait son effet négatif sur la production laitière principalement via la diminution de la consommation de matière sèche, alors que cette baisse de consommation n'explique qu'environ la moitié de la perte de production. Le reste serait attribuable à des adaptations métaboliques de la vache au stress thermique, qui défavorisent la production de lait.

Ces conséquences sont amplifiées chez vaches hautes productrices, telles que celles de race Holstein, car leur activité métabolique plus intense génère plus de chaleur. Les observations de terrain laissent présager que les races mixtes, telles que la race Tarentaise, présentent une meilleure résistance aux conditions environnementales difficiles (voire extrêmes) et à leur variation, mais aucune étude n'avait auparavant fournit de résultats scientifiques quant à ce constat. Dans ce présent travail, les effets du stress thermique sur les paramètres physiologiques, métaboliques, immunitaires, le comportement alimentaire (ingestion et digestion) ainsi que sur la production laitière (aux plans quantitatif et qualitatif), seront étudiés en vue d'élaborer un profil complet de l'adaptation de la race Tarentaise aux conditions tunisiennes, et plus précisément aux conditions du stress thermique pendant la saison estivale.

# Chapitre III. Actions de maîtrise et de prévention du stress thermique chez les vaches laitières

Ce chapitre vise à énumérer les différents moyens dont peuvent disposer les éleveurs pour pallier les effets négatifs du stress thermique. Ces moyens peuvent être liés à l'environnement d'élevage des animaux, à leur alimentation ou à leur sélection génétique.

## I. Les modifications physiques de l'environnement

### I.1. Les zones ombragées

Offrir de l'ombre aux animaux, surtout dans l'aire d'alimentation, constitue un moyen efficace pour la lutte contre le stress thermique et ceci en améliorant la thermolyse par radiation vers un milieu plus frais que la surface corporelle (Berman et Horovitz, 2012). La simple présence d'une structure ou d'un bâtiment apportant de l'ombre fournit quelques améliorations aux animaux exposés aux fortes chaleurs. Selon Bonnefoy et Noordhuizen (2011), les arbres qui prodiguent de l'ombre naturelle permettent non seulement de bloquer les rayons solaires mais aussi de rafraîchir l'air ambiant et de faciliter l'évaporation de l'humidité cutanée (Hahn, 1982 ; Wiersma, 1982). D'autre part, Silanikove (2000) suggère que la mise à disposition de structures ombragées constitue une mesure essentielle pour le bien-être animal, surtout dans les régions caractérisées par des températures ambiantes estivales supérieures à 24 °C et des THI excédants 72. Selon Bond et Kelly (1955) et Muller et al. (1994a), une structure ombragée faite dans les règles de l'art permettrait de réduire la charge thermique totale absorbée de 30 à 50 %. Plusieurs études ont aussi souligné les bienfaits de ces structures sur la productivité et l'efficience des réponses thermorégulatrices chez les ruminants (Legates et al., 1991 ; Muller et al., 1994a, b, c).

Armstrong (1994) stipule que dans les régions chaudes comme le sud des Etats-Unis, un lieu ombragé est considéré comme essentiel pour maintenir la production laitière et la reproduction à de bons niveaux. Il peut également devenir nécessaire à la survie des animaux. Dans des climats plus tempérés, l'ombre, pourtant non essentielle, est efficace pour réduire les effets des fortes températures. Selon Armstrong (1994), les tôles ondulées représentent le moyen le plus utilisé pour offrir de l'ombre aux animaux d'élevage, du fait

de leur coût modéré, de leur résistance et du faible travail d'entretien. L'efficience de ces toitures métalliques protectrices peut être améliorée par une peinture blanche et par l'orientation de la structure ; c'est le compromis entre une efficacité protectrice (sans omettre une bonne ventilation) et le maintien de surfaces sèches (à l'abri des précipitations) (Armstrong, 1994). Bond et al. (1961) proposent de poser une isolation à 2,5 cm directement sous la toiture métallique, ce qui va permettre de diminuer la charge thermique par radiation absorbée par la vache.

Aux Etats-Unis, la surface des zones ombragées varie de 1,4 à 2,5 $m^2$ par vache suivant les recommandations de Hahn (1985) alors que Buffington et al. (1983) recommandent un minimum d'ombre de 4,2 à 5,6 $m^2$par vache. En Australie, ces normes sont de 3,3 $m^2$ par vache (Gaughan et al., 2010) et de 6,7 à 13,5 $m^2$ par vache dans le Royaume-Uni (Fregonesi et Leaver, 2002). Dans leur étude portant sur l'effet de la variation de la surface des zones ombragées sur le comportement et la physiologie des vaches laitières, Schütz et al. (2010) ont trouvé que la fréquence respiratoire diminuait au fur et à mesure que la surface ombragée augmentait (51,57 et 62 resp/min pour 9,6 $m^2$ d'ombre par vache, 2,4 $m^2$ et pas d'ombre du tout, respectivement). De même la température rectale était plus élevée chez les vaches n'ayant pas de surface protectrice ou ayant une surface ombragée de 2,4 $m^2$ par vache.

### I.2. La ventilation forcée

Berman et al. (1985) ont étudié l'effet d'une ventilation forcée dans un bâtiment d'élevage ouvert (1,5 à 3 m/s) sur la température rectale, la fréquence respiratoire, la température à la surface de la peau, le poids et la production laitière de 170 vaches Holstein israéliennes, deux fois par semaine de juillet à mars, pendant deux années. Ces auteurs ont trouvé que pour une température ambiante allant de 10 à 24 °C, la température rectale n'était ni affectée par la valeur de la température ambiante extérieure, ni par la ventilation forcée. Néanmoins, ils ont constaté une augmentation de la température rectale de l'ordre de 0,2 °C par kg de lait chez les vaches produisant plus de 24 kg/j. Cependant, entre 26 et 36 °C, la température rectale était positivement corrélée avec la température ambiante pour les deux groupes de vaches, bénéficiant ou non de la ventilation forcée, mais cette augmentation était divisée par deux pour le premier groupe (-2,40 + 0,08Ta +0.02Y contre -4,57 +0,17Ta pour les hautes productrices ; -2,64 +0,09Ta +0,02Y contre -5,65 +0,20Ta pour les faibles

productrices ; Y étant la production laitière corrigée, en kg/j). En outre, la température rectale progressait avec la production laitière, à la fois chez les hautes productrices mais également chez les faibles productrices sous ventilation forcée. Berman et al. (1985) ont aussi trouvé que les mouvements d'air provenant de la ventilation forcée réduisaient la fréquence respiratoire moyenne, de 73 à 59 resp/min.

D'autre part, Younas et al. (1993) ont trouvé que les températures rectales minimales et maximales de vaches Holstein rafraichies (38,6 et 39,6 °C, respectivement) étaient significativement plus faibles que celles de vaches témoins non rafraichies (39,7 et 40,2 °C, respectivement). De plus, les vaches ventilées se refroidissaient plus rapidement la nuit et leur température rectale approchait alors la zone de thermoneutralité pendant quelques heures. La ventilation semblait aussi améliorer l'expression des chaleurs pour les vaches qui en avaient bénéficié pendant 21 jours avant l'injection de PGF2α.

### I.3. Le douchage

L'humidification de la peau des animaux (ponctuellement dans la journée) et l'évaporation de l'eau consécutive augmentent les pertes de chaleurs sans nécessairement modifier les conditions d'ambiance. L'utilisation des systèmes d'arrosage a été rapportée par Seath et Miller dès 1947 (cités par Flamenbaum et al., 1986). En effet, des vaches exposées à des rayonnements solaires pendant plusieurs heures étaient humidifiées par aspersion. La diminution de la température rectale était plus marquée pour les animaux bénéficiant du traitement par rapport aux témoins. De même, un troupeau de bovins rafraîchi de la sorte et placé à l'ombre présentait une température rectale beaucoup moins élevée (37,9 ± 0,1 °C contre 38,5 ± 0,1 °C) et une consommation alimentaire maintenue (Flamenbaum et al., 1986).

Le principe du douchage consiste à asperger les vaches d'une fine brumisation ; ainsi l'évaporation de l'eau répandue assurera le refroidissement des animaux (Armstrong, 1994). Pour l'optimiser, cette méthode peut être couplée à une ventilation (Figure 16). En effet, Flamenbaum et al. (1986) ont étudié un système de refroidissement associant douche et ventilation forcée. Ils ont mis en place plusieurs protocoles avec des paramètres différents de densité des animaux et de durée des séquences "humidification et évaporation". Pour être efficace, les buses de projection d'eau doivent déverser 1,25 L/min/$m^2$ et les fréquences

d'arrosage doivent être toutes les 5 minutes si le stress thermique est sévère (THI>90), et toutes les 15 minutes pour un stress plus modéré (80<THI<90). Le débit des ventilateurs doit atteindre 0,33 $m^3/s$ par animal (Smith et al., 2002). Le fait d'arroser les vaches produit plus d'effets que la simple ventilation, l'efficience de ce système pouvant être mesuré parla fréquence respiratoire. Cependant, Her et al. (1988) ont proposé un autre système comprenant une séquence d'arrosage de 30 secondes suivie d'une ventilation forcée pendant 30 minutes. Ces auteurs ont constaté que leur système permettait de réduire l'augmentation de la température rectale des vaches laitières pendant la saison estivale de 0,5 à 0,9 °C. De plus, cette température se maintenait davantage dans la zone de thermoneutralité (38,6 °C).

Suivant les recommandations de Smith et al. (2002), les systèmes d'aspersion ne doivent pas être placés sur les logettes ou les aires paillées. Ils doivent être placés à l'arrière des cornadis ou de la barre d'auge et sur les aires d'exercice. Les ventilateurs doivent avoir un diamètre d'au moins 75 cm, jusqu'à 90 cm, et assurer un débit de 0,47 $m^3/s$ au maximum. L'orientation des ventilateurs a également son importance : ils doivent être inclinés de 30° par rapport à la verticale, qu'ils soient ou non couplés à une aspersion préalable.

**Figure 16.** Système d'aspersion avec ventilateurs proposé par le site Ontario.ca (2015)

### I.4. La nature du couchage

Les différences de température entre le corps de l'animal et la surface du couchage sont compensées par conduction thermique (Kramer, 2001). Lorsque la température de la surface du couchage est plus basse que celle du corps de l'animal, la chaleur émanant de

l'animal couché est transmise à la surface du sol. Lorsqu'il fait chaud, l'évacuation de cette chaleur par le sol peut être avantageuse.

Keck et Zähner (2004) ont étudié l'évacuation de la chaleur en fonction de la nature des matériaux utilisés pour la surface du couchage, en utilisant une sonde chauffante fabriquée par Sieder (1999). Ces auteurs ont comparé en exploitation les matériaux suivants : béton nu, sable, tapis en caoutchouc traditionnels (épaisseur de 18 mm) et tapis souples, tout en couvrant chaque matériau par une couche de paille supplémentaire de 0,18 $kg/m^2$. Pour comparer l'efficience de ces matériaux, Keck et Zähner (2004) ont une utilisé une valeur d'évacuation de la chaleur (en $°C/m^2$) à court terme (10 min) qui permet d'appréhender l'impression de froid directement après que l'animal soit couché, et une valeur à long terme (60 min). Le béton et le sable ont permis d'évacuer beaucoup de chaleur à court terme comme à long terme, alors que les tapis en caoutchouc traditionnels affichaient une forte évacuation de chaleur à court terme. Cette comparaison de matériaux a été aussi réalisée de manière expérimentale suivant la saison (hiver et été). En général, en été, l'évacuation de la chaleur à long terme était moindre qu'en hiver. On peut donc conclure que le choix de la nature des matériaux utilisés dans la surface du couchage relève d'une grande importance dans les stratégies de lutte contre le stress thermique, car pendant la saison estivale les fortes déperditions de chaleur sont avantageuses pour que les vaches puissent mieux évacuer leur chaleur excédentaire (Silanikove, 2000).

## II. Les modifications alimentaires et nutritionnelles

### II.1. Limitation de la baisse de la prise alimentaire

Les modifications nutritionnelles dans des conditions de stress thermique peuvent aider les animaux d'élevage à maintenir l'homéostasie mais aussi à prévenir la déficience en nutriments suite à la baisse de l'ingestion. En effet, West et al. (1999) stipulent que la réduction de la matière sèche ingérée dans un environnement chaud réduit considérablement la disponibilité des nutriments à l'absorption mais aussi l'efficience de leur utilisation. Comme la suralimentation requit beaucoup plus de chaleur pour excréter l'excès d'azote sous forme d'urée, West el. (1999) proposent d'apporter aux vaches laitières qui sont soumises au stress thermique, des rations contenants moins que 18 % de protéines par kg de

MS. De même, l'optimisation des protéines non dégradables dans le rumen permet d'améliorer la production laitière dans les climats chauds (West et al., 1999). Cependant, modifier le niveau et la nature de l'apport azoté a des effets contradictoires (Morand-Fehr et Doreau, 2001). En effet, quand le régime est déficitaire en azote fermentescible, apporter une source d'azote fermentescible (urée ou ammoniac) permet d'accélérer les fermentations dans le rumen et d'augmenter la consommation alimentaire (Pearson et Archibald, 1990 ; Ahmed et Abdellatif, 1995). Mais ces résultats s'observent soit lorsque le stress thermique est modéré, soit lorsque le niveau d'ingestion des fourrages non supplémentés est très faible, soit enfin quand les animaux sont bien adaptés au stress thermique. Dans les autres cas, la consommation alimentaire a plutôt tendance à ne pas augmenter (Morand-Fehr et Doreau, 2001).

D'autre part, dans des conditions de stress thermique, les vaches laitières qui sont nourries avec des rations contenant peu de fibres (14 % d'ADF [acid detergent fiber] contre 17 ou 21 %), ont vu leur consommation alimentaire et leur production laitière augmenter (West, 2003). Ainsi, la réduction de la quantité de fibres dans la ration réduit la production de chaleur par le métabolisme corporel (Ponter et al., 2004). Il est aussi possible d'augmenter l'apport énergétique de la ration afin de limiter la production de chaleur d'origine fermentaire. Ainsi, un apport supplémentaire en concentré permet de maintenir l'ingestion, par réduction de l'encombrement du rumen (Morand-Fehr et Doreau, 2001). De plus, cet apport supplémentaire, permet de favoriser la production de propionate, qui entraîne une moindre production de chaleur que l'acétate (Sanchez et al., 1994 ; Oldick et Firkins, 1997).

Linn et al. (2004) proposent d'augmenter la densité énergétique de la ration en ajoutant des lipides. Cet apport lipidique a permis d'améliorer l'efficience de la production laitière chez des vaches soumises à des conditions de stress thermique. En effet, à poids identique, les matières grasses apportent environ 2 fois plus d'énergie brute que les glucides (Baumgard et al., 2006). Ainsi, il est envisageable d'augmenter la quantité d'énergie consommée par la vache et de diminuer la nécessité de thermolyse dans les conditions de stress thermique (Ponsart et al., 2004). Néanmoins, l'ajout de matières grasses peut perturber la fermentation dans le rumen et diminuer la digestibilité des fibres de la ration (Jenkins, 1993 ; Enjalbert, 1995). Ces effets sont plus importants dans le cas d'un régime qui provoque

un pH faible dans le rumen, associé à une libération rapide des matières grasses polyinsaturées, qu'avec un régime qui provoque un pH relativement élevé et une libération lente des matières grasses sous la forme d'acides gras (Enjalbert, 1995).

### II.2. Complémentation alimentaire

Lorsque les ressources fourragères sont insuffisantes ou de qualité nutritive moyenne (voire médiocre), les éleveurs se voient contraints d'augmenter l'apport en aliments concentrés surtout pendant la saison estivale, d'où le risque important d'acidose (Majdoub-Mathlouthi et al., 2008). Cette acidose se traduit souvent par une réduction de l'ingestion et par conséquent de la production laitière. Beauchemin et al. (2003) ont rapporté que l'apport de levures *Sacchaomyces cerevisiae* (**Sc**) stimule le développement de la flore bactérienne du rumen consommatrice de lactate, se traduisant ainsi par une amélioration des conditions ruminales ainsi que des performances zootechniques. Huber (1998) stipule que les levures Sc améliorent l'ingestion et la production laitière dans des conditions de stress thermique. En effet, Marsola et al. (2010), ont étudié l'effet de l'addition de la levure Sc sur l'efficacité alimentaire et sur l'environnement du rumen de 60 vaches hautes productrices soumises à des conditions de stress thermiques extrêmes (THI=80, en moyenne). Ces auteurs ont trouvé que la levure Sc a augmenté l'efficacité alimentaire de 7 % soit une augmentation de 120 g de lait/kg de MSI. De plus, ces auteurs ont enregistré une diminution significative du nombre de vaches à risque d'acidose, en se basant sur le pH ruminal et le taux de lactate dans le rumen.

En condition de stress thermique l'activité antioxydante du sang baisse, augmentant ainsi la production des radicaux libres, ce qui est généralement associé à la réduction du taux de survie des embryons (Ealy et al., 1992 ; Harmon et al., 1997). En effet, les radicaux libres peuvent agir comme messagers secondaires et activer certains facteurs ou gènes. Lorsqu'ils ne sont pas contrôlés, ils entraînent de nombreux dommages cellulaires et tissulaires. C'est dans ce contexte que plusieurs études se sont intéressées à l'utilisation des antioxydants (vitamine E et sélénium, vitamine A et ß-carotène) comme thermo-protecteurs pour contourner les effets néfastes du stress thermique sur la reproduction et la fertilité des vaches laitières (Ealy et al.,1994 ; De Rensis et Scaramuzzi, 2003). D'autant plus que certaines études ont démontré que des carences en vitamine E et sélénium pouvaient être à l'origine d'une baisse de la fertilité (Ealy et al.,1994 ; Arechiga et al., 1998b). Toutefois,

l'administration à court terme de la vitamine E, au moment de l'insémination artificielle ou 30 jours après la mise-bas, n'apporte aucune amélioration de la fertilité pendant la saison estivale, pas plus que l'administration de sélénium et de ß-carotène (Ealy et al., 1994). En revanche, l'administration à long terme de ß-carotène a des effets bénéfiques sur la fertilité des vaches laitières dans des conditions de stress thermique. En effet, Arechiga et al. (1998a) ont montré que le taux de gestation à 120 jours était amélioré (35,4 % contre 21,1 %) chez les vaches bénéficiant de rations complémentées en ß-carotène pendant plus de 90 jours durant les périodes de stress thermique.

### II.3. Apports minéraux et abreuvement

En matière de minéraux, les pertes par transpiration et respiration doivent être prises en comptes, surtout si les conditions défavorables perdurent (Ponsart et al., 2004 ; Ponter et al., 2004). Ces pertes peuvent être compensées par un apport en sodium, et il convient aussi de vérifier la teneur en potassium de la ration complète. L'absorption de potassium dans la circulation portale peut être réduite de 50 % en cas de stress thermique (Sanchez et al., 1994). Mais une modification de l'équilibre cation-anion, avec augmentation des teneurs en $Na^+$ et $K^+$ (0,5 et 1,5 % de la MS, respectivement) et diminution de la teneur en $Cl^-$, permet une amélioration du niveau d'ingestion (West et al., 1992). Ainsi, en cas de fortes chaleurs, l'apport minéral doit être revu en fonction des apports fourragers.

Enfin, il faut fournir une grande quantité d'eau fraîche et propre, à l'ombre, près des aires de repos ; fournir au moins un point d'eau pour 20 vaches, avec un débit de 11 à 19 L/min et une profondeur d'au moins 8cm (Lefebvre et Lafontaine, 2007). Dans les grands pâturages, le bétail devrait avoir aisément accès à l'eau ; il faut donc ajouter des réservoirs supplémentaires au besoin. En effet, les vaches ne devraient pas traverser plus de 30 mètres dans les prés lorsque la température, l'humidité et la chaleur radiante sont élevées (Ponter et al., 2004). D'autre part, il faut prévoir une largeur totale des abreuvoirs de 9 mètres pour 100 vaches, et donner de l'eau à basse température (14 °C par exemple). Une vache haute productrice peut boire de 20 à 25 litres d'eau de plus en période de forte chaleur qu'en période fraîche ; il faut donc s'assurer de répondre à cette demande accrue (Lefebvre et Lafontaine, 2007). Selon Wilks et al. (1990), l'apport d'eau fraîche à 10,6 °C au lieu de 27,0 °C a, dans certains cas, permis d'améliorer le niveau d'ingestion (+0,28 kg/j de MS/100 kg de PV) et la production laitière (+1,2kg/j) des vaches Holstein exposées à des températures

ambiantes élevées. Anderson (1985) a également montré que boire de l'eau fraîche, à une température de 17 °C au lieu de 24 °C, permettait d'augmenter la consommation totale d'eau (+5,4 L/j) et d'obtenir significativement de meilleurs niveaux de production laitière (+0,24 kg/j).

**III. Sélection génétique pour la résistance à la chaleur**

Finch et al. (1982) ont rapporté une corrélation négative entre la transpiration (réponse adaptative face au stress thermique) et le métabolisme corporel, ce qui illustre parfaitement la difficulté de combiner les caractères d'adaptabilité thermique et les caractères de production chez les bovins. La sélection génétique pour la production laitière et la production de viande a considérablement augmenté la sensibilité à la chaleur (Ravagnolo et Misztal, 2000 ; Kadzere et al., 2002 ; Gaughan et al., 2009). De nos jours, la résistance à la chaleur est considérée comme étant l'un des aspects adaptatifs les plus importants chez les bovins (McManus et al., 2009). De ce fait, l'identification des individus supportant le mieux la chaleur et appartenant à une race bovine haute productrice semble être d'une grande utilité, surtout si ces individus sont capables de maintenir un bon niveau de production et une bonne capacité de survie une fois exposés à des conditions de stress thermique (Gaughan et al., 2009).

Afin de sélectionner des bovins à haut potentiel génétique de production sur des caractères de résistance à la chaleur, au moins deux points importants doivent être vérifiés : l'identification de un (de préférence, pour avoir un paramètre constant) ou plusieurs indices de résistance à la chaleur ; l'estimation des corrélations génétiques entre la résistance à la chaleur et les caractères productifs et reproductifs (Nardone, 1998). D'autre part, l'héritabilité de certains aspects morphologiques et anatomiques (comme la densité et la fonction des glandes sudoripares, la densité et l'épaisseur du pelage, la longueur et la couleur des poils) a été signalée entre les différentes races bovines (Nardone, 1998). Les différences des caractéristiques morphologiques et anatomiques permettent d'expliquer, partiellement, les différences de sensibilité à la chaleur entre les espèces et les races (Ingram et Mount, 1975 ; West, 2003 ; Collier et al., 2008 ; Dickmen et al., 2009). Collier et al. (1981) ont indiqué que les vaches Jersey sont plus résistantes à la chaleur que les vaches Holstein. Muller et Botha (1993) ont suggéré que cette meilleure adaptabilité aux fortes chaleurs chez les Jersey, se traduisait par des différences au niveau de la fréquence

respiratoire. En outre, les différences évidentes du rapport de la surface à la masse corporelle entre les deux races, pourraient expliquer en partie la meilleure tolérance des vaches Jersey à la chaleur (Bernabucci et al., 2010).

La température rectale et la fréquence respiratoire (ou la combinaison des deux) sont généralement utilisées dans l'évaluation de la résistance à la chaleur (Bernabucci et al., 2010). En effet, la température corporelle interne est la résultante de tous les processus de thermorégulation et la température rectale est typiquement considérée comme étant un bon indicateur de la capacité thermorégulatrice (Yousef, 1985). L'héritabilité de la température rectale est jusqu'à présent non connue, cependant, il semble qu'elle soit moyenne voire faible (de 0,16 à 0,64 selon Nardone, 1998). De même, il semble y avoir des corrélations phénotypiques et génétiques entre la température rectale et les capacités productive (Johnson, 1987 ; Nardone et al., 1992 ; Spiers et al., 2004) et reproductrice (Turner, 1982).

La sélection génétique pour la résistance à la chaleur, au sein d'une race particulière, semble être une opportunité pour l'amélioration des performances des animaux d'élevage dans les climats chauds (Bernabucci et al., 2010). Nardone et Valentini (2000) ont simulé un schéma de sélection en utilisant une approche génétique quantitative pour la production laitière chez les races locales adaptées, ainsi que pour la thermorésistance (évaluée en fonction de la température rectale) chez les races hautes productrices présentes dans la plupart des pays (cosmopolites). Les races laitières hautes productrices, sélectionnées sur la base de leur température rectale, ont montré un progrès annuel de la production laitière double de celui des vaches de races locales. Ces auteurs ont conclu que la sélection génétique basée sur la température rectale, chez les races hautes productrices, semble être le meilleur schéma de sélection. En effet, la thermorésistance des races hautes productrices peut être améliorée en seulement quelques générations alors que celles des vaches locales nécessiterait plus de 30 générations pour atteindre un niveau de production comparable.

D'autre part, la sélection des géniteurs mâles pour la résistance thermique constitue une piste intéressante pour la transmission de certains traits importants. Par exemple, Ravagnolo et Misztal (2000) ont trouvé que, quand le THI ne dépassait pas la valeur seuil de 72, l'héritabilité pour la production laitière était de 0,17 et que la variance additive (même poids statistique de tous les paramètres qui influent sur la thermorésistance) pour la résistance à la chaleur s'annule. Ce qui n'était pas le cas quand le THI dépassait cette valeur seuil, où la

variance additive pour la résistance à la chaleur s'est traduite par la manifestation de tous les signes d'un stress thermique, notamment la baisse de la production laitière car la corrélation génétique entre les deux effets était de -0,36. Par ailleurs, Bohmanova et al. (2005) ont signalé que les taureaux transmettant une forte résistance à la chaleur avaient des filles avec un taux de fertilité élevé, une vie productive plus longue mais une production laitière par lactation moindre. Bernabucci et al. (2010) ont conclu que si la sélection génétique pour la production laitière persiste sans prise en compte des caractéristiques relatives à la thermorésistance, la sensibilité au stress thermique sera un fardeau pour le secteur laitier, surtout dans le contexte actuel de réchauffement climatique.

**A Retenir**

A court terme, les mesures d'atténuation du stress thermique les plus efficaces sont celles qui permettent à la vache de maximiser sa capacité de dissipation de la chaleur. À ce titre, les surfaces ombragées, la nature du couchage, la ventilation forcée et le douchage jouent un rôle capital. De plus en plus d'étables nord-américaines sont pourvues de systèmes d'aspersion combinés à des ventilateurs : en mouillant le pelage des vaches, on améliore la dissipation de la chaleur par évaporation et les ventilateurs maximisent la dissipation de cette chaleur. En Tunisie, faute de moyens financiers, ces systèmes de refroidissement sont quasiment absents des exploitations laitières, malgré un besoin réel. C'est pourquoi, dans le cadre de cette thèse, nous avons reporté notre intérêt sur la nature de la surface de couchage et de la toiture, ainsi que le type de bâtiment et de stabulation, dans la prévention du stress thermique chez la vache laitière.

L'alimentation joue également un rôle fondamental pour minimiser les impacts du stress thermique sur le bien-être et les potentiels productif et reproductif des vaches laitières. L'utilisation de fourrages de qualité est d'autant plus importante que leur appétence et leur digestibilité élevées permettent de maximiser la consommation d'énergie par les animaux. L'ajout d'additifs alimentaires ou de tampons dans la ration permet également de limiter les baisses d'ingestion pendant la saison estivale. Au cours de cette thèse, nous avons étudié la variation de production laitière en réponse au stress thermique et à l'amélioration de la ration estivale, en termes d'équilibre nutritionnel et d'apports énergétiques.

A long terme, la sélection génétique des races bovines les mieux adaptés à la chaleur constitue une piste intéressante pour faire face au changement climatique. L'héritabilité de certains traits génétiques peut renseigner sur les critères de sélection les plus avantageux à prendre en considération lors de la sélection pour la thermorésistance. Dans cette étude, nous avons cherché à mieux connaitre les mécanismes comportementaux et physiologiques permettant aux vaches de race Tarentaise de s'adapter aux conditions du stress thermique en Tunisie, afin d'aboutir à des individus plus résistants à la chaleur.

# Problématique, objectifs et stratégies mis en œuvre

## 1. Problématique

Nous avons vu précédemment que, dans le contexte actuel de réchauffement climatique, privilégier les races qui semblent résister au mieux à la chaleur, constitue une stratégie efficace pour minimiser les pertes économiques dues au stress thermique. Nous avons aussi constaté que la compréhension des mécanismes thermorégulateurs mis en jeux par les vaches laitières en période de fortes chaleurs, permettait d'évaluer le degré d'adaptabilité de certaines races bovines aux environnements difficiles. A cet égard, plusieurs études ont auparavant démontré la sensibilité élevée de la race Holstein à la chaleur, notamment de par son potentiel productif élevé qui génère plus de chaleur métabolique. Certaines études et observations de terrain laissent présager que les races laitières moins productives, telles que la race Tarentaise, présentent une meilleure résistance à ces conditions environnementales extrêmes et à leur variation.

En Tunisie, un programme de relance de la race Tarentaise a initialement vu le jour dans le cadre d'une collaboration Franco-Tunisienne de 1994 à 1997 (Bonnet, 2007). En effet, au début des années 1990, les autorités tunisiennes se sont donné comme objectif d'atteindre l'autosuffisance en lait et en viande. Pour y parvenir, l'importation de races mixtes dont la Tarentaise, semblait être une bonne stratégie, en croisement d'absorption avec la race locale ou en race pure dans les zones montagneuses les plus difficiles (Bonnet, 2007). Sa production laitière peut être compétitive avec celle de la race Holstein, qui souffre aujourd'hui en Tunisie d'une dégradation génétique ainsi que d'une baisse des performances. Cette race séduit de plus en plus les éleveurs tunisiens du fait qu'elle est rustique et qu'elle s'adapte bien aux conditions climatiques tunisiennes et aux fortes chaleurs. Toutefois, à notre connaissance, aucune étude n'a auparavant étudié les capacités adaptatives de cette race au stress thermique, ni les mécanismes de thermorégulation dont elle dispose. Il nous a donc semblé intéressant d'étudier la thermorésistance des vaches Tarentaise dans les conditions estivales tunisiennes.

## 2. Objectifs et stratégies mis en œuvre

Ce travail de thèse vise à étudier les capacités adaptatives de la vache Tarentaise aux conditions environnementales tunisiennes, en particulier au stress thermique, dans la perspective du développement de son élevage en tant que race complémentaire à la race Holstein. Pour atteindre nos objectifs, deux dispositifs ont été mis en œuvre :

**Dispositif 1 :** Etude comparative des performances de production des vaches Tarentaise et Holstein dans les conditions climatiques méditerranéennes de la Tunisie

L'élevage bovin laitier, en particulier celui de la race Tarentaise, est concentré au nord du pays, qui est caractérisé par un climat de type méditerranéen avec des hivers doux et humides et des étés chauds et secs. Pour cette raison, notre étude a concerné une vingtaine d'éleveurs (élevage exclusif de la race Tarentaise, ou Holstein, ou élevage mixte des 2 races) répartis sur cinq gouvernorats du nord de la Tunisie (Beja, Bizerte, Jendouba, Siliana et Tunis). Grâce à la collaboration de la direction de l'amélioration génétique de Sidi Thabet appartenant à l'office de l'élevage et des pâturages (**OEP**) et au groupement des éleveurs de la race Tarentaise (**GERT**), nous avons pu établir une liste de 21 éleveurs représentatifs de ces cinq régions, avec un effectif global équilibré de vaches Tarentaise et Holstein suivant la région.

Ce premier dispositif a été mené dans le but i/ de quantifier l'effet du stress thermique sur la production laitière et la composition du lait chez les vaches Tarentaise, en comparaison avec les vaches Holstein, nées et élevées sous des conditions climatiques méditerranéennes, ii/ de décrire la relation entre la variation de production laitière été – hiver (Δ ***production laitière***) et certaines caractéristiques des bâtiments d'élevage. Pour atteindre ces objectifs spécifiques, nous avons eu recours aux données du contrôle laitier, à des données météorologiques officielles et aux caractéristiques des bâtiments d'élevage relevées lors d'enquêtes.

**Dispositif 2 :** Etude de la physiologie, du métabolisme et de la variation de la production laitière des vaches Tarentaise en réponse au stress thermique et à l'amélioration de la ration estivale, en termes d'équilibre nutritionnel et d'apports énergétiques

Ce dispositif a été réalisé dans une ferme commerciale élevant exclusivement la race Tarentaise, à partir d'un des premiers noyaux de vaches Tarentaise pures implantés en Tunisie. Nous avons, dans un premier temps, comparé la physiologie, le métabolisme glucidique et lipidique ainsi que certains paramètres immunitaires de deux lots de vaches en lactation, l'un soumis aux conditions de neutralité thermique pendant l'hiver et l'autre aux conditions de stress thermique pendant l'été. L'objectif était de comprendre les mécanismes thermorégulateurs mis en jeu par les vaches Tarentaise pour faire face à ce stress thermique. Nous avons également cherché à montrer que la diminution de la production laitière (en quantité et qualité) due à la chaleur pouvait être compensée par l'amélioration de l'alimentation et entre autre par, une augmentation de la densité énergétique de la ration estivale. En effet, les fourrages produits en Tunisie étant souvent de qualité moyenne à faible, les rations peuvent être mal digérées notamment si les animaux sont soumis à un stress thermique. Nous avons donc évalué, via les performances de production laitière, l'aptitude des vaches Tarentaise à valoriser une ration estivale « améliorée ».

## **Dispositif 1 :** Etude comparative des performances de production des vaches Tarentaise et Holstein dans les conditions climatiques méditerranéennes de la Tunisie

Ce chapitre est l'adaptation française de l'article « Bellagi R., Martin B., Chassaing C., Najar T., Pomiès D., 2017. Evaluation of heat stress on Tarentaise and Holstein cow performance in the Mediterranean climate. International Journal of Biometeorology, 1-9 »

### MATERIEL ET METHODES

#### I. Collecte et mise en forme des données

Une base de données avec des contrôles laitiers individuels, sous forme de fichier informatique, a été fournie par la direction de l'amélioration génétique de l'OEP. La production laitière et la composition du lait (taux butyreux, taux protéique, teneur en urée et comptage des cellules somatiques) relatives à 435 vaches Tarentaise et 543 vaches Holstein, ont été obtenues mensuellement entre 2009 et 2014 à partir des contrôles de performances des 21 exploitations sélectionnées. En effet, la production laitière journalière (**PL**) de chaque vache de chaque élevage a été mesurée individuellement et enregistrée une fois par mois, en utilisant des compteurs à lait échantillonneurs. Dans le même temps, un échantillon représentatif du lait de chaque vache traite a été collecté pour analyse au laboratoire de la direction de l'amélioration génétique. Le taux butyreux (**TB**), le taux protéique (**TP**), la teneur en l'urée et le comptage des cellules somatiques (**CCS**) des échantillons de lait ont été déterminés en utilisant la méthode d'absorption dans l'infrarouge, au moyen d'un analyseur Milko-scan (Milko scan 4000, Foss Electronics, France). Les enregistrements de production et de composition laitière ont été stockés dans une base de données, avec un contrôle laitier par ligne, et classés par éleveur, vache, race, rang de lactation, stade de lactation et date du contrôle. La base de données a été vérifiée en enlevant les éventuels doublons et en considérant les données manquantes comme telles. De même, les vaches ayant un seul contrôle laitier ont été retirées de la base de données. Enfin, les valeurs aberrantes de chaque paramètre étudié ont été exclues de la base de données selon les règles suivantes, basées sur des paramètres physiologiques plutôt que mathématiques : PL>42 kg/j ; TB<20,0 g/kg ; TP< 20,0 g/kg ; teneur en urée<10 ou>670 mg/L ; CSS<3,00

$log_{10}$/mL. La base de données finale comprenait donc 16 143 lignes individuelles mensuelles (tableau 1).

**Tableau 1.** Paramètres disponibles pour l'analyse statistique de la base de données

| Régions | Eleveurs (n) | Vaches laitières (n) | | Paramètres (n) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Holstein | Tarentaise | Production laitière | Taux butyreux | Taux protéique | Teneur en urée | CCS |
| Beja | 1 | 40 | 12 | 752 | 202 | 526 | 458 | 332 |
| Bizerte | 8 | 148 | 178 | 5374 | 3598 | 4124 | 3871 | 3090 |
| Jendouba | 2 | 15 | 14 | 601 | 155 | 387 | 335 | 325 |
| Siliana | 5 | 239 | 66 | 4496 | 2306 | 4017 | 3223 | 3028 |
| Tunis | 5 | 101 | 168 | 4873 | 3325 | 4018 | 3467 | 2948 |
| Total | 21 | 543 | 435 | 16092 | 9586 | 13 072 | 11354 | 9723 |

CCS: comptage des cellules somatiques

Une autre base de données, composée des enregistrements de température ambiante (**Ta**, en °C) et d'humidité relative (**HR**, pourcentage exprimé en nombre décimal), a été fournie sous forme de fichier informatique par l'Institut National de Météorologie de Tunisie. Les données météorologiques ont été transmises à partir des cinq stations météorologiques publiques relatives aux cinq gouvernorats dans lesquels les 21 exploitations étaient localisées. Les enregistrements météorologiques (Ta et HR) correspondaient aux valeurs moyennes mensuelles des données journalières collectées entre 2009 et 2014. Pour chaque éleveur et pour chaque mois, Ta et HR ont servies à calculer l'index humidité-température (**THI**) comme suit : $\mathbf{THI = 1{,}8 \times Ta - [1-HR] \times [Ta-14{,}3] + 32}$ (Kibler, 1964).

Par la suite, les données de THI ont été fusionnées avec les données de production laitière, en attribuant chaque contrôle laitier de chaque éleveur les enregistrements météorologiques mensuels de la station météorologique la plus proche. De plus, certains paramètres de la base de données finale ont été divisés en classes dans le but de faciliter le traitement statistique. La parité des vaches laitières a été répartie selon le rang de lactation en 4 classes : première lactation, seconde, troisième et « quatrième et plus ». De même, le stade de lactation a été divisé en 4 classes : début de lactation (<120j), milieu (120-179j), fin (180-300j) et lactations prolongées (>300j). D'autre part les THI ont été répartis en 4 classes, suivant la classification de Silanikove (2000). L'objectif de cette classification est d'évaluer l'intensité du stress thermique, comme suit : sans effet, faible, modéré et extrême.

Les seuils de THI correspondants sont : THI<70, 70≤THI<75, 75≤THI<78 et THI≥78, respectivement. Cette classification a été aussi adoptée afin de mieux visualiser l'effet du stress thermique sur les paramètres de production laitière dans les deux races.

## II. Analyse statistique de la base de données

La base de données finale a été analysée par analyse de variance, à l'aide de la procédure MIXED du logiciel SAS (version 9.4 ; SAS Institute, 2013). Les effets du THI, de la race et de l'interaction THI×race sur la PL, le TB, le TP, la teneur en urée et le CCS (exprimé en $\log_{10}$/mL) ont été analysés en utilisant lemodèle linaire mixte suivant :

$$\mathbf{Y_{ijklmn} = \mu + THI_i + race_j + THI{\times}race_{ij} + éleveur_k + stade_l + rang_m + vache(e)_n + e_{ijklmn}.}$$

$Y_{ijklmn}$ est la variable dépendante (PL, TB, TP, teneur en urée ou CCS) ; μ est l'effet de la moyenne ; le THI i (continu ou en classes), la race j, l'interaction THI×race ij, l'éleveur k, le stade de lactation (en classe) l, le rang de lactation (en classe) m sont les effets fixes testés; la vache (imbriquée dans éleveur) n est l'effet aléatoire ; $e_{ijklmn}$ représente l'erreur résiduelle.

D'autre part, chaque vache a été classée au sein de sa race comme étant « haute » ou « faible » productrice, en se basant sur la production laitière moyenne de toutes ses lactations (ajustée par éleveur, rang de lactation, stade de lactation, et effet propre de la vache imbriquée dans éleveur). La médiane de ces valeurs ajustées a été utilisée, dans chacune des races, pour déterminer le seuil entre une vache « haute » et une vache « faible » productrice. Ce seuil a été estimé à 15,5 kg/j pour les Holstein et 13,0 kg/j pour les Tarentaise.

## III. Description des bâtiments d'élevage

Une enquête a été menée en septembre 2014 dans les 21 exploitations sélectionnées, dans le but de mettre en évidence certaines pratiques d'élevage qui accentuent ou allègent l'impact du stress thermique sur les performances de production des vaches Holstein et Tarentaise (tableau 2). Les éleveurs ont été informés de la date et de l'objectif de cette étude avant chaque visite. Seulement 19 éleveurs ont répondu à cette enquête, deux étant non disponibles. Les données ont été collectées lors d'entretien en face à face avec les éleveurs,

en utilisant un questionnaire d'enquête à choix multiples, avec des questions semi-ouvertes sur les caractéristiques des bâtiments d'élevage (voir annexe 1). La présence d'ombre et la nature de la toiture, la disponibilité en eau potable, le type de stabulation et la nature de l'aire d'exercice ont été vérifiées.

**Tableau 2.** Description des 19 exploitations ayant répondu à l'enquête et des pratiques d'élevage, selon la race dominante

| **Eléments** | Exploitations avec la **Holstein** comme race dominante (n) | Exploitations avec la **Tarentaise** comme race dominante (n) | Total (n) |
|---|---|---|---|
| **Mode d'élevage** | | | |
| Extensif | 5 | 5 | 10 |
| Pâturage | 0 | 0 | 0 |
| Semi-intensif | 5 | 4 | 9 |
| **Types de bâtiments** | | | |
| Ouverts | 6 | 6 | 12 |
| Fermés | 4 | 3 | 7 |
| **Types de stabulation** | | | |
| Entravée | 7 | 3 | 10 |
| Libre | 3 | 6 | 9 |
| **Aire d'exercice ombragée avec présence d'eau potable pendant l'été** | | | |
| Oui | 4 | 6 | 10 |
| Non | 6 | 3 | 9 |
| **Accès libre à l'air d'exercice pendant l'été** | | | |
| Oui | 3 | 4 | 7 |
| Non | 7 | 5 | 12 |
| **Types de toitures** | | | |
| Métallique | 6 | 5 | 11 |
| Non-métallique | 4 | 4 | 8 |
| **Nature de l'aire de couchage** | | | |
| Sol en terre | 5 | 3 | 8 |
| Sol en béton | 5 | 6 | 11 |
| **Equipements de refroidissement** | | | |
| Ventilateurs | 0 | 0 | 0 |
| Brumisateurs | 1 | 0 | 1 |

Cette enquête a été menée dans le but i/ de déterminer les différences potentielles dans les conditions d'élevage, et plus précisément dans les bâtiments d'élevage, entre les deux races étudiées, ii/ de comprendre si la sensibilité des troupeaux au stress thermique pendant l'été était associée à la nature des bâtiments (ouvert vs fermé), à la stabulation (libre vs entravée), à la toiture (métallique ou non), à l'aire de couchage (sol en terre vs en béton)

et à la mise à disposition d'une aire d'exercice ombragée avec des points d'eau potable pendant la saison estivale (Figure 1). Cette sensibilité a été estimée par la différence de production laitière (Δ ***production laitière***) entre l'hiver [décembre, janvier et février définis comme les mois les plus froids] et l'été [juillet, août et septembre définis comme les mois les plus chauds], de 2009 à 2014.

**Figure 1**. Exemple de bâtiment ouvert avec toiture métallique dans la région de Bizerte

## IV. Analyse statistique pour l'enquête

Le calcul des *Δ production laitière* a été réalisé à l'aide d'une nouvelle analyse statistique de la base de données initiale (SAS, version 9.4 ; SAS Institute, 2013) en utilisant un nouveau modèle linéaire mixte :

$$\mathbf{Y_{ijklmno} = \mu + saison_i + éleveur_j + année_k + (éleveur \times saison \times année)_{ijk} + race_l + stade_m + rang_n + vache(e)_o + e_{ijklmno}.}$$

$Y_{ijklmno}$ est la production laitière ; μ est l'effet de la moyenne ; la saison i, l'éleveur j, l'année k, l'interaction (éleveur×saison×année) ijk, la race l, le stade de lactation (en classe) m et le rang de lactation (en classe) n sont les effets fixes testés ; la vache (imbriquée dans éleveur) o est l'effet aléatoire ; $e_{ijklmno}$ est l'erreur résiduelle.

Les moyennes ajustées des interactions (éleveur×saison×année) ont été utilisées pour calculer les *Δ production laitière* de chaque éleveur pour chaque année, de 2009 à 2014. Seules ont été retenues les exploitations ayant eu un minimum de 30 contrôles laitiers individuels par année ainsi qu'un effectif équivalent de vaches Tarentaise et Holstein entre l'été et l'hiver, par gouvernorat. La base de données finale relative à l'enquête comportait donc 67 *Δ production laitière* différents, relatifs à 17 exploitations.

L'impact des principales caractéristiques des bâtiments d'élevage (type de bâtiment, type de stabulation, nature de l'aire de couchage, nature de l'aire d'exercice et type de la toiture) sur les *Δ production laitière* a été testé en utilisant une analyse de la variance à un facteur (ANOVA) avec le logiciel SAS (version 9.4 ; SAS Institute, 2013).

# RESULTATS ET DISCUSSION

## I. Conditions climatiques au nord de la Tunisie et identification d'un THI seuil

Les données collectées à partir des cinq stations météorologiques, sur les cinq ans d'étude, ont révélé que les valeurs mensuelles moyennes de Ta, HR et THI sont respectivement de 18,8 °C, 68,9 % et 64 (Figure 2). Il n'existe pas de différences climatiques importantes entre les différentes régions étudiées car les écart-types pour Ta, HR et THI sont respectivement de 0,81 °C, 2,30 % et 1,22. Les valeurs moyennes de Ta et THI les plus élevées ont été enregistrées pendant le mois d'août (28,1 °C et 76,6) alors que le mois de février est caractérisé par les valeurs les plus faibles (10,7 °C et 52,1). Durant la saison estivale, le climat méditerranéen au nord de la Tunisie est principalement influencé par le Sirocco, un vent sec et très chaud qui engendre une hausse soudaine de la température ambiante (NIC, 2009). Cette hausse de température entraîne une augmentation de l'évaporation et, par conséquent, une diminution de l'humidité relative. En effet, HR tend à être inversement proportionnelle à Ta et THI, avec un pic pendant le mois de janvier (HR=77,5 %) et une valeur minimale enregistrée pendant le mois de juillet (HR = 56,4 %).

Durant les 5 années d'étude, les vaches laitières des fermes enquêtées ont été exposées à une saison estivale chaude qui débutait au mois de juin (Ta = 24,4 °C, THI = 71,7) et persistait jusqu'au mois de septembre (Ta = 24,9 °C, THI = 73,2). Les valeurs de Ta et de THI durant cette période indiquent que les vaches étaient en condition de stress thermique. En effet, la température supérieure critique de 25-26 °C est considérée comme une valeur seuil au-delà de laquelle la production laitière et la qualité du lait commencent à être altérées (Berman et al., 1985 ; Yousef 1985 ; Kadzere et al., 2002). Les THI seuils trouvés dans la bibliographie varient de 68 à 74. Silanikove (2000) a suggéré que lorsque le THI dépassait la valeur seuil de 70, des mesures spécifiques devaient être prises, telles que la mise à disposition d'abris ombragés, essentielles pour le bien-être des animaux d'élevage. Johnson et al. (1962) ont aussi établi que lorsque le THI dépassait 70, une réduction linéaire de la production laitière était observée. Bouraoui et al. (2002) ont montré que, dans les conditions climatiques méditerranéennes de la Tunisie, les vaches Holstein en pleine lactation réduisaient leur production laitière et leur consommation alimentaire quand le THI excédait 68. Cependant, plusieurs auteurs ont défini que 72 était la valeur critique de THI

au-dessus de laquelle les caractéristiques de production commençaient à être modifiées (Ravagnolo et al., 2000 ; Tatcher et al., 2010). Bohmanova et al. (2007) ont trouvé un seuil critique pour le THI qui variait de 72 dans l'état de Georgie (USA) à 74 en Arizona, suggérant que la valeur seuil de THI pouvait varier en fonction des caractéristiques de la zone étudiée. Récemment, Bouraoui et al. (2013) ont adopté un seuil critique de 72, stipulant qu'en Tunisie les vaches Pie-noire Holsteinisées étaient exposées à un stress thermique pendant la saison estivale, entre juin (THI = 75 ± 0,8) et septembre (THI = 75 ± 0,7). On peut donc conclure que, dans notre étude, les conditions environnementales ont été suffisamment difficiles pour induire un stress thermique chez les vaches laitières, là aussi de juin à septembre.

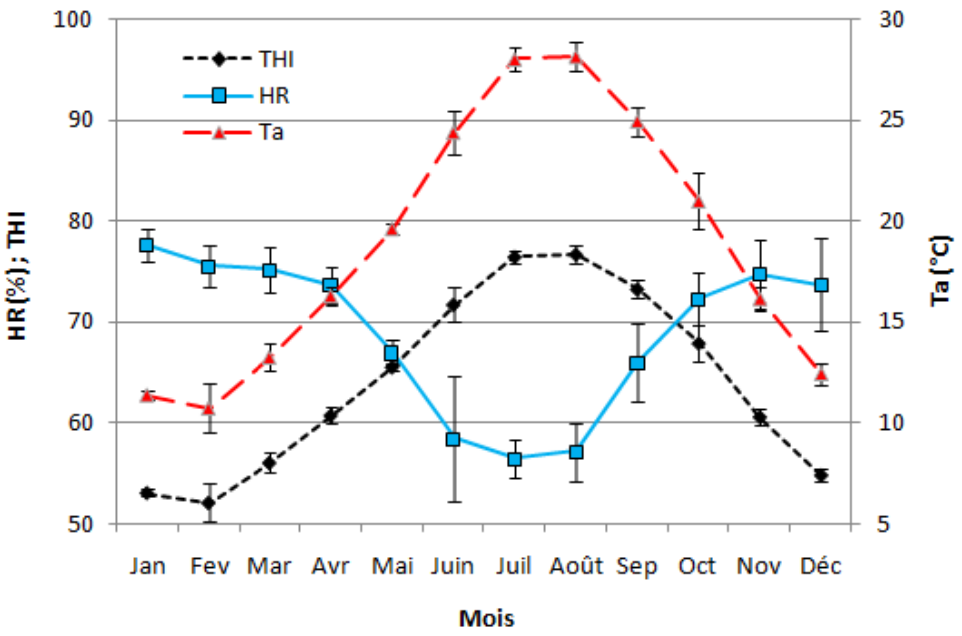



**Figure 2.** Valeurs moyennes mensuelles de l'index température-humidité (THI), de l'humidité relative (HR, en %) et de la température ambiante (Ta, en °C) dans les cinq régions du nord de la Tunisie durant les cinq années d'études. Les barres verticales représentent les écart-types entre années.

## II. Effet du stress thermique sur la production laitière, la composition du lait et le comptage des cellules somatiques

### II.1. La production laitière

Comme attendu, la production laitière des vaches Tarentaise est en moyenne inférieure de 3,4 kg/j (P<0,001, Tableau 3) à celle des vaches Holstein. Les vaches Tarentaise ont produit en moyenne 11,4 kg/j de lait. Cette production est inférieure de 24 % à la production moyenne des vaches Tarentaise nées et élevées en France (Idele, 2015). Bien que les vaches Holstein soient communément considérées comme hautes productrices, dans cette étude elle n'ont produit que 14,8 kg/j de lait ce qui correspond à 55% seulement de la production laitière moyenne des vaches Holstein élevées en France (Idele, 2015). De même, Rekik et al. (2009) ont observé que les performances de production des vaches Holstein nées et élevées en Tunisie (18,6 kg/j) sont généralement en deçà des niveaux de production des vaches Holstein des pays ayant des industries laitières développées.

L'effet du THI sur la production laitière est significatif (P<0,001) pour les deux races, et il existe une interaction significative entre le THI et la race. Quand le THI augmente, la chute de la production laitière est plus importante chez les vaches Holstein que chez les Tarentaise (pente de -43,0 g/j contre -7,0 g/j de lait par point de THI). En effet, la production laitière moyenne des vaches Holstein chute 6 fois plus que celle des Tarentaise (-0,93kg/j soit 6 % de la production totale contre -0,15 kg/j soit 1 % de la production totale) entre les mois les plus frais (janvier, février, mars ; Ta = 11,8 °C, RH = 75,6 % et THI = 53,7) et les plus chauds (juillet, août, septembre ; Ta = 27,0 °C, RH = 59,8 % et THI = 75,4). L'absence de différences importantes dans la conduite d'élevage et l'aménagement des bâtiments entre les deux races (voir tableau 2), confirme que l'interaction significative qui existe entre le THI et la race traduit une meilleure résistance des vaches Tarentaise aux conditions de stress thermique. La réduction de la production laitière dans des conditions de stress thermique a été souvent soulignée par d'autres études. Du Preez et al. (1990) et Itoh et al. (1998) soulignent que l'exposition des vaches laitières à des valeurs élevées de THI entraîne une réduction de la production laitière de 10 à 34 %. De même, Smith et al. (2013) ont trouvé que la production laitière chez les vaches Holstein était passée de 35,6 à 34,2 kg/j (-3,9 %) lorsque le THI dépassait la valeur seuil de 72. Bernabucci et al. (2002) ont aussi noté que pendant la saison estivale, le potentiel productif des vaches laitières était réduit de

10 % par rapport au printemps (26,7 vs 29,5 kg/j, respectivement). De même, Bouraoui et al. (2002), ont signalé qu'en Tunisie, quand le THI augmentait de 68 à 78 pendant l'été, la production laitière chutait de 21 %. Nos résultats montrent que l'effet du THI sur la production laitière des deux races est beaucoup moins marqué que celui trouvé dans l'étude précédente. Mais Bouraoui et al. (2002) ont conduit leurs travaux de recherches à Kairouan, un département situé au centre de la Tunisie, généralement caractérisé par des conditions climatiques très sévères pendant la saison estivale (valeurs moyennes journalières de THI = 78 ± 3,2). Par ailleurs, les vaches Holstein de notre étude produisaient moins de lait que les vaches de l'étude précédente (14,8 contre 20,3 kg/j de lait). Il est donc possible que la chute de production laitière plus importante chez Bouraoui et al. (2002) soit due à un effet du stress thermique généralement plus prononcé chez les vaches hautes productrices (Purwanto et al., 1990 ; Kadzere et al., 2002). West et al. (2003) soulignent que les vaches hautes productrices ont plus de difficultés à dissiper correctement la chaleur, à travers les processus de thermorégulation. En effet, la production de chaleur issue des processus métaboliques tend à augmenter avec l'augmentation de la capacité de production des vaches laitières.

D'autre part, la baisse de production laitière observée dans les deux races n'est pas attribuable au niveau de production plus élevé des vaches Holstein que des Tarentaise. En effet, il n'existe pas d'interaction entre le THI et le niveau de production, ce qui confirme que pour les deux races la diminution de la production laitière suite à des THI élevés est la même chez les hautes que chez les faibles productrices (P>0,05 ; résultats non rapportés). De ce fait, la meilleure résistance de la race Tarentaise aux conditions du stress thermique s'avère être un effet race plutôt qu'un effet niveau de production. D'autres études ont mis en évidence l'adaptabilité réduite des vaches Holstein quand elles sont exposées à des conditions climatiques sévères, en les comparants à d'autres races (Brown Swiss et Jersey). Ainsi, Ragsdale et al. (1953) ont trouvé que lorsque Ta et RH augmentaient de 24 °C et 38 % à 34 °C et 80 %, des vaches Holstein, Jersey et Brown Swiss (qui est aussi une race de montagne) réduisaient leur production laitière respectivement de 59 %, 44 % et 29 %. Néanmoins, il n'existe aucune autre étude qui compare les performances de production de la race Tarentaise et de la race Holstein dans des conditions de stress thermique. Cette meilleure adaptabilité des vaches Tarentaise face à la chaleur pourrait s'expliquer par le fait que les vaches Holstein ont un poids vif plus élevé que les Tarentaise (de 50 à 150 kg ; FGE, 2015). Par conséquence, les vaches Tarentaise ont un rapport surface/poids vif plus élevé, ce

qui est favorable à une meilleure dissipation de la chaleur (Bernabucci et al., 2010). De plus, les vaches Tarentaise produisent relativement moins d'extra-chaleur (ou chaleur métabolique) puisqu'elles ont un rapport production laitière / poids métabolique inférieur de 10 à 20% comparé à celui des vaches Holstein. Ces différents points contribuent à expliquer la moindre sensibilité des vaches Tarentaise au stress thermique.

Pour de nombreux auteurs (Silanikove, 2000 ; Smith et al., 2013), l'effet du THI sur le stress thermique des vaches laitières n'est pas linéaire mais s'amplifie avec les THI les plus élevés. En effet, le THI a été souvent fractionné en classes dans le but d'évaluer l'intensité du stress thermique. Ces classifications sont assez variables selon les auteurs et les indices considérés. Par exemple, le stress thermique a été caractérisé comme stress moyen, modéré ou sévère (Armstrong, 1994) pour des valeurs respectives de THI allant de 72 à 79, de 79 à 90 et $\geq$ à 90. Dans notre étude, la classification des THI de Silanikove (2000), à 4 niveaux, a été reprise car elle permet de mieux visualiser l'effet non-linaire du THI sur la variation de la production laitière dans les deux races (Figure 3). De plus, cette classification (« sans effet », « léger », « modéré », « extrême ») est la mieux adaptée aux conditions climatiques méditerranéennes de la Tunisie. On constate ainsi que la chute de la production laitière chez les vaches Holstein commence dès que le stress thermique devient « léger ». Par ailleurs, ce déclin est beaucoup plus rapide pour les vaches Holstein que pour les Tarentaise entre les classes « modéré » et « extrême » (-0,82 vs -0,13 kg/j).

**Tableau 3.** Effets du THI et de la race sur la production laitière et la composition du lait ; valeurs moyennes par race ajustées par le modèle

| | Holstein | Tarentaise | Erreur type | THI | Race | THI × race |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Production laitière (kg/j) | 14,8 | 11,4 | 0,26 | *** | *** | *** |
| Taux butyreux (g/kg) | 38,2 | 37,2 | 0,31 | *** | NS | NS |
| Taux protéique (g/kg) | 31,8 | 32,6 | 0,15 | *** | NS | NS |
| Urée (mg/L) | 212 | 213 | 0,70 | *** | NS | NS |
| CCS ($log_{10}$/mL) | 5,47 | 5,42 | 0,03 | NS | *** | *** |

†NS (non significatif) P>0,05 ; *** P<0,001 CCS = comptage des cellules somatiques

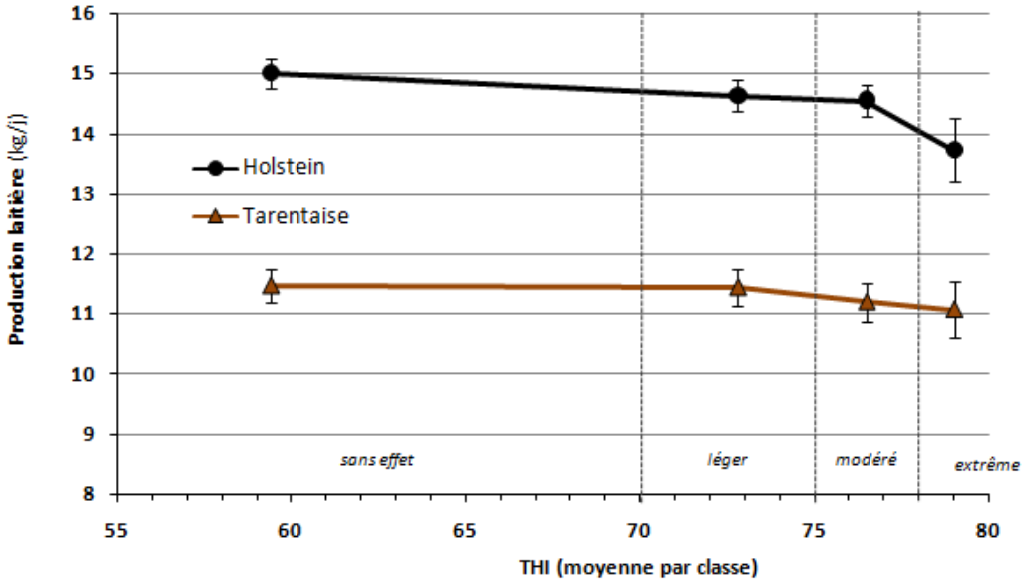



**Figure 3.** Production laitière moyenne des deux races par classe de THI (classification de Silanikove) ; les barres représentent l'erreur standard.

### II.2. La composition du lait et le comptage des cellules somatiques

En moyenne, il n'y a pas de différence de TB, TP et urée du lait entre les deux races. Cependant, le THI élevé est associé à une baisse (P<0,001) de ces 3 paramètres, identique chez les Holstein et les Tarentaise (interaction THI × race non significative). Comme le montre le tableau 3, les vaches Holstein et Tarentaise ont produit un lait contenant respectivement 38,2 et 37,2 g/kg de matières grasses. L'augmentation du THI a conduit à une baisse significative du TB de 2,2 g/kg entre l'hiver et l'été, ce qui correspond à une perte de 0,10 g/kg de matières grasses par point de THI, identique chez les deux races. Cette baisse est conforme aux résultats trouvés par Rejeb Bellil (2014), qui stipule que dans les conditions climatiques estivales de la Tunisie, lorsque le THI augmente de 65,6 à 83,9, le TB des vaches Holstein passe de 37,9 à 36,5 g/kg. Bouraoui et al. (2002) ont aussi montré que le TB des vaches laitières chute de 35,8 à 32,4 g/kg entre le printemps et l'été. Ces derniers auteurs ont attribué cette chute du TB, observée pendant la saison estivale en Tunisie, à la baisse importante de la prise alimentaire et plus précisément l'ingestion des fourrages (-17 %), conduisant ainsi à des rations plus pauvres en fibres pendant l'été. Dans notre étude, l'effet du stress thermique sur le TB est moins prononcé que celui rapporté par

Bouraoui et al. (2002). Cet écart peut être attribué aux différences de conditions expérimentales, à des niveaux de THI plus élevés, et peut être aux potentiels génétiques différents des animaux. Cependant, d'autres études stipulent que le stress thermique serait soit à l'origine d'une augmentation du TB du lait (Sharma et al., 1983 ; Smith et al., 2013), soit ne causerait aucune modification significative (Knapp et al., 1991 ; Wheelock et al., 2010). Dans notre étude, la réduction du TB suite à des THI élevés, pourrait s'expliquer par l'effet cumulatif du stress thermique sur l'ingestion alimentaire, par les systèmes d'alimentation (nature des rations et fréquence de distribution) ou par le stade physiologique des animaux. Néanmoins, l'absence de données sur les systèmes d'alimentation et sur la qualité nutritionnelle et la composition des aliments ne nous permet pas de conclure.

Le TP du lait a aussi subi une baisse significative en réponse à des THI élevés (-1,40 g/kg entre l'hiver et l'été ; pente de -0,06 g/kg par point de THI). Nos résultats concordent avec ceux rapportés par Barash et al. (2001) qui stipulent qu'en Israël, des vaches Holstein ont eu une production journalière de protéines plus faible pendant le mois d'août. De même, McDowell et al. (1976) rapportent que le pourcentage des matières protéiques dans le lait était réduit de 17 % quand la Ta passait de 18,0 à 30,8 °C. Hammami et al. (2013a) suggèrent que la réduction du TP dans des conditions de stress thermique est probablement due à la diminution de la MSI, ce qui conduit incontestablement à des apports énergétiques moindres. Bernabucci et al. (2002) ont rapporté des TP pendant la saison estivale inférieurs de 9,9 % par rapport au printemps (30,1 et 33,1 g/kg, respectivement), cette réduction dans des conditions de stress thermique étant principalement liée à la diminution de la caséine du lait. Dans notre cas, des rations moins énergétiques et des apports protéiques insuffisants (conséquence directe d'une prise alimentaire réduite) seraient à l'origine de la baisse du TP du lait observée pendant l'été. En effet, lorsque le THI réduit en même temps la prise alimentaire et la production laitière, l'apport en nutriments se restreint, ce qui conduit à des changements métaboliques importants au niveau de la glande mammaire.

D'autre part, une baisse significative de la teneur d'urée dans le lait de l'ordre de 14 mg/L a été observée entre l'hiver et l'été (pente de -0,11 mg/L par point de THI). Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés par RejebBellil (2014) qui stipule que, dans les conditions climatiques estivales de la Tunisie, la teneur en urée du lait de vaches Holstein fortes productrices était réduite de 25 %, et de 31 % pour les faibles productrices.

Néanmoins, Hojman et al. (2004) ont observé des teneurs en urée plus élevées durant la saison estivale (181 mg/L) que durant le mois de novembre (118 mg/L). De même, Fatehi et al. (2012) ont trouvé que l'urée du lait était positivement corrélée avec la température moyenne mensuelle, avec une valeur moyenne maximale enregistrée en juillet. Ces auteurs ont suggéré que l'augmentation de la teneur en urée du lait pendant la saison estivale était probablement due aux changements de composition de la ration, lorsque les vaches qui ont passé l'hiver en bâtiments sortent au pâturage pour l'été. La teneur faible en urée du lait trouvée dans notre étude durant l'été pourrait être attribuée aux effets cumulatifs du stress thermique et aux faibles apports en protéines alimentaires et en protéines dégradables, conséquence d'une baisse de la MSI et d'animaux qui ne sortent pas au pâturage.

En moyenne, comme l'indique le tableau 3, les vaches Holstein ont présenté un CCS plus élevé que celui des vaches Tarentaise ($P<0,001$). Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette différence entre les deux races, dont les conditions d'élevage dans les exploitations sélectionnées ainsi que l'effet propre de la race. En effet, les Holstein ont classiquement un CCS plus élevé que les Tarentaise, comme l'indiquent Coulon et al. (1996) qui ont trouvé une différence pouvant atteindre 120 000 cellules/mL. Cependant, les valeurs de CCS trouvées dans cette étude restent élevées pour les deux races, et ce même en absence d'infections mammaires car les vaches ayants des mammites ont toutes été supprimées de la base de données. Il se peut cependant que notre base de données incluait des vaches atteintes de mammites subcliniques, possédant donc des niveaux de cellules somatiques relativement élevées. D'autre part, il existe une interaction significative pour le CCS entre le THI et la race (pente de +0,050 $\log_{10}$/mL par point de THI pour les Holstein et -0,004 $\log_{10}$/mL par point de THI pour les Tarentaise. En effet, quand le THI s'est élevé à plus que 75, le CCS des Holstein a augmenté de 352 000 cellules/mL alors que celui des Tarentaise a chuté de 160 000 cellules/mL. Ces réponses différentes des deux races face à des THI élevés pourraient être attribuées au fait que le stress thermique, chez les vaches Holstein, aurait augmenté la charge pathogène, modifiant ainsi la réponse immunitaire de l'organisme ; ce qui confirmerait l'hypothèse d'un nombre relativement élevé de quartiers infectés chez ces vaches. Il est tout aussi possible que les vaches Holstein aient développé des mammites subcliniques après une exposition à des THI extrêmes (Wegner et al., 1974). Comme les deux races ont été conduites de manière plus ou moins similaire, on peut déduire que les Tarentaise sont plus résistantes à la chaleur puisqu'elles présentaient des mamelles plus

saines. D'autre part, les différences évidentes d'hygiène et de pratiques sanitaires entre éleveurs confirment le fait que la relation entre CCS et changement climatique est vraisemblablement très complexe. Nos résultats sont en désaccord avec ce qui est classiquement observé dans la bibliographie. En effet, le CCS est souvent positivement corrélés avec le THI (Igono et al., 1988 ; Waage et al., 1998 ; Bouraoui et al., 2002). Hammami et al. (2013a) attribuent la hausse du CCS observée dans des conditions de stress thermique à un dysfonctionnement du système immunitaire durant la saison chaude. Cependant, quelques études (Rousel et al., 1969 ; Paape et al., 1973), conduites dans des chambres climatiques avec des températures élevées, ont montré qu'il n'existe aucune variation significative du CCS. Paape et al. (1973) expliquent que ces animaux, conduits expérimentalement dans des chambres climatiques, sont généralement suivis de très près pour leurs statuts bactériologiques et la santé de leurs mamelles.

**III. Influence de la nature des bâtiments d'élevage sur la production laitière**

La différence de production laitière entre la saison estivale et la saison hivernale a été en moyenne de -0,60 kg/j. Pour 70 % des éleveurs les Δ *production laitière* ont été compris entre -0,30 et -2,00 kg/j, alors que les 30 % restants soit n'ont pas perdu de lait, soit ont eu un Δ *production laitière* légèrement positif (de +0,10 à +0,70 kg/j).

Dans les différentes exploitations, aucune différence significative des Δ *production laitière* n'a été observé selon le type de stabulation (libre ou entravée ; P=0,13 ; tableau 4), ni selon la nature du couchage (P=0,69). Toutefois, dans d'autres études, le type de stabulation jouait un rôle assez important dans les paramètres environnementaux des bâtiments d'élevage. Shoshani et Hetzroni (2013) ont conduit une enquête dans 39 exploitations laitières durant les étés 2004 et 2005. Ces auteurs ont notamment mesuré la température au-delà de laquelle la fréquence respiratoire des vaches laitières augmentait, paramètre qui représente un excellent indicateur de stress thermique. Ces auteurs ont trouvé que cette température seuil était plus faible dans les bâtiments en stabulation libre avec logettes que dans les bâtiments en stabulation libre sur aire paillée (31,6 vs 32,1 °C), car dans les bâtiments avec logettes la densité des animaux était supérieure à celle dans les bâtiments sur aire paillée. Dans ce même ordre d'idées, Shock et al. (2016) ont trouvé que les bâtiments en stabulation entravée, généralement avec une densité animale plus importante, avaient des niveaux de température et d'humidité supérieurs par rapport aux

bâtiments en stabulation libre avec logettes. Cela conduit à un THI moyen supérieur de 2,3 unités qui, en période de stress thermique, ne peut être que néfaste à la production laitière (Shock et al., 2016). Dans notre étude, l'absence de différence statistique entre les deux types de stabulation pourrait être attribuée à des différences très limitées de la densité des vaches laitières. Cependant, nous ne pouvons pas conclure sur ce point car la densité des vaches n'a été mesurée dans aucune des exploitations sélectionnées.

Les Δ *production laitière* sont significativement affectés par le type des bâtiments d'élevage (ouvert/fermé), la baisse de la production laitière estivale étant plus importante dans les bâtiments fermés que dans les bâtiments ouverts (-1,13 vs -0,27 kg/j ; $P<0,05$). De fait, les bâtiments fermés comportent généralement des éléments de structure additionnels comme des poteaux et des cloisons qui peuvent faire obstacle à la circulation de l'air, augmenter l'humidité relative ainsi que la chaleur radiante (Shoshani et Hetzroni, 2013). A l'inverse, les bâtiments ouverts sont naturellement ventilés par la circulation de l'air, ce qui contribue fortement à la diminution de la température ambiante. En effet, la présence d'une ventilation bien adaptée (naturelle ou forcée) permet de moduler l'effet du stress thermique en favorisant la thermolyse par voie évaporative, et donc de maintenir la production laitière ainsi que les fonctions immunologiques et reproductives des vaches laitières (Smith et al., 2006 ; do Amaral et al., 2011 ; Calegari et al., 2012).

Dans les différentes exploitations enquêtées, les aires d'exercices ne disposaient pas toutes d'un point d'eau et d'une surface ombragée pendant la saison estivale, néanmoins les différences deΔ *production laitière* entre les deux groupes n'étaient pas significatives ($P=0,42$). Cependant, chez 40 % des éleveurs, l'aire d'exercice était en accès libre pendant la saison chaude. Shock et al. (2016) ont montré qu'un accès libre au pâturage à partir des bâtiments d'élevage était significativement corrélé avec l'augmentation des valeurs moyennes et maximales des THI auxquels les vaches laitières sont exposées pendant la saison estivale. Cette exposition affecte négativement le bien-être et les performances de production des vaches laitières, surtout lorsque le THI est supérieur à 72 et qu'il n'existe aucune structure ombragée à l'extérieur des bâtiments d'élevage. En effet, dans des conditions de stress thermique, les vaches laitières (si elles ont le choix) préfèrent être à l'intérieur de l'étable durant les heures les plus chaudes de la journée. Il est connu que pour éviter l'ensoleillement et la chaleur en période de stress thermique, les vaches vont

activement rechercher l'ombre (Figure 4) (Schütz et al., 2008). Ceci souligne l'importance pour les éleveurs de prendre des décisions rationnelles afin de donner aux vaches laitières un accès libre aux aires ombragées, à l'intérieur comme à l'extérieur de l'étable.

Le type de la toiture a un impact significatif sur les Δ *production laitière* (P<0,05), avec des toitures métalliques qui ont conduit à une baisse significativement plus importante de la production laitière entre l'hiver et l'été (Tableau 4). La tôle ondulée représente le matériau le plus utilisé dans les structures ombragées des bâtiments d'élevage, vu leur faible coût d'achat et d'entretien. Cependant, ces toitures métalliques pendant l'été deviennent chaudes et génèrent plus de rayonnement thermique, ce qui va automatiquement augmenter la thermogenèse par radiation. Armstrong (1994) suggère que la partie supérieure de ces toitures métalliques doit être peinte en blanc afin d'atténuer la chaleur par radiation. Selon Bond et al. (1961), l'installation d'isolants thermiques d'une épaisseur de 2,5 cm sous les toitures métalliques permettrait d'atténuer la charge thermique radiante absorbée par la vache laitière. Berman et Horovitz (2012) stipulent que les rayonnements incidents provenant d'une toiture chaude peuvent être atténués par l'augmentation de la hauteur sous plafond. En effet, une telle pratique permettrait d'augmenter l'irradiation de la chaleur à partir de la surface corporelle des animaux vers les parties hautes du bâtiment.

**Tableau 4.** Relation entre les caractéristiques des bâtiments d'élevage et les différences de production laitière entre l'hiver et l'été (*Δ production laitière*)

| **Caractéristiques** | Nombre d'exploitations | Moyenne des Δ *production laitière* (kg) | Valeur de P |
|---|---|---|---|
| **Type de la stabulation** | | | 0,13 |
| Entravée | 5 | -0,18 | |
| Libre | 12 | -0,80 | |
| **Nature de l'aire de couchage** | | | 0,69 |
| Sol en terre | 6 | -0,50 | |
| Sol en béton | 11 | -0,68 | |
| **Type de bâtiment** | | | 0,01 |
| Ouvert | 7 | -0,27 | |
| Fermé | 10 | -1,13 | |
| **Aire d'exercice ombragée avec présence d'eau potable l'été** | | | 0,42 |
| Oui | 9 | -0,48 | |
| Non | 8 | -0,77 | |
| **Type de toiture** | | | 0,01 |
| Métallique | 9 | -1,04 | |
| Non-métallique | 8 | -0,15 | |

**Figure 4.** Regroupement de vaches laitières à l'ombre et près d'un point d'eau, dans une aire d'exercice à accès libre pendant l'été

L'analyse des résultats d'enquête a montré que les éleveurs de notre étude n'étaient pas particulièrement soucieux d'offrir à leurs animaux des bâtiments et des pratiques d'élevage adaptés à un environnement difficile. Bien que les bumisateurs et les ventilateurs soient des moyens efficaces pour réduire la température à l'intérieur des bâtiments durant la saison chaude (Armstrong, 1994), ces dispositifs étaient absents dans la quasi-totalité des fermes. De fait, malgré leur efficacité pour réduire le stress thermique des vaches et les pertes économiques qu'il engendre, ce sont des dispositifs que les agriculteurs de la région ne peuvent généralement s'offrir.

**A Retenir**

A l'issu de cette étude, nos résultats montrent que le stress thermique a réduit la production laitière et induit des modifications de la composition du lait identique chez les deux races. Toutefois, les vaches Tarentaise semblent moins impactées par la chaleur que les Holstein, spécialement lorsque les THI sont supérieurs à 78, ce qui arrive assez fréquemment dans les conditions climatiques estivales de la Tunisie.

Les bâtiments fermés et les toitures métalliques accentuent la sensation d'inconfort thermique, ce qui a induit une baisse des performances de production au sein des exploitations enquêtées. Mettre l'accent sur les différents paramètres qui peuvent accentuer ou alléger l'effet du stress thermique, ainsi que la compréhension des réponses adaptatives des animaux d'élevage face à la chaleur, constituent des éléments majeurs pour prévenir les pertes économiques liées au stress thermique.

La prochaine étape de cette étude est de quantifier les réponses physiologiques, métaboliques, immunitaires et comportementales (alimentaires) des vaches Tarentaise en état de stress thermique.

**Dispositif 2 :** Etude de la physiologie, du métabolisme et de la variation de la production laitière des vaches Tarentaise en réponse au stress thermique et à l'amélioration de la ration estivale, en termes d'équilibre nutritionnel et d'apports énergétiques

## MATERIEL ET METHODES

### I. Dispositif expérimental, matériel animal et système alimentaire

Cette étude a été réalisée sur deux périodes expérimentales de 4 semaines chacune, dans la ferme commerciale « Tarenty » à Naâsen (gouvernorat de Ben Arous, Tunisie, 36°41'12"N 10°12'23"E). La première période de l'expérimentation (**$P_1$**) a été conduite du 9 février au 9 mars 2015 et la deuxième (**$P_2$**) pendant la saison estivale (du 1er au 31 août 2015). Chaque période a été précédée de deux semaines d'adaptation (à la manipulation et ma présence pendant la traite) pour les vaches laitières. Trente-deux vaches de race Tarentaise issues de la cinquantaine du troupeau ont été réparties en deux lots identiques de 16 : un premier lot (**Hiver**) suivi expérimentalement durant $P_1$ et un deuxième lot (**Eté**) suivi durant $P_2$. Ce choix s'est fait pour avoir deux lots les plus proches possible sur la base du rang de lactation, du stade de lactation, de la production laitière initiale et du poids des vaches lors de la période expérimentale correspondante. Durant $P_1$, les vaches Hiver avaient un rang moyen de lactation de 3,18 ± 1,25, un stade moyen de lactation de 141 ± 34,0 jours et un poids moyen de 519 ± 28 kg. Durant $P_2$, les vaches Eté avaient un rang moyen de lactation de 3,56 ± 1,31, un stade de lactation moyen de 131 ± 37,6 jours et un poids moyen de 486 ± 51 kg. Durant toute l'expérimentation, les vaches laitières des deux groupes étaient logées de façon identique dans un bâtiment en stabulation libre, avec une toiture en tuile sur la stabulation et sur l'aire d'alimentation. Les vaches bénéficiaient d'un accès libre à une aire d'exercice découverte, disposant de plusieurs points d'eau l'été comme l'hiver. La surface du couchage était en béton nu couvert d'une couche de paille. Les bâtiments d'élevage étaient naturellement ventilés et n'étaient pas équipés de systèmes de refroidissement, que ce soit par des ventilateurs ou des brumisateurs.

La ration journalière des vaches laitières était composée d'un mélange de coproduits agro-industriels (dit « ration mixte ») distribué matin et soir, de mélasse de canne, de

fourrages verts, de paille de blé, d'un autre mélange de coproduits distribué à la mi-journée (dit « ration midi ») et d'eau à volonté (Tableau 1). La ration mixte était distribuée individuellement dans les mangeoires, accompagnée de mélasse de canne avec un complément en vitamines et minéraux, après la traite du matin et du soir (5h et 17h). Les fourrages verts (ray-grass en $P_1$ et le sorgho en $P_2$) étaient distribués dans des râteliers pour toutes les vaches (Figure 1). La paille de blé était disponible à volonté, tout le temps. Les vaches, produisant plus que 18 kg de lait par jour lors des périodes expérimentales, avaient droit à un troisième repas à midi à base d'un mélange de coproduits. Les ingrédients de la ration totale distribuée et des différents mélanges sont représentés dans le tableau 1.

**Figure 1.** Les vaches laitières Eté recevant leur ration de sorgho dans les râteliers

## II. Collecte des données météorologiques

Une base de données comprenant les enregistrements de Ta et de HR a été fournie par l'Institut National de Météorologie de Tunisie. Ces données ont été transmises à partir de la station météorologique publique de « Ben Arous », la plus proche de la ferme. Ces données météorologiques (Ta et HR) correspondaient aux valeurs journalières moyennes, maximales et minimales enregistrées durant les périodes expérimentales $P_1$ et $P_2$. Ces données ont permis de calculer les THI journaliers moyens, maximums et minimums relatifs au site expérimental, selon la formule indiquée plus bas. De plus, Ta et HR ont été mesurés quotidiennement à l'intérieur de l'étable en utilisant un thermo-hygromètre (Funk-Thermo-Hygromètre Bel-Air 30.3045) installé à 1,5 m du sol. D'autre part, deux thermomètres ont été installés dans l'étable pour enregistrer la Ta min et la Ta max pendant 24h. Les THI journaliers (issus de la station météorologique) et ceux lors des mesures à l'intérieur du site

expérimental, ont été calculés en utilisant l'équation proposée par Kibler (1964) : **THI = 1,8×Ta - [1-HR] × [Ta-14,3] + 32** ; Ta est exprimée en °C et HR en chiffre décimal.

## III. Mesures, échantillonnage et analyses

### III.1. Mesures des paramètres physiologiques

Les différents paramètres physiologiques, à savoir la fréquence respiratoire (**FR**), la fréquence cardiaque (**FC**), et la température rectale (**TR**) ont été mesurés à 13h, une fois par semaine pour chaque période (soit **4** jours de mesure par période expérimentale), lorsque les vaches (qui sont en stabulation libre) sont bloquées au cornadis pour leur repas de midi. La FR a été mesurée par détection des mouvements des creux du flanc et des dernières côtes, elle est exprimée en nombre de respirations par minute (**resp/min**). La FC, mesurée à l'aide d'un stéthoscope pendant une minute, est exprimée en battements par minute (**bat/min**). Pour la TR, un thermomètre digital a été appliqué dans la muqueuse rectale de la vache ; la lecture de la température (en °C) s'est faite après environ une minute, jusqu'à stabilisation.

### III.2. Etude de l'ingestion et la digestion

#### III.2.1. Mesure de l'ingestion et détermination de la composition chimique et de la valeur nutritionnelle des aliments

Pour déterminer la composition exacte de la ration mixte ingérée, chaque ingrédient a été pesé séparément avant le mélange (en kg bruts), sur une bascule transportée spécialement à la ferme pour l'expérimentation. Tout changement d'ingrédient dans le mélange (ajout ou retrait d'un composant) et tout nouvel arrivage ont été notés. La ration mixte mélangée était distribuée deux fois par jour, individuellement, les vaches étant bloquées au cornadis. Les quantités distribuées de ce mélange ont été pesées pour chaque vache deux jours par semaine. Les quantités brutes ingérées ont été calculées par différence entre la quantité distribuée et la quantité de refus. Mais il n'y a quasiment pas eu de refus pour la ration mixte, très appétente vu sa composition. Le même protocole a été suivi pour la ration mélangée « midi ». La paille de blé et le fourrage vert ont été distribués dans des râteliers collectifs et non individuellement. Les quantités totales distribuées de paille et de fourrages verts, ainsi que les refus, ont été pesés deux jours par semaine, et les quantités

ingérées par vache ont été estimées en divisant les quantités totales par le nombre d'animaux ayant accès aux râteliers.

**Tableau 1.** Proportions des différents ingrédients et des mélanges (ration mixte et ration « midi ») des rations totales distribuées durant les périodes hivernale ($P_1$) et estivale ($P_2$)

| | $P_1$ | | $P_2$ | |
|---|---|---|---|---|
| **Ration mixte** (% MS) | **39,4** | | **47,4** | |
| *Ensilage de tomates* | | *21,4 %* | | *20,3 %* |
| *Grains de maïs broyés* | | *37,9 %* | | *32,3 %* |
| *Drêches de brasserie* | | *17,8 %* | | *26,8 %* |
| *Son de blé* | | *19,3 %* | | *14,5 %* |
| *Gaufrettes* | | *3,6 %* | | - |
| *Pâtes* | | - | | *6,1 %* |
| **Mélasse de canne** (% MS) | **2,7** | | **3,0** | |
| **Fourrages verts** (% MS) | **6,5** | | **27,3** | |
| *Ray-grass* | | *100%* | | - |
| *Sorgho* | | - | | *100%* |
| **Ration « midi »** (% MS) | **18,4** | | **13,1** | |
| *Drêches de brasserie* | | *21,2 %* | | *13,4 %* |
| *Grains de maïs broyés* | | *33,3 %* | | *37,8 %* |
| *Tourteau de soja broyé* | | *28,3 %* | | *30,2 %* |
| *Son de blé* | | *17,2 %* | | *18,6 %* |
| **Paille de blé** (% MS) | **33,0** | | **9,2** | |

Un échantillon représentatif de la ration mixte, de la ration midi, de chacun des composants, des fourrages verts et de la paille ont été prélevés (environ 200g/aliment) toutes les deux semaines. Ces échantillons ont été séchés à l'étuve à 80 °C pendant 48h pour la détermination de la matière sèche (**MS**), et par calcul de la matière sèche ingérée (**MSI**) quotidiennement par les vaches. Après un broyage grossier, environ 100 g de chaque échantillon conditionnés dans des sachets hermétiques et identifiés ont été envoyés au laboratoire de l'équipe Sybel (UMR1213 Herbivores, INRA, centre Auvergne-Rhône-Alpes, France) pour des analyses de la composition chimique et de la valeur nutritive. Ces aliments ont été de nouveau broyés, au travers d'une grille de 1 mm, et analysés pour déterminer leurs teneurs en matière organique (**MO**), matières azotées totales (**MAT**), fibres alimentaires (Acid Detergent Fiber [**ADF**] et Neutral Detergent Fiber [**NDF**]), la digestibilité cellulase de leur MO (**dCo**) et leur énergie brute (**EB**).

La mesure de la MAT a été réalisée suivant la méthode Dumas (1826), à l'aide d'un analyseur Leco FP428. Le principe de celle-ci consiste en une combustion totale sous oxygène de la matrice organique où se trouve l'azote. Les gaz produits sont réduits par du cuivre puis desséchés, le $CO_2$ est piégé et l'azote est ensuite quantifié à l'aide d'un détecteur universel. La détermination des fibres (celluloses, hémicellulose, lignine…) selon Van Soest (1967), a été effectuée grâce à la méthode du Fibersac. Cette méthode gravimétrique consiste à déterminer la teneur en parois végétales d'un aliment (ou de fèces) en utilisant des sachets poreux. Les échantillons sont digérés dans un vase à réaction (bain bouillant de Neutral Detergent Solution) puis filtrés et plongés dans un bain d'acétone. Après essorage et évaporation de l'acétone, les sachets subissent une attaque acide avec une solution d'ADS (Acid Detergent Solution). Ensuite, les sachets contenant les résidus d'ADS sont plongés dans un bain d'acide sulfurique 72% pendant 4 heures avant d'être rincés, séchés, pesés et enfin minéralisés. La détermination de la dCo des fourrages et des aliments concentrés a été réalisée suivant une méthode enzymatique pepsine-cellulase mise au point à l'INRA de Theix (Aufrère et al., 2007). L'échantillon d'aliment subit deux attaques successives par deux enzymes diluées dans des tampons appropriés. D'abord, un prétraitement par la pepsine pendant 24 heures en milieu acide chlorhydrique 0,1 N suivi d'une hydrolyse à 80° C pendant 30 minutes. Ensuite, un traitement par la cellulase dans un tampon acétate de sodium 0,05 M, à pH 4,6 pendant 24 heures. L'EB de chaque aliment a été mesurée en utilisant une bombe calorimétrique (IKA C200).

Ces analyses ont permis de calculer, à l'aide du logiciel PrévAlim reposant sur les équations des Tables INRA (2007), les valeurs énergétiques exprimées en unités fourragères lait (**UFL**) et protéiques exprimées en protéines digestibles dans l'intestin (**PDI**, INRA, 1989) de chacun des aliments proposés et de la ration totale reconstituée. L'EB a principalement servi à estimer les valeurs énergétiques des aliments peu couramment utilisés, mal renseignés dans les tables et de composition très variable (ensilage de tomate, gaufrettes et pâtes).

L'énergie nette ingérée par les vaches (**$EN_I$**) a été calculée en multipliant la MSI par la valeur énergétique des différents constituants de la ration, corrigée des interactions digestives liées au pourcentage élevé de concentré dans la ration (INRA, 2007). A partir de la production laitière et du poids vif de chaque vache, l'$EN_I$ a permis de calculer le bilan

énergétique (**BILE**) des vaches laitières durant les deux périodes expérimentales, en utilisant l'équation : **BILE=$EN_I$- ($EN_E$+ $EN_L$)** ; **$EN_E$** est l'énergie nette pour l'entretien et **$EN_L$** l'énergie nette pour la lactation, calculées d'après les équations de l'INRA (2007). De la même façon, les protéines nettes ingérées (**$PN_I$**) ont été déterminées en multipliant la MSI par les valeurs PDI des constituants de la ration. Le bilan protéique (**BILP**) a été calculé pour chaque vache laitière en utilisant l'équation : **BILP=$PN_I$- ($PN_E$+ $PN_L$)** ; **$PN_E$** représente les protéines nettes pour l'entretien et **$PN_L$** les protéines nettes pour la lactation, calculées d'après les équations de l'INRA (2007).

### III.2.2 La digestibilité des rations

La digestibilité des rations a été estimée sur la moitié des vaches laitières, en récoltant des échantillons représentatifs des fèces de chaque vache pendant 24h. Les échantillons ont été mélangés afin de constituer un échantillon journalier représentatif de 100g. La constitution de cet échantillon s'est faite une seule fois par semaine, le lendemain des prélèvements des échantillons d'aliments. Ces échantillons de fèces ont été séchés à l'étuve pendant 48 heures à 80°C, puis broyés à 1mm et conditionnés dans des sachets en plastique. Ils ont été transportés au laboratoire de l'équipe Sybel pour analyse de leur teneur en azote (selon la méthode Dumas au moyen d'un analyseur Leco FP428, figure 2) et le calcul de la digestibilité. La digestibilité de la MO a été estimée en utilisant l'équation suivante, développée à l'INRA (d'après Peyraud, 1998): **dMO= 0,908 - [3,088/ $MAT_f$]** ; dMO représente la digestibilité de la MO de la ration distribuée et $MAT_f$ représente les MAT retrouvées dans les fèces des vaches.

**Figure 2.** Détermination des matières azotées fécales par l'analyseur Leco FP428

### III.3. Prélèvements de sang et analyses (métabolites et formules leucocytaire)

Les prélèvements de sang ont été effectués par le vétérinaire praticien responsable de l'élevage « Tarenty », dans le respect du bien-être des animaux. Des échantillons individuels ont été prélevés à deux reprises au cours de chaque période expérimentale, à midi (avant la distribution de la ration « midi »), au niveau de la veine caudale. Ces échantillons ont été répartis dans deux tubes de 10 mL chacun, contenant une solution anticoagulante d'EDTA. Le premier tube a été immédiatement placé dans un bain de glace et transféré au laboratoire « MEZIOU » d'analyses médicales conventionné avec l'INAT, pour la détermination de la formule leucocytaire totale (monocytes, neutrophiles, éosinophiles, basophiles et lymphocytes). Le deuxième tube a été immédiatement centrifugé pendant 10 minutes à 3000 tours/min. Le plasma a ensuite été pipeté et conditionné dans des cupules de 1,5 mL conservées à -20°C. Ces cupules ont été transférées au laboratoire de l'équipe Sybel pour la détermination des concentrations en glucose, en acides gras non-estérifiés (**AGNE**) et en ß-hydroxybutyrate (**ß-OH**) plasmatiques, en utilisant un auto-analyseur Arena 20 XT.

Le dosage du glucose plasmatique a été réalisé grâce à une méthode de dosage colorimétrique, basée sur le mode opératoire développé par Trinder (1969). Cette méthode utilise la glucose oxydase (**GOD**) et une réaction colorée catalysée par la peroxydase (**POD**). De la même façon, les AGNE plasmatiques et le ß-OH ont été mesurés en utilisant une méthode de dosage colorimétrique par spectrophotométrie, en utilisant un auto-analyseur Arena 20 XT. Toutes les analyses faites dans ce dispositif ont été réalisées selon les modes opératoires adoptés par l'INRA, figurants dans la base Assurance Qualité de l'UMR 1213 Herbivores.

### III.4. Production laitière et composition du lait (TB, TP, urée, CCS et cortisol)

Une fois par semaine, en alternant traite du soir et du matin, la production laitière individuelle des vaches a été contrôlée à l'aide d'un compteur à lait (fourni par le groupement des éleveurs de la race Tarentaise en Tunisie et l'OEP) installé dans la salle de traite. Lors de chaque journée de contrôle, deux échantillons représentatifs de la traite de chaque vache ont été prélevés et conditionnés dans des tubes, avec du bronopol comme conservateur. Un échantillon a été conservé à 4 °C et transféré le lendemain au laboratoire de la direction d'amélioration génétique de Sidi Thabet pour analyse du TB, du TP, de l'urée

et CCS, en utilisant la méthode d'absorption dans l'infrarouge (Milko scan 4000, Foss Electronics, France). L'autre échantillon a été congelé à -20 °C avant d'être transféré à un laboratoire de l'INRA de Theix pour le dosage du cortisol. En effet, le cortisol étant un biomarqueur de stress, le lait représente le meilleur site d'échantillonnage pour les vaches laitières car il est prélevé sans manipulation des animaux, contrairement au cortisol plasmatique. Les échantillons de lait ont été décongelés à température ambiante puis écrémés par centrifugation (2400 tours pendant 20 min à 4 °C). Le dosage du cortisol dans le lait a nécessité une phase d'extraction en utilisant l'éthyle acétate 99,9 % comme réactif. Cette extraction a été suivie d'un dosage radio-immunologique basé sur une compétition entre du cortisol synthétique marqué au tritium et le cortisol endogène, face à un anticorps spécifique (Boissy, 1990).

## IV. Analyses statistiques

L'étude statistique des différents paramètres a été réalisée par analyse de variance, en utilisant la procédure MIXED du logiciel SAS (version 9.4 ; SAS Institute, 2013).

Pour déterminer l'effet de la saison (Eté/ Hiver) sur la FR, la FC, la TR, le cortisol du lait, la dMO, le glucose, les AGNE et le ß-OH plasmatiques, la PL et la composition du lait (TB, TP, teneur en urée et CCS), nous avons utilisé un modèle linéaire mixte avec mesures répétées par vache. Les vaches ont été réparties en deux classes de parité, selon leur rang de lactation : primipare ou multipare. De même, le stade de lactation a été divisé en trois classes : début (<120 j), milieu (120-179 j) et fin de lactation (180 j et plus). Le modèle statistique utilisé est le suivant :

$$\mathbf{Y_{ijklmn} = \mu + saison_i + jour_j + covariable_k + stade_l + parité_m + vache_n + e_{ijklmn}}$$

$Y_{ijklmn}$ est la variable dépendante (FR, FC, TR, cortisol, dMO, glucose, AGNE, ß-OH, PL, TB, TP, urée ou CCS [exprimé en $\log_{10}$/mL]) ; μ est l'effet de la moyenne ; les effets fixes testés sont la saison (Hiver ou Eté) i, le jour de la mesure (de $j_1$ à $j_n$, n étant égal à 2 ou 4 selon les paramètres) j, la covariable k si disponible, le rang (en classe) l, la parité (en classe) m ; l'effet aléatoire est la vache (répété par jour de mesure) n ; $e_{ijklmn}$ est l'erreur résiduelle.

Pour la FR, la FC et la TR, le poids des vaches a été pris comme covariable (Kubkomawa et al., 2015). En ce qui concerne l'analyse du cortisol, la quantité de lait produite le jour du prélèvement a été considérée comme covarible, comme le suggèrent Correa-Calderón et al. (2004) et Fukasawa et al. (2008). Pour la PL, la moyenne du premier et du second contrôle laitier officiel de la lactation a été prise comme covariable dans l'analyse statistique. En effet, centrée sur de la production laitière au pic, cette covariable permet de prendre en considération le potentiel génétique de production des vaches des deux lots. Pour déterminer l'effet de la saison sur les monocytes, neutrophiles, éosinophiles, basophiles et lymphocytes, nous avons utilisé le même modèle, en prenant le CCS du jour de prélèvement (exprimé en $log_{10}$/mL) comme covariable (Paape et al., 1973). En revanche, nous n'avons pas utilisé de covariable dans les modèles statistiques relatifs à la dMO, au glucose, aux AGNE et au ß-OH plasmatiques.

# RESULTATS ET DISCUSSIONS

## I. Données météorologiques du site expérimental

Les valeurs journalières moyennes, maximales et minimales de Ta, HR et THI de la station météorologique la plus proche du site expérimental (ville de Nâassen, gouvernorat de Ben Arous, Tunisie) ainsi que les valeurs maximales et minimales de Ta enregistrées à l'intérieur de l'étable durant $P_1$ et $P_2$ sont présentées dans le tableau 2. Les variations journalières moyennes du THI durant les deux mêmes périodes sont représentées dans la figure 3. Selon Johnson (1980) et Berman et al. (1985), les paramètres Ta (=28,2 °C) et THI (=77,4) indiquent que les vaches Tarentaise étaient exposées à des conditions de stress thermique pendant le mois d'août de l'année 2015 ($P_2$). De même, comme l'illustre la figure 3, quel que soit le jour de $P_2$, le THI a toujours été supérieur à 73. Traditionnellement, un THI de 72 est considérée comme une valeur seuil au-dessus de laquelle la production laitière des vaches commence à baisser (Igono et al., 1992 ; Armstrong, 1994). En effet, selon Armstrong (1994), les vaches laitières réduisent leur MSI, ruminent moins et augmentent leurs besoins d'entretien quand le THI dépasse 72. Une étude plus récente, faite à l'université de l'Arizona, a montré que l'effet négatif du stress thermique sur la production des vaches laitières s'observe même à des valeurs minimales et moyennes de THI plus faibles (65 et 68, respectivement ; Zimbleman et al., 2009). Ce qui confirme les résultats de Bouraoui et al. (2002), qui ont précédemment signalé que 68 pouvait être considéré comme étant une valeur seuil de THI pour des vaches Holstein élevées dans les conditions climatiques méditerranéennes de la Tunisie. Dans notre étude, la valeur moyenne du THI journalier maxi pendant $P_2$ a atteint 90,1 ; cette valeur, pour de nombreux auteurs (Silanikove, 2000 ; González Pereyra et al., 2010 ; Thatcher et al., 2010), reflète même des conditions de stress thermique extrêmes.

**Tableau 2.** Données météorologiques (moyenne ± écart type) du site expérimental durant les périodes hivernale ($P_1$) et estivale ($P_2$)

| | $P_1$ | $P_2$ |
|---|---|---|
| **Ta journalière moyenne** (°C) | **11,2 ± 1,3** | **28,2 ± 1,1** |
| *Ta journalière maxi (°C)* | *16,4 ± 2,3* | *33,9 ± 1,8* |
| *Ta journalière mini (°C)* | *7,9 ± 1,6* | *23,4 ± 1,4* |
| **HR journalière moyenne** (%) | **74,0 ± 0,1** | **62,0 ± 0,1** |
| *HR journalière maxi (°C)* | *91,0 ± 0,1* | *86,0 ± 0,0* |
| *HR journalière mini (°C)* | *50,0 ± 0,1* | *37,0 ± 0,1* |
| **THI journalier moyen** | **52,9 ± 2,0** | **77,4 ± 1,5** |
| *THI journalier maxi* | *61,2 ± 3,8* | *90,1 ± 3,1* |
| *THI journalier mini* | *49,5 ± 2,0* | *68,5 ± 1,5* |
| **Ta maxi dans l'étable** (°C) | **14,9 ± 1,4** | **38,5 ± 1,8** |
| **Ta mini dans l'étable** (°C) | **4,9 ± 1,3** | **24,9 ± 1,5** |

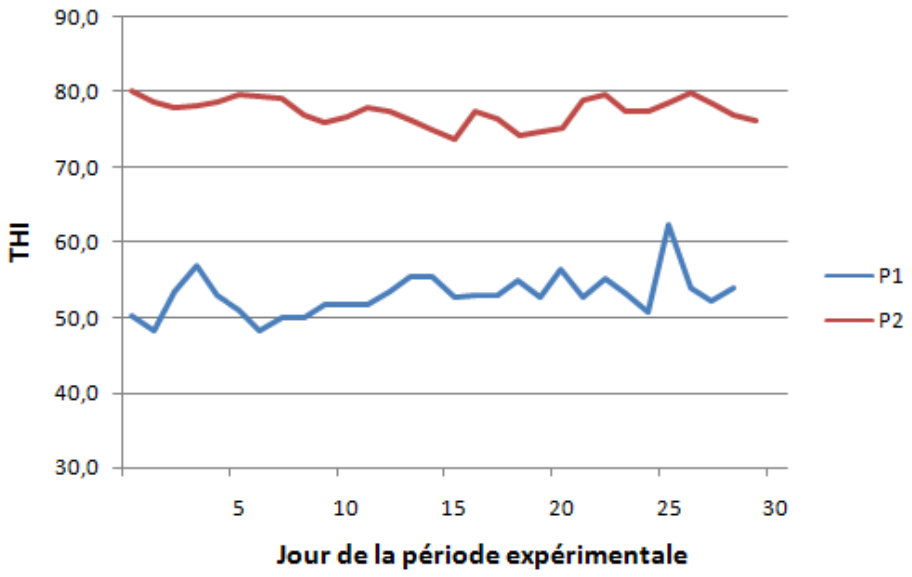



**Figure 3.** Variation journalière des THI moyens correspondant au site expérimental durant les périodes hivernale ($P_1$) et estivale ($P_2$)

## II. Effet du stress thermique sur les paramètres physiologiques

### II.1. La fréquence respiratoire

Les vaches Tarentaise durant $P_2$ ont montré des FR qui ont plus que doublé par rapport à $P_1$ (P<0,001 ; tableau 3). Comme nous l'avons vu dans l'étude bibliographique, l'augmentation de la FR dans des conditions de stress thermique est une réponse adaptative efficace pour les vaches laitières afin d'évacuer l'extra-chaleur via l'évaporation (Thomas et Pearson, 1986 ; Silanikove, 2000). De plus, nos valeurs de FR pendant l'hiver ($P_1$) et l'été ($P_2$), sont conformes à celles trouvées par d'autres auteurs dans des situations de THI analogues. Par exemple, Spiers et al. (2004) ont observé que la FR des vaches Holstein, initialement en conditions de thermoneutralité (Ta=19 °C ; HR=55 % ; THI=64,1), a augmenté de 59,6 à 88,6 resp/min en seulement 24h lors du passage à des conditions de stress thermique (Ta= 29 °C ; HR= 50 % ; THI=76,8). Du Preez (2000) a également trouvé que lorsque le THI journalier moyen passait de 57,9 à 74,4, la FR des vaches Holstein augmentait de 49 à 81,3 resp/min. Nos résultats suggèrent même qu'en été, la FR des vaches Tarentaise semble plus faible que celle mesurée sur des Holstein. En effet, Du Preez (2000) a signalé qu'avec un THI de 76,4, des vaches Holstein avaient une FR de 96 resp/min, alors que dans notre cas, les vaches Tarentaise étaient seulement à 74,1 resp/min avec un THI équivalent (77,4 en moyenne). Par conséquent, la FR des vaches Tarentaise semble moins élevée que celles des Holstein en cas de THI élevés, une partie de sa chaleur interne étant probablement déjà évacuée par la peau. En effet, la peau contient un nombre élevé de thermorécepteurs qui peuvent mettre en jeu certaines fonctions thermorégulatrices, dont l'évaporation respiratoire via l'élévation de la FR (Spiers et al., 2004). La surface corporelle des Tarentaise est certainement moindre, car elles sont en effet, de plus petite taille mais elles sont aussi moins lourdes, ce qui fait que le rapport poids métabolique / surface est certainement plus favorable pour les Tarentaise que pour les Holstein.

### II.2. La fréquence cardiaque

Les vaches Tarentaise qui ont subi un stress thermique pendant $P_2$ (THI=77,4) avaient en moyenne une FC plus élevée de 15 % (P<0,001 ; tableau 3) que celles en conditions de thermoneutralité (THI=52,9). Nos résultats concordent relativement bien avec ceux rapportés par Rejeb et al. (2012) et Bouraoui et al. (2002) sur des vaches Holstein dans les conditions climatiques méditerranéennes de la Tunisie. Comme l'illustre la figure 4,

dans des conditions de thermoneutralité, les vaches Tarentaise présentent une FC légèrement plus élevée que celles des Holstein. Cette différence peut être attribuée, comme chez les autres mammifères, au gabarit plus petit de la vache Tarentaise par rapport à la Holstein (Milnor, 1979) et à un poids moindre (-50 à -150 kg ; FGE, 2015). Cependant, dans des conditions de stress thermique, les FC moyennes des deux races sont équivalentes car l'augmentation de la FC des vaches Holstein a été supérieure à celle des Tarentaise (+1,0 bat/min vs. +0,4 bat/min par point de THI supplémentaire). De ce fait, les Tarentaise semblent moins affectées par la chaleur car elles éprouvent moins le besoin d'augmenter leur fréquence cardiaque. Il est donc possible qu'elles aient une meilleure adaptation aux THI extrêmes par le maintien du processus de thermolyse, principalement par voie évaporative respiratoire. Selon McManus et al. (2009), lorsque la dissipation de chaleur n'est plus contrôlée par l'évaporation, l'animal dépendra alors de l'augmentation de la FC pour perdre de la chaleur et prévenir l'augmentation de la température corporelle interne. En effet, dans notre cas et malgré une augmentation significative, la FC des vaches Tarentaise soumises à des conditions du stress thermique reste relativement faible et proche des normes (55-70 bat/min ;  McDowell et al., 1976).

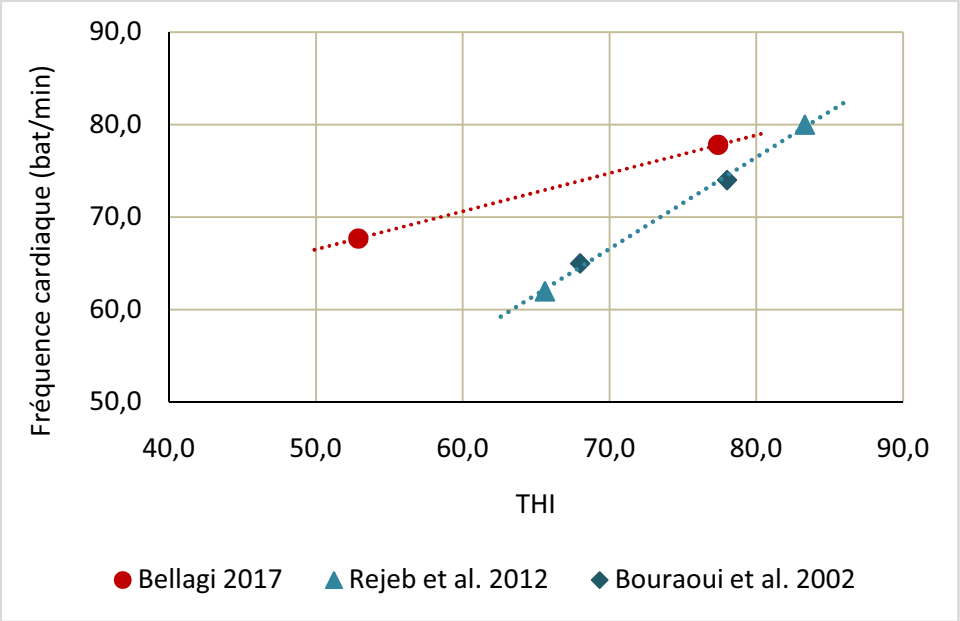



**Figure 4.** Comparaison de nos mesures de fréquence cardiaque en fonction du THI avec celles de Bouraoui et al. (2002) et Rejeb et al. (2012) sur la race Holstein, dans les conditions climatiques méditerranéennes de la Tunisie

## II.3. La température rectale

La TR moyenne est significativement affectée par le stress thermique. En effet, lorsque le THI passe de 52,9 pendant $P_1$ à 77,4 pendant $P_2$, la TR moyenne des vaches Tarentaise augmente de 0,9 °C (P<0,001 ; tableau 3). En général, la température interne des vaches laitières dans des conditions de thermoneutralité varie entre 38,0 et 39,3 °C ; une augmentation d'environ 1 °C de la TR est cependant suffisante pour réduire considérablement les performances de production (McDowell et al., 1976 ; Robinson, 1999).

La TR moyenne trouvée dans notre étude est plus faible que celle rapportée par Espinosa et al. (2009), qui signalent que la TR de vaches Holstein a atteint 40,1 °C lorsque le THI était égal à 78,9. De même, McManus et al. (2009) ont trouvé que la TR de vaches Holstein soumises à des conditions de stress thermique avait augmenté de 1,4 °C par rapport à une situation de thermoneutralité. Par ailleurs, si l'on compare nos résultats avec ceux de Bouraoui et al. (2002), bien que la TR soit à peu près équivalente pour des vaches Tarentaise et Holstein (39,2 et 39,3 °C, respectivement) soumises aux mêmes conditions estivales (THI= ~77,7), l'augmentation de la TR a été plus progressive pour les Tarentaise (+0,04 °C par point de THI) que pour les Holstein (+0,07 °C par point de THI). Dans notre cas, la meilleure adaptabilité des vaches Tarentaise est probablement due à une couleur de robe plus claire, une production laitière et un poids corporel moindres mais aussi à une évaporation cutanée plus efficace (Armstrong et Hillman, 1998).

## II.4. Le cortisol du lait

La concentration du cortisol dans le lait a varié significativement en fonction de la saison, avec des teneurs plus élevées durant $P_2$ que $P_1$ (+ 64 % ; P<0,001 ; tableau 3). Nos résultats concordent avec ceux de Zähner et al. (2004) qui rapportent qu'en Suisse, pendant la saison estivale, la concentration du cortisol dans le lait de vaches de différentes races pouvait doubler ou même tripler dans certaines fermes, suite à l'élévation des THI à des valeurs supérieures à 75. Dans notre étude, les vaches laitières sont habituées à la présence quotidienne du maître vacher pendant la traite et se sont aussi adaptées au temps consacré à l'expérimentation. Le cortisol étant un biomarqueur du stress, l'augmentation du taux de cortisol dans le lait doit donc en grande partie être liée à l'effet du stress thermique, car il

n'y a pas eu de manipulation non ordinaire des animaux lors de la traite. L'augmentation modérée du cortisol constaté dans la présente étude nous permet donc de faire l'hypothèse que le degré d'acclimatation des vaches Tarentaise à un stress thermique est plutôt bon. Cependant, une telle augmentation peut quand même entraîner une modification du métabolisme de base, de la distribution de l'eau dans l'organisme et de l'approvisionnement de la glande mammaire en glucose (Thompson, 1985).

**Tableau 3**. Effets du stress thermique sur la fréquence respiratoire (FR), la fréquence cardiaque (FC), la température rectale (TR) et le cortisol du lait ; valeurs moyennes par saison ($P_1$ = hiver, $P_2$ = été) ajustées par le modèle ; effets de la saison et du jour de la mesure

| | $P_1$ | $P_2$ | Erreur type | Effet saison | Effet jour |
|---|---|---|---|---|---|
| FR (resp/min) | 32,9 | 74,1 | 1,15 | *** | *** |
| FC (bat/min) | 67,7 | 77,8 | 0,80 | *** | *** |
| TR (°C) | 38,3 | 39,2 | 0,08 | *** | NS |
| Cortisol du lait (ng/mL) | 0,45 | 0,75 | 0,09 | ** | *** |

†NS (non significatif) P>0,05 ;*** P<0,001 ; ** P<0,01

## III. Effet du stress thermique sur le comportement alimentaire

### III.1. Effet sur l'ingestion

Il est communément admis que le stress thermique entraine, chez la vache laitière, une baisse de l'ingestion (Yousef, 1985 ; Blackshaw et Blackshaw, 1994) qui, comme nous l'avons vu précédemment, conduit à une baisse de production laitière car l'énergie ingérée diminue (Collier et Beede, 1985 ; Collier et al., 2005). Afin de pallier ce problème, il faut arriver à proposer aux animaux, durant la période estivale, une ration qui, tout en restant appétente et équilibrée, soit plus concentrée en énergie (Oldick et Firkins 1997 ; Dahlanuddin et al., 1996). Cette ration plus concentrée doit permettre, malgré une baisse de l'ingestion, de conserver des apports énergétiques équivalents à ceux de la période hivernale tout en réduisant la teneur en fibres et donc la thermogenèse liée à l'extra-chaleur produite par les fermentations ruminales (Cummins, 1992 ; Halachmi et al., 2004).

C'est ce qui a été mis en place durant l'été (à partir du 3 août) dans notre expérimentation, en proposant aux animaux 4 à 5 fois plus de fourrages verts (figure 5) et un peu plus des 2 rations mélangées (12,0 vs 10,7 kg/j). Cela a conduit à une diminution importante de l'ingestion de paille (-4,3 kg/j), seul aliment réellement disponible à volonté 24h/24h. Malgré les conditions de stress thermique rencontrées durant l'été, il en a résulté une ingestion supérieure de 7 % (tableau 4), une quantité d'énergie nette ingérée (corrigée des interactions digestives) par vache supérieure de 2,1 UFL/j et une quantité de protéines digestibles supérieure de 338 g/j. La ration estivale étant moins fibreuse (-21 % d'ADF), sa densité énergétique est supérieure de 8,6 % (à 0,76 UFL/kg MS) et sa densité protéique de 12,1 % (à 102 g de PDIN/kg MS). Les besoins énergétique et protéique pour produire 1 kg de lait « standard » étant de 0,44 UFL et 48 g de PDI (INRA, 2007), nous pouvons d'ores et déjà nous attendre à une production laitière plus élevée en $P_2$ qu'en $P_1$ (+4,8 kg/j permis par la différence d'énergie ; +7,0 kg/j permis par la différence de protéines).

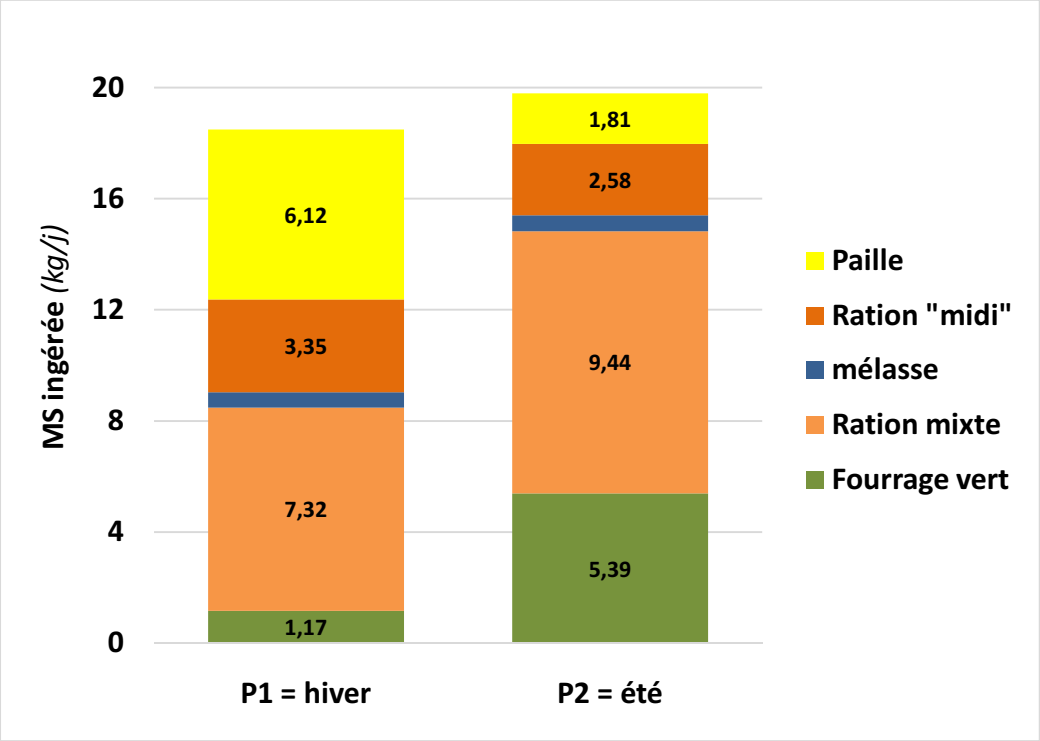



**Figure 5.** Quantités journalières moyennes de MS ingérées de chacun des composants de la ration totale par chaque vache des lots $P_1$ et $P_2$, en fonction de la saison

### III.2. Effet sur la digestibilité

L'effet de la saison sur dMO des rations n'a pas été significatif (de la ration estimée à partir des prélèvements fécaux) (P>0,05 ; tableau 4). Généralement les chutes de digestibilité sont observées lorsque le niveau d'ingestion est très bas, et elles pourraient être accrues avec des fourrages de mauvaise qualité (Doreau et al., 2000), ce qui n'a pas été le cas dans notre essai, bien au contraire. Dans une étude faite dans les conditions climatiques tunisiennes, Rejeb et al. (2012) ont trouvé que la digestibilité est positivement corrélée avec l'augmentation de Ta et de THI (r=0,65 et 0,64, respectivement ; P<0,001). Lorsque l'augmentation du THI s'accompagne d'une chute importante de consommation il est normal que la digestibilité ait tendance à s'améliorer suite à un transit plus lent. Nos résultats ne concordent pas avec ceux rapportés par ces auteurs ; cette différence peut s'expliquer par des conditions expérimentales différentes, des différences dans la nature des rations distribuées (notamment les rapports fourrages/aliments concentrés) et par des potentiels productifs différents (vaches Tarentaise produisant ~18,0 kg/j dans notre cas vs vaches Holstein produisant ~28,5 kg/j).

**Tableau 4**. Ingestion et principales caractéristiques nutritionnelles des rations distribuées pendant les périodes hivernale ($P_1$) et estivale ($P_2$)

| | $P_1$ | $P_2$ |
|---|---|---|
| Quantités totales ingérées (kg MS/j) | 18,5 | 19,8 |
| Energie nette [corrigée] ingérée (UFL/j) | 13,0 | 15,1 |
| Densité énergétique de la ration (UFL/kg MS) | 0,70 | 0,76 |
| Fibrosité de la ration (ADF en g/kg MS) | 243 | 193 |
| Protéines digestibles ingérées (PDIN* en g/j) | 1685 | 2023 |
| Digestibilité moyenne de la ration dMO (%) | 71,9 | 72,7 |

*PDIN= protéines digestibles dans l'intestin, quand l'azote dégradable n'est pas le facteur

## IV. Les réponses métaboliques face au stress thermique

### IV.1. Effet sur le glucose plasmatique

Le stress thermique pendant $P_2$ a significativement diminué la concentration du glucose plasmatique chez les vaches Tarentaise (P<0,01 ; tableau 5), avec une concentration

en glucose plasmatique inférieure de 22 % par rapport à $P_1$. Ces résultats sont en accord avec ceux de Itoh et al. (1998), Abeni et al. (2007) et Wheelock et al. (2010), qui ont mesuré des concentrations en glucose plasmatique inférieures chez les vaches laitières exposées à un stress thermique, mais dans des proportions moindres que dans notre essai (-4,1 %, -6,2 % et -9,3 %, respectivement). Abeni et al. (2007) attribuent leurs résultats à plusieurs facteurs dont la réduction des apports énergétiques suite à la réduction de la MSI, l'augmentation des besoins d'entretien suite au déclanchement des mécanismes thermorégulateurs et enfin la modification de la néoglucogenèse suite à l'élévation de la température ambiante. Pour Ronchi et al. (1997, 1999), la réduction de la concentration du glucose plasmatique en conditions de stress thermique est la résultante directe de la réduction de l'activité du foie, et donc de la néoglucogenèse, qui constitue une réponse adaptative endocrine aux fortes chaleurs.

Nos résultats suggèrent que les vaches laitières pendant $P_2$ ont augmenté l'utilisation du glucose par les tissus périphériques. En effet, dans le but de générer moins de chaleur métabolique, l'organisme (principalement les muscles squelettiques) a tendance à utiliser le glucose à un rythme plus accru (Wheelock et al., 2010). En outre, pour maintenir la production laitière pendant la période de stress thermique en $P_2$, la glande mammaire aurait nécessité plus de glucose pour synthétiser le lactose du lait, ce qui permet d'expliquer en grande partie, la réduction de la concentration du glucose plasmatique.

### IV.2. Effet sur les acides gras non-estérifiés (AGNE)

Selon nos mesures, aucune différence significative n'a été observée quant à la concentration des AGNE plasmatiques entre $P_1$ et $P_2$ ($P>0,05$ ; tableau 5). Cette absence de différence statistique a été aussi observée par Itoh et al. (1998), O'Brien et al. (2010) et Wheelock et al. (2010). Ces auteurs stipulent que pendant le stress thermique, la restriction alimentaire n'était pas suffisamment sévère pour provoquer la mobilisation des tissus adipeux. Ces résultats concordent bien avec les nôtres. En effet, les vaches Tarentaise pendant $P_2$ n'ont pas réduit leur prise alimentaire et n'ont apparemment pas été en bilan énergétique négatif (voir paragraphe V.6.) et n'ont donc pas déclenché la lipolyse et la mobilisation des tissus adipeux sous forme de triglycérides.

Dans notre étude, pour subvenir à leurs besoins d'entretien et maintenir leur lactation pendant $P_2$ (voir paragraphe V.1.), les vaches Tarentaise semblent avoir maximisé l'utilisation du glucose par les tissus périphériques, limitant ainsi la mobilisation du tissu adipeux.

### IV.3. Effet sur le ß-hydroxybutyrate

La concentration plasmatique en ß-OH a été plus élevée pendant $P_2$ que pendant $P_1$ (+63 %, P<0,001 ; tableau 5). Plusieurs études ont aussi souligné cette hausse de la concentration plasmatique en ß-OH dans des conditions de stress thermique : Abeni et al. (2007 ; +72 %), Tian et al. (2015 ; +50 %) et Lamp et al. (2015 ; +23 %). Selon Tian et al. (2016), l'augmentation de la concentration plasmatique du ß-OH, excellent indicateur du déficit énergétique des vaches laitières, reflète une mobilisation excessive des protéines et un approvisionnement insuffisant de l'organisme en glucose, notamment dans des conditions de stress thermique. Dans notre étude, l'augmentation de la concentration du ß-OH plasmatique pendant $P_2$ semble être la résultante directe de la diminution du glucose plasmatique, en réponse à une mobilisation accrue des tissus périphériques pour maintenir la production laitière, même dans des conditions de stress thermique.

**Tableau 5.** Effet du stress thermique sur les concentrations plasmatiques du glucose, des acides gras non-estérifiés (AGNE) et du ß-hydroxybutyrate (ß-OH) ; valeurs moyennes par saison ($P_1$ = hiver, $P_2$ = été) ajustées par le modèle ; effets de la saison et du jour de la mesure

| | $P_1$ | $P_2$ | Erreur type | Effet saison | Effet jour |
|---|---|---|---|---|---|
| Glucose plasmatique (g/L) | 0,54 | 0,42 | 0,04 | *** | NS |
| AGNE plasmatiques (mmol/L) | 0,08 | 0,08 | 0,01 | NS | NS |
| ß-OH plasmatique (mmol/L) | 0,41 | 0,67 | 0,04 | *** | ** |

†NS (non significatif) P>0,05 ; *** P<0,001 ; ** P<0,05

## V. Effet du stress thermique sur la production laitière et la composition du lait

### V.1. La production laitière

L'effet de la saison sur la production laitière a été significatif. Mais, comme l'illustre le tableau 6, les vaches Tarentaise pendant $P_2$ et dans des conditions de stress thermique, ont

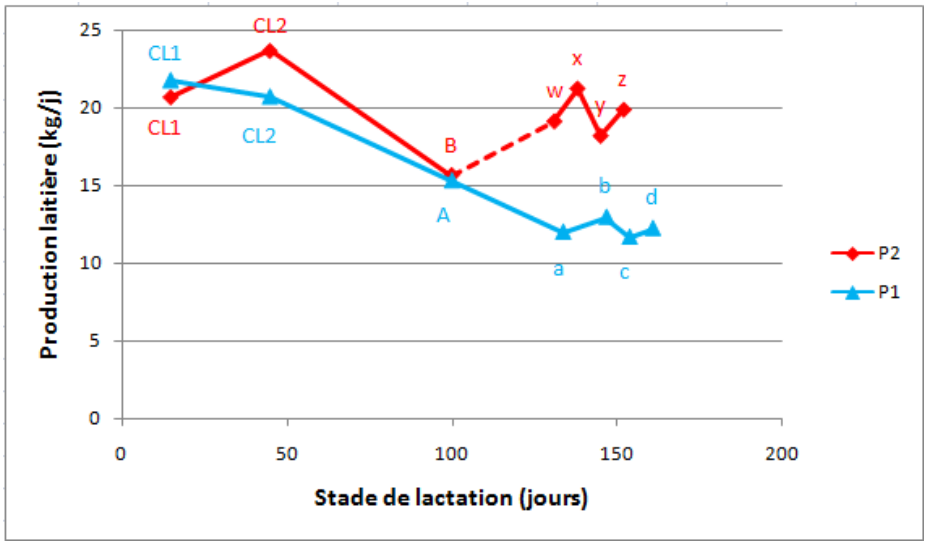
produit plus de lait que celles en condition de thermoneutralité lors de $P_1$ (+7,1 kg/j ; P<0,001). Cette augmentation est non conforme avec la bibliographie car plusieurs études stipulent que le stress thermique est généralement associé à une baisse de la production laitière allant de 10 à 34 % (Bianca, 1965 ; Itoh et al., 1998; Smith et al., 2013). Dans leur étude réalisée dans les conditions climatiques méditerranéennes de la Tunisie, Bouraoui et al. (2002) ont ainsi estimé que la production laitière de vaches Holstein chutait de 0,41 kg/j, pour chaque unité de THI au-dessus de 68 (r = -0,76). Toutefois, Fuquay (1981), a souligné qu'il est difficile de quantifier les effets environnementaux directs sur la production laitière, car celle-ci est fortement influencée par les facteurs nutritionnels qui peuvent être directement ou indirectement liés aux conditions climatiques. Cet auteur suggère que la réduction de la MSI constitue une des causes principales de la chute de production laitière en conditions de stress thermique, car elle influe considérablement la disponibilité des nutriments impliqués dans le processus de synthèse du lait. De même, Baumgard et al. (2006) ont indiqué que le déclin de la MSI comptait pour environ 40-50 % dans la chute de la production laitière lors d'un stress thermique.

Dans notre étude, l'augmentation de la production laitière des vaches Tarentaise pendant la saison estivale semble principalement liée à un niveau d'ingestion maintenu (voire augmenté de +7,0 %) couplé à une ration alimentaire de plus haute densité énergétique (+8,6 %), grâce à un apport plus élevé en énergie, en protéines, et réduit en cellulose (voir paragraphe III.1.). La figure 4 illustre les variations de production laitière des deux lots de vaches en fonction de leur stade de lactation. Comme l'attestent les valeurs des contrôles laitiers des premier et deuxième mois de lactation (CL1 et CL2), les deux lots de vaches Tarentaise avaient des potentiels de production quasiment identiques. L'amélioration de la ration distribuée en période estivale ($P_2$), à partir du point B, a donc permis non seulement de stopper la chute de production laitière liée à l'avancée du stade de lactation, mais encore de l'augmenter de près de 5 kg/j. En effet, comme nous l'avons vu précédemment, la ration estivale permet en théorie de gagner entre 4,8 kg/j (surplus d'énergie) et 7,0 kg/j (surplus de protéines) de lait par rapport à la ration hivernale, ce qui représente de 68 à 99 % de la différence de production laitière observée entre $P_2$ et $P_1$.

**Tableau 6.** Effet du stress thermique sur la production laitière, la composition du lait et les bilans énergétiques et protéiques; valeurs moyennes par saison ($P_1$ = hiver, $P_2$ = été) ajustées par le modèle (sauf pour les bilans, calculés au niveau du lot expérimental) ; effets de la saison et du jour de la mesure

| | $P_1$ | $P_2$ | Erreur type | Effet saison | Effet jour |
|---|---|---|---|---|---|
| Production laitière (kg/j) | 11,6 | 18,7 | 1,13 | *** | *** |
| Taux butyreux (g/kg) | 34,1 | 36,1 | 1,45 | NS | NS |
| Taux protéique (g/kg) | 36,2 | 33,9 | 0,89 | *** | ** |
| Urée (mg/L) | 74,7 | 101,2 | 8,45 | ** | NS |
| CCS ($log_{10}$/mL) | 5,95 | 5,43 | 0,18 | ** | NS |
| Bilan énergétique (UFL/j) | 3,06 | 2,25 | - | - | - |
| Bilan protéique (PDI en g/j) | 676 | 679 | - | - | - |

†NS (non significatif) P>0,05 ; *** P<0,001 ; ** P<0,05 CCS = comptage des cellules somatiques




**CL1** = 1er contrôle laitier de la lactation*(des 16 vaches du lot P1 et des 16 vaches du lot P2)*
**CL2** = 2ème contrôle laitier de la lactation
**A** = production laitière estimée des vaches du lot P1 au 100ème jour de lactation *(à partir de la moyenne [CL1-CL2]du lot P1 et de la décroissance moyenne en % du lot P2 entre [CL1-CL2] et B)*
**B** = contrôle laitier du 2 juillet 2015 des vaches du lot P2 *(soit en moyenne au 100ème jour de lactation)*
--- = changement de régime alimentaire des vaches du lot P2
**a**, **b**, **c**, **d** = 4 contrôles laitiers expérimentaux du 9/02 au 9/03 2015 *(a, c = traite du soir ; b, d = traite du matin)*
**w**, **x**, **y**, **z** = 4 contrôles laitiers expérimentaux du 1er au 31/08 2015 *(w, y = traite du soir ; x, z = traite du matin)*

**Figure 6.** Production laitière moyenne des deux lots de vaches en périodes hivernale ($P_1$) et estivale ($P_2$), en fonction de leur stade de lactation.

### V.2. Le taux butyreux

Comme l'illustre le tableau 6, l'augmentation de 2,0 g/kg du TB durant la saison estivale n'est pas statistiquement significative (P=0,19). L'effet du stress thermique sur les matières grasses du lait n'est pas toujours évident et les avis divergent (Bernabucci et al., 2010). Ainsi, Bouraoui et al. (2002) ont mesuré pendant la saison estivale une chute du TB de 3,4 g/kg qu'ils attribuent à une diminution de l'ingestion des fourrages grossiers (-17 %), ce qui a conduit à une baisse de la rumination. D'autres études suggèrent que le stress thermique soit n'entraîne aucune variation significative du TB (Itoh et al., 1998 ; Wheelock et al., 2010), soit contribue à la hausse de ce paramètre (Sharma et al., 1983 ; Smith et al., 2013). Knapp et Grummer (1991), qui comme nous n'ont pas observé de variation de TB dans le lait de vaches exposées à des conditions de stress thermique, attribuent ce résultats à la distribution d'une ration complète mélangée ayant permis aux animaux de conserver un rapport fourrages/ concentrés apportant assez de fibres pour soutenir la rumination. Dans notre étude, malgré la concentration de la ration, la part de fourrages grossiers a très peu varié entre l'hiver (39 %) et l'été (36 %), permettant ainsi de maintenir la rumination et le TB.

### V.3. Le taux protéique

Le TP du lait a significativement baissé entre $P_1$ et $P_2$ (-2,3 g/kg ; P<0,05 ; tableau 6). La chute de la teneur du lait en matières protéiques chez des vaches en condition de stress thermique a souvent été signalée dans d'autres études (Rodriguez et al., 1985 ; Bouraoui et al., 2002 ; Gantner et al., 2011). Nos résultats concordent, mais avec une amplitude supérieure, avec ceux de Rejeb et al. (2012) qui rapportent que des vaches Holstein exposées à des conditions de stress thermique pendant la saison estivale en Tunisie (THI=83,9) ont un TP moyen inférieur de 0,7 g/kg à celui de vaches en conditions de thermoneutralité (THI=65,6). Emery (1978) attribue cette baisse de TP en période chaude à la diminution de la MSI (visant à réduire la chaleur métabolique interne), qui conduit à la baisse des apports énergétiques et protéiques pour les animaux. Dans notre cas, la réduction du TP pendant l'été, malgré une augmentation de la MSI et une concentration de la ration, traduit un bilan énergétique moins élevé qu'en hiver (+2,25 UFL/j en $P_2$ contre +3,06 UFL/j en $P_1$), lié à la forte augmentation de la production laitière permise par la ration estivale.

### V.4. La teneur en urée du lait

La teneur en urée du lait a significativement augmenté entre $P_1$ et $P_2$ (+26,5 mg/L ; P<0,01 ; tableau 6). Nos résultats concordent bien avec ceux rapportés par de nombreux auteurs lors des périodes estivales (Fatehi et al., 2012 ; Hojman et al., 2004 ; Dufrasne et al., 2010). Le taux d'urée du lait d'un troupeau permet de renseigner sur l'efficience de l'utilisation de l'azote ; il est principalement affecté par la teneur des aliments en MAT (et plus spécifiquement PDIN), le rapport MAT/énergie de la ration, l'efficacité de la dégradation des MAT dans le rumen et la teneur en $NH_3$ excédentaire par rapport aux besoins en azote de la flore microbienne du rumen (Carlsson et al., 1995 ; Hof et al., 1997). Par conséquent, l'augmentation de la teneur en urée du lait observée pendant l'été est principalement attribuée aux changements de la qualité nutritionnelle de la ration lors de la sortie des vaches au pâturage (Wittwer et al., 1999; Arunvipas et al., 2004). Dans notre cas, où il n'y a pas eu de pâturage estival, l'augmentation du taux d'urée du lait (+35 %) est principalement liée à un apport supplémentaire en protéines dégradables pendant l'été (+20 % de PDIN). Mais l'ampleur de cette augmentation n'est pas totalement explicable car le rapport MAT / énergie de la ration est resté sensiblement identique (134 g PDIN/UFL en $P_2$ contre 130 g en $P_1$), de même que le bilan protéique (+679 g/j de PDI en $P_2$ contre +676 g/j en $P_1$).

### V.5. Le comptage des cellules somatiques

Il a été constaté pendant la période estivale une baisse importante du CCS du lait (622 000 cellules/mL de moins qu'en $P_1$ ; P<0,001 ; tableau 6). Cette baisse est contradictoire avec ce qui a généralement été observé dans d'autres essais (Bouraoui et al., 2002 ; Smith et al., 2013 ; RejebBellil, 2014). Pour Hammami et al. (2013a), l'augmentation du CCS pendant l'été est principalement expliquée par un dysfonctionnement du système immunitaire suite à l'élévation de la température ambiante, créant ainsi un stress oxydatif, alors que pour Godden et al. (2003) le stress thermique est en grande partie responsable de l'augmentation de la charge en agents pathogènes qui va accroitre l'incidence des mammites chez les vaches laitières. Néanmoins il semble étonnant qu'aucune étude, à notre connaissance, n'ait auparavant formulé l'hypothèse que i/ si la production laitière diminue en réponse à l'augmentation de la température et ii/ si le nombre de cellules épithéliales mammaires éliminées dans le lait (lié à l'apoptose et qui représentent environ 25 % du

CCS ; Hervé et al., 2016) reste constante, alors le CCS sera mathématiquement plus élevé. La chute inattendue des CCS en période de stress thermique dans notre étude pourrait s'expliquer par un nombre moins élevé en été qu'en hiver de vaches souffrant de mammites subcliniques en début de période expérimentale (les vaches atteintes de mammites cliniques n'ayant pas été retenues pour l'essai). Ainsi, lors les 2 premiers prélèvements de lait expérimentaux, 75 % des vaches avaient un CCS >534 000 cellules/mL en $P_1$ (synonyme d'au moins un quartier infecté par un germe pathogène majeur ; Serieys, 1985) contre seulement 35 % en $P_2$ (P=0,010).

### V.6. Bilans énergétique et protéique

Comme l'illustre le tableau 6, le bilan énergétique moyen des vaches Tarentaise pendant l'été ($P_2$) n'est pas négatif, mais il est inférieur de 26,1 % à celui des vaches en conditions de neutralité thermique de $P_1$. Par contre, le bilan protéique est resté relativement inchangé durant les deux périodes expérimentales. Comme nous l'avons précédemment vu dans la partie bibliographique, le stress thermique entraine une disponibilité réduite de l'énergie et un certain nombre de modifications métaboliques, telles que la diminution de la lipogenèse et l'augmentation de la lipolyse. Ceci induit, par la même occasion, un bilan énergétique négatif chez les vaches laitières (Moore et al., 2005 ; Roche et al., 2009). Bien que la mobilisation du tissu adipeux soit une réponse adaptative physiologique face au stress thermique, un bilan énergétique négatif a des effets néfastes sur la santé et la productivité des vaches laitières (Roche et al., 2009). En effet, les vaches qui présentent un bilan énergétique négatif, ont en général un profil métabolique caractérisé par des valeurs élevées en AGNE plasmatiques, entrainant une augmentation de l'incidence de l'acidose et des métrites (Kadzere et al., 2002), ce qui n'a pas été notre cas. En effet, dans notre étude, les vaches Tarentaise qui étaient en état de stress thermique n'ont pas mobilisé les réserves du tissu lipidique ; cependant, leur bilan énergétique moins bon est vraisemblablement lié à l'augmentation importante de leur production laitière, couplée à l'augmentation de leurs besoins d'entretien dans le but de maintenir le processus de thermolyse.

## VI. Effet du stress thermique sur la formule leucocytaire

Le stress thermique pendant $P_2$ n'a entraîné aucune modification significative des paramètres immunologiques chez les vaches Tarentaise de cette étude (Tableau 7). En effet

aucune variation significative n'a été observée pour les lymphocytes, monocytes, eosinophiles, neutrophiles et les basophiles entre $P_1$ et $P_2$ ($P>0,05$). Pourtant, comme nous l'avons déjà vu dans la partie bibliographique, le stress thermique entraine souvent des modifications des paramètres immunologiques, via la stimulation de l'axe hypophyso-surrénalien (Burton, 2007 ; Collier et al., 2008 ; do Amaral et al., 2011). Les résultats de notre étude suggèrent que le stress thermique n'a ni entraîné la modification des fonctions immunologiques des vaches Tarentaise, ni stimulé leur immunité à médiation cellulaire. Il est toutefois possible, au niveau des paramètres mesurés, que les effets du stress thermique en $P_2$ et la capacité des vaches de $P_1$ à mobiliser des leucocytes (lors de mammites subcliniques) aient été confondus.

**Tableau 7**. Effet du stress thermique sur les lymphocytes, monocytes, éosinophiles, neutrophiles et basophiles ; valeurs moyennes par saison ($P_1$ = hiver, $P_2$ = été) ajustées par le modèle ; effets de la saison et du CCS du jour de la mesure

| | $P_1$ | $P_2$ | Erreur type | Effet saison | Effet CCS |
|---|---|---|---|---|---|
| Lymphocytes (%) | 56,1 | 65,7 | 7,13 | NS | NS |
| Monocytes (%) | 7,18 | 6,25 | 1,32 | NS | NS |
| Eosinophiles (%) | 5,29 | 2,82 | 1,08 | NS | NS |
| Neutrophiles (%) | 31,4 | 24,3 | 6,75 | NS | NS |
| Basophiles (%) | 0,00 | 0,00 | - | - | - |

†NS (non significatif) CCS = comptage des cellules somatiques

**A Retenir**

En période estivale et avec des THI élevés (voire extrêmes), nous avons observé les réponses physiologiques classiques qu'adoptent les vaches laitières face au stress thermique. En effet, les vaches Tarentaise de cette étude ont montré des fréquences respiratoires, des fréquences cardiaques et des températures rectales plus élevées, mais aussi des teneurs en cortisol du lait augmentées. Toutefois, l'amplitude de variation de ces paramètres est généralement beaucoup plus importante chez les vaches de race Holstein, ce qui souligne la meilleure résistance de la Tarentaise à la chaleur et son potentiel d'acclimatation aux conditions climatiques Tunisiennes.

D'autre part, grâce à la distribution d'une ration plus concentrée en énergie et en protéines, nous n'avons pas observé certaines réponses attendues face à l'augmentation de la température ambiante, telles que l'altération du métabolisme lipidique, la chute de la matière sèche ingérée et de la production laitière, ainsi qu'un bilan énergétique négatif. Nous pouvons donc conclure qu'il est possible, dans les conditions estivales de la Tunisie, de maintenir la production laitière des vaches (notamment des Tarentaise) en adaptant l'alimentation ; ceci a nécessairement un coût (qui n'a pas été calculé dans cette thèse) mais qui peut s'avérer intéressant si le lait produit est correctement valorisé.

# Discussion générale et perspectives

L'objectif principal de cette étude était de caractériser l'adaptation de la race Tarentaise aux conditions du stress thermique en Tunisie. Nous avons d'abord comparé, sous des conditions climatiques extrêmes et dans des conditions d'élevage similaires, les performances de production de la race Tarentaise avec celles de la race Holstein, qui représente plus que 93 % du cheptel bovin tunisien en unité femelles (DGPA, 2016). Ensuite, dans un second dispositif, nous avons approfondi les différents mécanismes physiologiques, métaboliques et comportementaux dont dispose la race Tarentaise pour faire face à la chaleur. Cette étude a également permis de mettre l'accent sur certains facteurs qui peuvent moduler l'impact du stress thermique sur le potentiel de production des vaches laitières. En effet, la maîtrise de ces facteurs s'avère être un atout pour la réussite de l'élevage surtout dans un environnement climatique extrême comme celui de la Tunisie. Le choix de la race, la nature de l'alimentation et la nature du microenvironnement dans lequel les vaches laitières sont élevées, constituent des éléments clés que l'éleveur doit maîtriser pour limiter les pertes économiques auxquelles il est confronté pendant la saison estivale.

Les saisons estivales en Tunisie sont caractérisées par des températures ambiantes chaudes, qui lorsqu'elles sont associées à des degrés d'humidité élevés provoquent un état de stress thermique chez les vaches laitières. Le stress thermique résulte d'une combinaison de paramètres environnementaux dont la température ambiante, l'humidité relative de l'air, la vitesse du vent, le rayonnement solaire etc. (Kibler, 1964 ; McDowell et al., 1976 ; Hahn, 1999). De nombreux index ont été établis pour définir les zones d'inconfort où les animaux peuvent subir un stress thermique. C'est dans ce contexte précis, que le THI a été élaboré, ce dernier considérant uniquement la température ambiante et l'humidité relative. Néanmoins, il existe plusieurs équations et les différences majeures résident dans l'importance que donnent celles-ci à la contribution de l'humidité relative dans l'augmentation de la sensation d'inconfort thermique. De même, l'appréciation de ces indices demeure variable en fonction de la localisation géographique et du type du climat (Bohmanova et al., 2007). Pour évaluer le niveau du stress thermique chez les vaches laitières de notre étude, nous avons choisi l'équation développée par Kibler (1964) permettant de calculer les THI à partir des températures ambiantes et l'humidité relative obtenues grâce aux services météorologiques.

Nous avons également adopté la classification de Silanikove (2000) pour estimer l'intensité des réponses physiologiques, comportementales et métaboliques face au stress thermique en identifiant les différents paliers du THI. La formule de Kibler (1964) et la classification des THI de Silanikove (2000) ont été retenues, car elles étaient les mieux adaptées aux conditions climatiques méditerranéennes et permettaient au mieux de distinguer la variation de la production laitière surtout dans les classes de THI extrêmes (≥78).

En Tunisie, l'élevage bovin laitier est principalement concentré au nord, qui est caractérisé par un climat de type Méditerranéen. Les données météorologiques des cinq stations publiques pendant les cinq années d'étude (de 2009 à 2014) ont révélé que les périodes pendant lesquelles les animaux sont susceptibles de subir un stress thermique, se manifestent depuis le mois de juin et se prolongent jusqu'au mois de septembre. De même, l'été de l'année 2015 s'avère être extrêmement chaud avec des THI pouvant atteindre une valeur maximale de 90. Tous les paramètres environnementaux ont indiqué que les conditions climatiques pendant les saisons estivales, étaient suffisamment sévères pour provoquer un état de stress thermique. Son impact chez les vaches laitières, se traduit la plupart du temps par des réajustements physiologiques, alimentaires et métaboliques qui à leur tour, affectent significativement les performances de production. Selon Kadzere et al. (2002), cet effet est amplifié pour les vaches Holstein, qui ont généralement une activité métabolique plus intense et donc génèrent plus de chaleur, d'où l'intérêt de sélectionner les races bovines qui résistent au mieux à la chaleur.

## 1. Importance du choix de la race

Notre étude a mis en évidence une réponse significativement différente des vaches Tarentaise et Holstein à l'élévation du THI pendant la saison estivale. Lorsque le THI passe de 53,7 l'hiver à 75,4 l'été, les vaches Holstein perdent en moyenne six fois plus de lait que la Tarentaise qui, pour la même variation du THI, perd seulement 0,15 kg de lait par jour. Cette race semble aussi mieux résister au stress thermique extrême que la Holstein, notamment quand le THI est supérieur à 78, ce qui arrive très souvent en période estivale. En effet, la vache Tarentaise perd seulement 3,5 % de sa production initiale (11,4 kg pendant la période sans stress thermique) alors que la vache Holstein, pendant un stress thermique extrême, perd dès les THI plus faibles, environ 8,5 % de sa production initiale. Une telle chute de la production laitière peut induire des pertes économiques importantes

pour la filière laitière tunisienne dans la mesure où la race Holstein, comme précédemment évoqué, est la race dominante en Tunisie.

La race Holstein a manifestement tous les signes d'une adaptabilité réduite aux conditions climatiques tunisiennes ; la production laitière moyenne des 543 vaches Holstein étudiées n'a pas dépassé 15 kg/j, ce qui correspond à 55 % seulement de la production des vaches Holstein nées et élevées en France (Idele, 2015). Rekik et al. (2009) avaient également souligné l'adaptabilité réduite des vaches Holstein aux conditions tunisiennes. En effet, en comparant les performances de production des vaches Holstein nées et élevées en Tunisie et celles importées d'Europe et des Etats-Unis entre 1992 et 2004, ces auteurs ont trouvé que dans toutes les lactations et mis à part l'origine de la vache, la production laitière totale par lactation (305j) n'a pas dépassé 6500 kg, soit 2100 kg de lait par lactation en moins par rapport aux vaches nées et élevées aux Etats-Unis (Rekik et al., 2003 ; Miller et al., 2004 ; De Vliegher et al., 2005). Les performances productives de la vache Holstein en Tunisie sont généralement peu satisfaisantes, elles peuvent être liées en partie aux pratiques sanitaires, aux systèmes et aux bâtiments d'élevage qui ne respectent pas suffisamment le bien-être animal (Rekik et al., 2003 ; Hammami et al., 2008b ; Hammami et al., 2008) mais, selon Bouraoui et al., (2002), elles sont liées essentiellement aux conditions climatiques sévères et aux ressources fourragères très limités.

Nous avons attribué la meilleure adaptabilité des vaches Tarentaise aux fortes chaleurs, à un rapport surface / masse corporelle plus élevé chez les Tarentaise que les Holstein qui joue, vraisemblablement, un rôle très important dans la dissipation de la chaleur corporelle. Par ailleurs, en raison de leur production laitière inférieure, les vaches Tarentaise, ont également un rapport production laitière / poids métabolique que nous avons estimé inférieur de 10 à 20 % comparativement à celui des vaches Holstein. Il est tout aussi probable que les vaches Tarentaise adoptent des réponses homéostatiques différentes de celles des Holstein, qui à leur tour, provoquent des réponses physiologiques thermorégulatrices et comportementales distinctes, affectant ainsi, d'une manière discordante la réponse productive face à la chaleur. C'est dans le cadre du deuxième dispositif que nous avons cherché à mieux connaître ces mécanismes particuliers.

La composition du lait a également été sensible à l'élévation du THI qui a induit une baisse significative du TB, TP et de la teneur du lait en urée. Cette baisse a été identique

dans les deux races. Toutefois, l'origine de la variation de ces trois paramètres peut s'expliquer par plusieurs facteurs liés à l'alimentation. En effet, le TB du lait dépend essentiellement de la nature des rations distribuées ainsi que du stade physiologique de la vache laitière. De la même façon, l'urée du lait peut être influencée par l'équilibre énergie / azote de la ration et les taux de PDI et de PDIN, c'est-à-dire par la dégradation ruminale de la fraction protéique de la ration (Roseler et al., 1993). Néanmoins, nous ne disposons d'aucune donnée qui peut renseigner sur la qualité nutritionnelle et la composition chimique des aliments distribués dans les 21 exploitations étudiées. D'une façon générale, les rations distribuées par les éleveurs dans les régions d'étude, se caractérisent souvent par une ration de base riche en parois végétales, constituée la plupart du temps, de foin récolté tardivement ou de paille de qualité médiocre, d'une faible quantité de fourrages verts et d'une forte proportion d'aliments concentrés riches en amidon (Hammami et al., 2013b ; Majdoub-Mathlouhi et al., 2009). Ces rations constituent souvent un facteur favorable à un impact plus important du stress thermique sur le comportement alimentaire, digestif et métabolique des vaches laitières. Il est généralement connu que le stress thermique à la fois, perturbe directement (induit par l'hyperthermie) et indirectement (par le biais de la baisse de l'ingestion et les changements comportementaux), la disponibilité et l'orientation des nutriments, ce qui conduit incontestablement à des modifications métaboliques importantes au niveau de la glande mammaire (Bernabucci et al., 2010 ; Tian et al., 2015 ; Hao et al., 2016). Une étude plus approfondie et plus pointue sur cet aspect, permettrait de mieux comprendre les mécanismes par lesquels la qualité du lait est altérée en période de fortes chaleurs. C'est dans le second dispositif que nous allons essayer de clarifier, du moins d'un côté métabolique et physiologique, la variation de la composition du lait en réponse à la hausse de la température et de l'humidité relative.

Cette étude a également permis de conclure que les vaches Holstein ont initialement un CCS du lait plus élevé que les Tarentaise. En réponse au stress thermique, les deux races adoptent deux comportements totalement différents. En effet, quand le THI a dépassé 75 unités, le CCS des vaches Holstein a augmenté de 352 000 cellules/mL alors que celui des Tarentaise a chuté de 160 000 cellules/mL. Nous avons attribué cette différence au fait que les Tarentaise présentent en général des quartiers en meilleure santé, soulignant encore une fois leur bonne adaptabilité aux fortes chaleurs et aux environnements difficiles. Il est probable que les vaches Holstein aient souffert d'un dysfonctionnement du système

immunitaire, vraisemblablement induit par des THI extrêmes qui auraient augmenté l'incidence des mammites subcliniques. Dans le second dispositif nous avons retrouvé des résultats similaires quant à la variation du CCS du lait des vaches Tarentaise en réponse à l'augmentation de la température ambiante pendant la saison estivale. En effet, la valeur ajustée du CCS des vaches Tarentaise a chuté de 622 000 cellules/mL entre l'hiver et l'été. Par ailleurs nous n'avons observé aucune modification significative des paramètres immunologiques (lymphocytes, monocytes, eosinophiles, neutrophiles et les basophiles) qui permettrait d'expliquer ces résultats. Toutefois, la relation stress thermique-CCS-immunité est très complexe à interpréter dans une expérimentation en ferme où le suivi du statut bactériologique et sanitaire des mamelles est très difficile et où les mammites subcliniques ne sont pas toujours évidentes à repérer quelle que soit la saison. Une étude plus approfondie dans une chambre climatique où l'on peut suivre de très près l'évolution du CCS en fonction de l'élévation de la température, permettrait certainement d'expliquer pourquoi les Tarentaise ont réagi ainsi face à l'augmentation de la chaleur dans les deux dispositifs.

Les THI calculés pendant l'été 2015 ont indiqué que les vaches Tarentaise étaient soumises à des conditions de stress thermique extrême. Sous ces conditions climatiques sévères, les vaches laitières ont adopté certaines réponses homéostatiques qui se sont traduites par des fréquences respiratoires, fréquences cardiaques et températures rectales élevées mais aussi par une augmentation de la concentration du cortisol dans le lait. En effet, la fréquence respiratoire a littéralement doublé pendant la saison estivale, toutefois, malgré une hausse significative de la fréquence cardiaque et de la température rectale, ces paramètres restent très peu impactés et dans les normes (55-70 bat/min et 38,0-39,3°C respectivement ; McDowell et al., 1976 ; Robinson, 1999). D'une façon générale, l'augmentation du niveau des paramètres FR et FC, exprime une capacité de l'organisme à mettre en place des mécanismes physiologiques aidant à faire face au stress thermique, en revanche l'accroissement de la TR exprime une saturation de cette capacité, traduisant l'augmentation de la température centrale (dans des limites supportables physiologiquement). Il semble donc que les vaches Tarentaise ont une capacité adaptative élevée face à l'augmentation de la température ambiante, car ces dernières ont favorisé la dissipation de chaleur par voie évaporative via la respiration et l'halètement. En comparant nos résultats avec ceux d'autres études faites sur la race Holstein (Correa-Calderón et al., 2004 ; De Spiers et al., 2004 ; Espinosa et al., 2009), nous avons remarqué que l'amplitude

de variation de la fréquence cardiaque et de la température rectale est moins marquée chez la Tarentaise. Par exemple, Spiers et al. (2004) ont trouvé que sous des conditions de stress thermique (Ta= 29 °C et HR= 50 %), les vaches Holstein ont une TR qui augmente de 1,5 °C par rapport aux conditions de thermoneutralité, ce qui induit une baisse très marquée de la production laitière. Nous avons expliqué les réponses thermorégulatrices différentes entre les deux races, par le fait que les Tarentaise ont en général une évaporation cutanée et respiratoire plus efficace, mais aussi une couleur de robe plus claire minimisant la thermogenèse par radiation.

Pour conclure, les Tarentaise ont vraisemblablement une meilleure dissipation de chaleur que les Holstein grâce à : une évaporation respiratoire et cutanée plus accrue, un rapport surface / masse corporelle plus élevé et un rapport production laitière / poids métabolique plus faible, mais aussi à une couleur de robe plus claire qui permet d'absorber moins de rayonnements. Nos conclusions rejoignent celles de Muller et Botha (1994) qui ont étudié le stress thermique chez les vaches Jersey, comme nous, dans un climat méditerranéen. Ces auteurs attribuent la meilleure thermorésistance des vaches Jersey à leur petit format induisant un rapport surface / masse corporelle plus élevé. De plus, grâce à une couleur de robe plus claire, à un pelage plus court et moins dense, mais aussi à un dépôt de gras sous-cutané moindre, les Jersey ont pu maintenir des températures rectales quasiment constantes, sous un environnement chaud, ce qui semble être un signe d'une thermorésistance élevée (Ledger, 1959 ; Muller et Botha, 1994). Selon Bernabucci et al. (2010), les bovins ayant ces caractéristiques sont les plus résistants à la chaleur. Ce phénotype a été principalement caractérisé chez les *B. taurus* (bovins tropicaux) et, est généralement associé à un taux d'évaporation par transpiration cutanée plus élevée mais également à des températures rectales plus faibles (Mariasegaram et al., 2007). La Tarentaise est une race originaire des Alpes françaises qui est à priori bien adaptée à la marche et au froid et qui semble bien valoriser les surfaces herbagères. Néanmoins, cette race n'a jamais été sélectionnée pour faire face à la chaleur. Avec son petit format et sa couleur de robe plus claire, il semble que les Tarentaises et les Jersey ont des comportements à peu près similaires en réponse à l'élévation de la température ambiante. .

Notre étude constitue une première approche qui a permis de mettre en évidence l'importance du choix de la race pour faire face au changement climatique, surtout pour un

pays comme la Tunisie, où l'agriculture et l'élevage tiennent une place importante dans l'économie nationale. En termes de sélection, privilégier les races et les lignées de vaches laitières qui conviennent au mieux aux conditions climatiques chaudes constitue l'une des possibilités pour pallier les effets du stress thermique (West, 2003 ; Smith et al., 2013), d'où l'intérêt du développement de l'élevage de la Tarentaise en tant que race complémentaire à la race Holstein en Tunisie. Un certain nombre de contraintes techniques entravent cependant son développement. En effet, l'effectif de la race Tarentaise est très réduit (2 % unités femelles ; DGPA, 2016) à cause de la substitution partielle de la race locale et de toutes les autres races par la Holstein dans les années 1970 afin d'augmenter la production laitière. Selon le groupement des éleveurs de la race Tarentaise (GERT), il n'existe aucun schéma de sélection précis pour la race Tarentaise en Tunisie, car la base de sélection est très réduite. En outre, la Tarentaise, malgré ses nombreux atouts : rusticité, bonne aptitude à la marche, performances reproductives élevées (Coulon et D'hour 1994 ; Kress et al., 1995 ; Coulon et al., 2001), souffre d'une érosion génétique suite à l'utilisation massive de taureaux non testés et à la difficulté d'acquisition de géniteurs mâles purs indexés et de génisses de race pure sur le marché local tunisien.

## 2. Importance de l'alimentation sur la résistance au stress thermique

Dans les conditions climatiques extrêmes comme celles de la Tunisie, il est prioritaire de privilégier les races bovines, telles que la Tarentaise, qui semblent résister au mieux au stress thermique. Néanmoins, cette possibilité a une certaine limite dans la mesure où de façon générale, l'adaptation des vaches à la chaleur paraît d'autant plus élevée que le potentiel de production des vaches laitières est réduit. L'éleveur doit alors établir un compromis entre la résistance au stress thermique et le potentiel de production de la race choisie. Dans les conditions Tunisiennes, la race Tarentaise a en effet une production laitière relativement plus faible que celle de la race Holstein. Ce choix de la race constitue une solution sur le long terme, toutefois, il faut arriver à proposer aux éleveurs des alternatives efficaces à court terme et qui présentent l'avance d'être réversibles. L'alimentation est un autre levier d'adaptation dont disposent les éleveurs pour pallier les effets de la chaleur sur la productivité des vaches laitières. Il est généralement accepté que le stress thermique induit une baisse significative de l'ingestion, qui constitue un mécanisme thermorégulateur dont

dispose la vache laitière pour réduire la production de chaleur, due surtout aux fermentations ruminales (Huber, 1996). Cette baisse est principalement associée à une diminution de la disponibilité des nutriments due avant tout, à leur réorientation vers la fonction thermorégulatrice, ce qui paraît être la principale cause de la chute de la production laitière en conditions de stress thermique (Fuquay, 1981 ; Beede et Collier, 1986 ; West, 2003). L'hyperthermie induit également une élévation des besoins d'entretien (≥ 30 % ; Morrison, 1983 ; Huber, 1996 ; Fox et Tylutki, 1998), car l'organisme utilise à un rythme plus soutenu l'énergie, dont la disponibilité est désormais réduite, pour rétablir l'homéothermie. Par conséquent, les vaches laitières présentent un bilan énergétique moindre qui est susceptible de limiter la synthèse du lait en période de fortes chaleurs (Moore et al., 2005). De ce fait, améliorer la ration en termes d'équilibre nutritionnel et d'apports énergétiques surtout, s'avère être une bonne stratégie pour pallier les effets du stress thermique sur la disponibilité des nutriments et de l'énergie pour la synthèse du lait.

Le stress thermique, chez les vaches Tarentaise, a induit une série de réponses thermorégulatrices, physiologiques et métaboliques qui devrait, selon plusieurs auteurs (Rhoads et al., 2009 ; Shwartz et al., 2009), plus ou moins affecter la production laitière pendant la saison estivale. Notre étude a mis en évidence qu'en période de fortes chaleurs, la distribution d'une ration plus équilibrée avec un apport plus élevé en termes d'énergie (+8,6 %), en protéines dégradables (+12,1 % de PDI), et moins de cellulose (-21 % d'ADF) a permis non seulement de pallier les effets indirects du stress thermique sur la productivité des vaches laitières via la diminution de l'ingestion, mais également d'augmenter la quantité de lait produite. En effet, les vaches laitières à un niveau d'ingestion quasiment similaire, ont une production laitière supérieure de 4,5 kg/j, alors que tous les paramètres physiologiques indiquaient que les Tarentaise ont bel et bien souffert d'un stress thermique. L'augmentation de la concentration énergétique de la ration, a vraisemblablement réduit la production de chaleur d'origine fermentaire et diminué l'encombrement du rumen, ce qui expliquerait en grande partie le maintien de la prise alimentaire. En effet, il est fort probable qu'une telle amélioration soit responsable de l'accroissement du rapport propionate / acétate dans le rumen, le propionate entraînant à son tour une moindre production de chaleur que l'acétate (Oldick et Firkins 1997). Par ailleurs, nous avons pu démontrer qu'une ration alimentaire qui contient moins de fibres est susceptible d'améliorer l'ingestion, par la diminution de l'encombrement. En effet, la quantité d'extra-chaleur d'origine digestive qui

provient surtout des fermentations dans le rumen, est accrue par une proportion élevée de fibre dans le régime alimentaire. Les résultats rapportés par Cumins (1992) suggèrent aussi que la MSI des vaches laitières est plus élevée en période de stress thermique grâce à la distribution de rations avec des teneurs en fibres cellulosiques moindres (14 % vs 20 % d'ADF), toutefois, la production laitière n'a pas été améliorée. L'amélioration de la ration en termes de protéines dégradables a également apporté plus d'azote fermentescible, qui aurait accéléré les fermentations dans le rumen et augmenté par la suite la consommation alimentaire (Pearson et Archibald, 1990 ; Ahmed et Abdellatif, 1995). Nos observations concordent bien avec celles de West (1999) qui signale que l'augmentation de l'apport protéique a permis d'améliorer la production laitière sous un environnement chaud.

Lorsque nous avons calculé le bilan énergétique des vaches laitières en $P_1$ et $P_2$, nous avons remarqué que les vaches soumises aux conditions du stress thermique ont certainement un bilan énergétique moindre, mais pas négatif. Par ailleurs, les modifications du métabolisme glucidique et lipidique corroborent ces calculs. En effet, nous avons observé une réduction significative de la concentration plasmatique du glucose et du ß-hydroxybutyrate plasmatique, néanmoins, la concentration des AGNE plasmatiques n'a pas été modifiée. La diminution de la concentration du glucose plasmatique laisse penser qu'il y a eu une utilisation accrue de ce dernier par les tissus périphériques. En effet, il est tout à fait logique que pour maintenir la production laitière à un niveau élevé pendant le stress thermique, la glande mammaire ait nécessité plus de glucose pour synthétiser le lactose du lait. D'autres essais ont souligné que l'utilisation extra-mammaire accrue du glucose lors d'un stress thermique, permet d'expliquer en grande partie le déclin de production laitière dans ces conditions environnementales difficiles (Baumgard et al., 2011 ; Baumgard et Rhoads, 2013). Selon Rhoads et al. (2009), la sécrétion du lactose (premier régulateur osmotique de la production laitière), a chuté d'environ 370 g chez les vaches thermiquement stressés, deux molécules de glucose étant le substrat de synthèse du lactose. Pareillement, la diminution de la concentration du ß-hydroxybutyrate plasmatique révèle que l'approvisionnement en glucose n'est plus suffisant pour supporter la production laitière et qu'il y'a eu une mobilisation excessive des protéines. Nous avons aussi remarqué qu'en état de stress thermique, les vaches Tarentaise ont montré un besoin préférentiel pour oxyder le glucose et donc minimiser la mobilisation du tissu adipeux (Baumgard et al., 2006). Nous pouvons donc conclure que grâce à une alimentation équilibrée qui a permis de maintenir la

consommation alimentaire, le stress thermique chez les vaches Tarentaise n'a pas engendré une mobilisation des réserves lipidiques, malgré l'élévation du cortisol, considéré comme un signal catabolique qui déclenche la lipolyse des tissus adipeux et donc l'élévation des AGNE plasmatiques (Beede et Collier, 1986).

Nous avons observé entre l'hiver et l'été une baisse importante du TP, une augmentation de l'urée mais pas de variation du TB. En effet, le TP du lait a significativement chuté de 2,3 g/kg entre l'hiver et l'été, malgré l'amélioration de la ration. Nous pouvons supposer que la réduction des protéines du lait est directement induite par le stress thermique (et non pas à cause de la baisse de l'ingestion classiquement observée en période de stress thermique). Il est fort probable que le stress thermique ait affecté la synthèse de l'α- et la ß-caséine du lait (Bernabucci et al., 2002) via la réorientation de l'utilisation des acides aminés entrainant leur moindre disponibilité au niveau de la glande mammaire. En outre, nous avons auparavant démontré que pour soutenir la production laitière en période de fortes chaleurs, il ya eu une mobilisation excessive des protéines due à un apport glucidique insuffisant. La baisse du TP du lait confirme donc que les vaches laitières présentaient un bilan énergétique moins bon pendant l'été, vraisemblablement pour supporter la production laitière. A cet effet s'ajoute celui de la durée du jour. En effet, plusieurs travaux ont montré qu'une photopériode expérimentale longue (15 à 16 h par jour) augmentait la production laitière et diminuait, par effet de dilution, la richesse du lait en matière utile telle que les matières protéiques (Phillips et Schofield, 1989 ; Coulon et al., 1991). La teneur en urée du lait l'été, a significativement augmenté de 26,5 mg/L par rapport à l'hiver. Nous pouvons attribuer cette augmentation à la distribution d'une ration mieux équilibrée avec un apport supplémentaire en protéines. En plus, l'augmentation de la consommation des fourrages, apportant ainsi assez de fibres pour soutenir la fermentation ruminale, a permis de maintenir un TB du lait quasiment constant entre l'hiver et l'été.

Pour conclure, la distribution d'une ration améliorée pendant la saison estivale, a manifestement permis, non seulement de maintenir la consommation alimentaire des vaches laitières, mais aussi d'augmenter leur production laitière, malgré un certain nombre de modifications physiologiques et métaboliques qui témoignent d'un stress thermique. Néanmoins, pallier les effets du stress thermique sur l'ingestion et la production des vaches laitières via une ration alimentaire plus énergétique, moins cellulosique et apportant plus de

protéines dégradables dans le rumen, a certainement des limites qu'il nous semble intéressant de souligner. L'augmentation de la concentration énergétique de la ration est certes efficace en raison d'une diminution de la production de chaleur d'origine fermentaire, mais le risque d'acidose (aucun signe d'acidose dans notre cas) avec ce type de ration n'est toutefois pas négligeable et l'apport de substances tampons peut devenir indispensable (Sanchez etal., 1994 ; Oldick et Firkins, 1997), d'autant plus que l'augmentation de la fréquence respiratoire et la tendance accrue des vaches à la salivation en période de stress thermique, diminuent la disponibilité des bicarbonates comme tampons naturels du rumen. Par ailleurs, l'apport en fibre devrait plutôt être majoré quelque peu, pour compenser le risque plus élevé d'acidose et diminuer les risques de chute du taux butyreux du lait. De ce fait, l'utilisation de fourrages de qualité est d'autant plus importante que leur appétence et leur digestibilité élevées permettent de maximiser la consommation d'énergie par les animaux. Il faut aussi signaler que d'une manière générale, la modification du niveau et de la nature de l'apport azoté, a des effets contradictoires. En effet, les rations ne doivent pas contenir plus que 18 % de protéines, du fait qu'un surplus requiert davantage d'énergie pour excréter l'excès de l'azote en urée (West, 1999). Danfaer et al. (1980) ont rapporté que lorsque la MAT de la ration passe de 19 à 23 %, la production laitière baisse de 24,5 à 23,1 kg/j. En outre, la teneur en matières azotées totales ne devrait pas augmenter, mais il est souhaitable que la proportion relative des protéines non fermentescibles dans le rumen soit plus élevée.

## 3. Importance de la nature du microenvironnement de l'étable

Notre étude a permis de mettre l'accent sur l'importance du choix de la race, ainsi que l'apport d'une alimentation équilibrée pour pallier les effets du stress thermique sur le bien-être et la production laitière, toutefois, nous avons aussi démontré que certains paramètres liés aux caractéristiques des bâtiments d'élevage peuvent dramatiquement influer sur le microenvironnement des étables et par conséquent, les performances des animaux. Il est donc primordial de comprendre les différents risques associés aux bâtiments d'élevage qui peuvent accentuer les conséquences négatives du stress thermique et dont l'éleveur doit tenir compte, surtout dans des conditions environnementales difficiles comme celles de la Tunisie. Beaucoup de paramètres ont été rapportés dans la littérature, outre les conditions

climatiques extérieures, certains facteurs comme la densité et le nombre de vaches, la nature et la surface des structures ombragées, la nature du couchage, la nature et la disponibilité des systèmes de refroidissement, semblent avoir une influence directe sur le microenvironnement des exploitations laitières (Collier et al., 2006 ; Schüller et al., 2013). Par ailleurs, les mesures de températures ambiantes et d'humidité relative à l'intérieur de l'étable, faites dans plusieurs essais (Schüller et al., 2013 ; Shock et al., 2016) laissent présager que le microenvironnement diffère, dans une certaine mesure, des conditions climatiques extérieures. Notre étude a permis de cibler les points les plus importants tels que le type de toiture et la nature des bâtiments d'élevage, néanmoins, certains facteurs confondus peuvent compliquer l'interprétation de nos résultats.

Lors des différentes visites effectuées dans les 19 exploitations de l'étude, nous nous sommes rendu compte que la plupart des bâtiments d'élevage sont traditionnels, les étables étant de construction simple, sont soit complètement ouvertes (étables à front ouvert inclues), soit complètement fermées. Par ailleurs, faute de moyens financiers, les systèmes de refroidissement, tels que les ventilateurs et les brumisateurs, sont quasiment absents des exploitations laitières, malgré un besoin réel, puisque le stress thermique en Tunisie, se manifeste depuis le mois de juin et se prolonge jusqu'au mois de septembre. C'est pourquoi nous avons reporté notre intérêt, uniquement, sur le type de bâtiment et de stabulation, la nature de la surface de couchage et de la toiture, ainsi que la disponibilité de l'eau et de l'ombre dans les aires d'exercice.

En calculant les différences de production laitière entre l'hiver et l'été (Δ production laitière), nous avons démontré que les éleveurs qui perdent le plus de lait en été, sont ceux dont les bâtiments d'élevage sont fermés, et ceux qui sont couverts d'une toiture métallique. Nous avons attribué ces résultats au fait que les bâtiments fermés contiennent des éléments de structure additionnels comme les poteaux et les séparateurs, qui peuvent faire obstacle à la circulation de l'air, augmenter l'humidité relative ainsi que la chaleur radiante à l'intérieur de l'étable (Shoshani et Hetzroni, 2013). Pareillement, les toitures métalliques deviennent généralement plus chaudes l'été, génèrent donc plus de chaleur et augmentent automatiquement la thermogenèse par radiation. Toutefois, de nombreux orifices d'aération sur la toiture métallique peuvent améliorer les échanges d'air, puisque la réduction des surfaces d'exposition à la lumière sur la toiture empêche le rayonnement direct du soleil

dans l'étable. Nous avons aussi remarqué que pendant l'été, 40 % des éleveurs donnent un accès libre aux aires d'exercices, qui ne disposaient pas toutes, d'un point d'eau et de structures ombragées. Ces éleveurs signalent aussi que lorsque les températures extérieures sont très élevées, les vaches laitières sont retenues à l'intérieur de l'étable, néanmoins, aucun critère explicite pour la prise d'une telle décision n'a été fourni. En général, pendant les heures les plus chaudes de la journée, les vaches laitières recherchent les zones d'ombre où l'air circule, de ce fait, une structure ombragée placée dans l'aire d'exercice, permettant aux animaux de se reposer à l'ombre, limite la baisse de la consommation alimentaire, l'augmentation des quantités d'eau bue et la baisse de la production laitière en période de stress thermique.

Nous avons également cherché à comprendre le lien entre le type de stabulation et la baisse de la production l'été, toutefois, vu que nous n'avions aucune information qui renseigne sur la densité des vaches à l'intérieur des bâtiments, aucune corrélation significative entre ces deux paramètres n'a été observée. En effet, les bovins laitiers adultes, dégagent de la chaleur (parfois appelée chaleur sensible) qui contribue à l'augmentation de la température ambiante à l'intérieur de l'étable. Par leur respiration, ils exhalent également de la vapeur d'eau qui se répand dans l'ensemble du bâtiment. S'ajoute à cela l'eau qui s'évapore des abreuvoirs et des caniveaux pendant les heures les plus chaudes de la journée. Ces effets sont amplifiés dans les systèmes de stabulation entravée avec une densité animale plus élevée (Yeck et Stewart, 1959). D'autre part, nous n'avons pas réussi à relier la nature du couchage avec la baisse de la production laitière l'été. Néanmoins, certains matériaux utilisés dans la surface du couchage (béton, sable, tapis en caoutchouc) peuvent considérablement évacuer la chaleur depuis le corps de l'animal vers cette surface, les différences de température entre le corps de l'animal et la surface de repos étant compensée par conduction thermique (Kramer, 2001). En raison de leur coût élevé, ces matériaux sont complètement absents des exploitations laitières visitées, la surface de couchage était la plupart du temps soit en béton nu soit en terre avec une couche de paille comme litière, variable d'une exploitation à une autre. Il serait donc très un intéressant de mettre en place un dispositif expérimental permettant de tester l'effet de la nature des matériaux utilisés dans la surface de couchage sur les performances productives des vaches laitières pendant la saison estivale.

Pour conclure, les étables en Tunisie sont généralement de construction simple, de par leur flexibilité (adaptable au nombre d'animaux) et un faible coût d'entretien, cependant, des bâtiments fermés et des toitures métalliques accentuent la sensation d'inconfort thermique, ce qui se répercute négativement sur le bien-être et les performances productives des vaches laitières. Dans les climats chauds, il est primordial que les éleveurs, lors de la planification et la construction des bâtiments d'élevage, se soucient de créer un environnement optimal qui respecte le bien-être des vaches laitières, afin qu'elles puissent maximiser leur production laitière. En effet, la chaleur produite par les vaches laitières est d'autant plus importante que leur potentiel productif s'accroît, de plus, dans des conditions de stress thermique, elles accumulent davantage de chaleur à partir de l'environnement, ce qui induit une baisse des performances. Les étables sont construites pour perdurer de 15 à 30 ans, de ce fait, lors de leur construction, les éleveurs doivent tenir compte du changement climatique et de son impact sur les vaches laitières, puisque comme déjà annoncé, la température ambiante augmentera de 1,4 à 5,8 °C d'ici 2100 (IPCC, 2007). Les mesures d'atténuation du stress thermique doivent être prises pour permettre à la vache de maximiser sa capacité de dissipation de la chaleur. Les systèmes de refroidissement tels que les ventilateurs et les brumisateurs favorisent certes le refroidissement cutané des vaches laitières et peuvent aussi améliorer le niveau d'ingestion et les performances productives, toutefois, ces procédés semblent onéreux et difficiles à utiliser sur prairie et parcours naturels. Par contre, offrir de l'ombre (naturelle ou artificielle) aux animaux semble être une bonne stratégie pour apporter une modification physique de l'environnement à l'intérieur de l'étable, d'autant plus que cette solution parait la moins coûteuse. De même, les abris ombragés sont d'autant plus efficaces qu'ils réfléchissent la lumière solaire et que leur dimensions sont calculées pour permettre une ventilation optimale.

# Conclusions générales

Le stress de chaleur que subissent les ruminants et spécialement les vaches laitières durant la saison estivale, se concrétise par la baisse des performances productive et reproductive. Dans le futur, la sévérité du stress thermique sera d'autant plus problématique que le réchauffement climatique s'accentue et que la sélection génétique pour la production laitière continue sans réelle prise en considération de l'importance grandissante des capacités adaptatives des animaux vis-à-vis de la chaleur. Nous avons justifié l'intérêt général de cette étude par le fait de contribuer à la caractérisation du degré d'adaptabilité des vaches Tarentaise aux conditions climatiques difficiles qui diffèrent certes de celles des Alpes françaises. Notre étude a permis de se rendre compte qu'il est primordial d'approfondir les connaissances non seulement sur la relation qui s'établit entre un animal et son environnement mais aussi sur les mécanismes physiologiques thermorégulateurs mis en jeu par l'organisme dans les conditions environnementales extrêmes. Ces connaissances permettent la mise en place de stratégies qui visent à améliorer le bien-être animal et le maintien des performances que ce soit sur le court ou le long terme.

Sur le court terme les progrès techniques permettant la modification physique du microenvironnement à l'intérieur des exploitations laitières ainsi que les améliorations d'ordre nutritionnel sont susceptibles, de réduire l'impact négatif du stress thermique pendant les saisons chaudes. Ainsi, il est impératif, quand cela est possible, de réduire les conditions de stress thermique en minimisant l'absorption des rayonnements solaires et en maximisant la dissipation de chaleur par voie évaporative cutanée. A l'issu de ce travail de thèse, les toitures métalliques et les bâtiments d'élevages fermés augmentent davantage la température à l'intérieur des étables, qui couplée à une humidité relative élevé ont engendré une baisse significative de la production laitière chez les éleveurs ayant ce type de construction. Les brumisateurs et les ventilateurs constituent des moyens de lutte efficaces mais sont généralement absents des exploitations enquêtées de par leur coûts élevés, d'où l'intérêt d'aménager des aires de repos relativement fraîches et bien aérées. D'autre part, les vaches laitières doivent être capables de réduire leur thermogenèse interne en limitant la production de chaleur liée aux fermentations ruminales. Par conséquent, la ration doit être plus concentrée en énergie et en protéines, mais aussi moins cellulosiques en apportant

moins de sources cellulosiques de faible valeurs nutritives. Dans ce contexte précis, notre étude a mis en évidence qu'une ration estivale améliorée en termes d'équilibre nutritionnel et d'apports énergétiques surtout, a permis non seulement de stopper les effets classiques du stress thermique, notamment la baisse de la consommation alimentaire, mais aussi de les contourner par l'augmentation de la production laitière. Cependant, cette stratégie a certainement un coût qu'il serait intéressant de calculer et que l'éleveur doit pouvoir compenser si le lait produit est correctement valorisé.

Sur le long terme, l'identification d'animaux adaptés à la chaleur au sein des races bovines hautes productrices peut s'avérer très utile, surtout si ces animaux seront capables de survivre et de maintenir leur niveau de production dans des conditions de stress thermique. En outre, il existe des différences génétiques entre les races bovines qui permettent d'expliquer une thermorésistance meilleure. La démarche expérimentale choisie dans notre étude, a permis d'affirmer que la race Tarentaise est bien acclimatée aux conditions climatiques méditerranéennes de la Tunisie, et même qu'elle est mieux adaptée que la race Holstein. La meilleure adaptabilité de la race Tarentaise à la chaleur estivale semble être liée, entre autre, à une évaporation respiratoire et cutanée élevée et à une couleur de robe plus claire qui permet d'absorber moins de rayonnements. Dans le futur, l'identification et l'utilisation des gènes responsables de la thermorésistance comme marqueurs dans le schéma de la sélection génétique permettrait certainement de faire face à un danger réel : le réchauffement climatique.

# Références bibliographiques

## *A*


Abeni, F., Calamari, L., Stefanini L., 2007. Metabolic conditions of lactating Friesian cows during the hot season in the Po valley. 1. Blood indicators of heat stress. Int. J. Biometeorol. 52: 87-96.

Agricultural Research Council, 1980. Nutrient Requirements of Ruminant Livestock. Commonwealth Agricultural Bureaux, Farnham Royal.

Ahmed, M.M.M., Abdellatif A.M., 1995. Effect of dietary protein level on thermoregulation, digestion and water economy in desert sheep. Small Rum. Res.18: 51-56.

Albright, J.L., Alliston, C.W.,1972. Effetcs of varying the environment upon performance of dairy cattle. J.Anim. Sci. 32: 566-577.

Allen, T.E., 1962. Responses of Zebu, Jersey and Zebu and Jersey crossbred heifers to rising temperatrures with particular reference to sweating. Aust. J. Agric. Res. 13: 165-179.

Anderson, M., 1985. Effects of drinking water temperature on water intake and milk yield of tied up dairy cows. Livest. Prod. Sci. 12: 329-388.

Anderson, J.F., Bates, D.W.,1984. Environmental-Management in Animal Agriculture - Curtis,SE. Journal of the American Veterinary Medical Association 184(5): 592-592.

Angus, D.J., Febbraio, M.A, Lasini, D., Hargreaves, M., 2001. Effect of carbohydrate ingestion on glucose kinetics during exercise in the heat. J. Appl. Physiol. 90: 601-605.

Arechiga, C.F., Staples, C.R., Mc Dowell, L.R., Hansen, P.J., 1998a. Effects of timed insemination and supplemental beta-carotene on reproduction and milk yield of dairy cows under heat stress. J. Dairy Sci. 81: 390-402.

Arechiga, C.F., Vazquez-Flores, S., Hernandez-Ceron, J., Porras A., Mc Dowell, L.R., Hansen, P.J., 1998b. Effect of injection of ß-carotene or vitamin E and selenium on fertility of lactating dairy cows. Theriogenology 50: 65-76.

Armstrong, D.V., 1994. Heat stress interaction with shade and cooling. J. Dairy Sci. 77:2044-2050.

Armstrong, D.G., Blaxter, K.L., 1957. The heat increment of steam-volatile fatty acids in fasting sheep. Br. J. Nutr. 11: 247–273.

Armstrong, D.V., Hillman., P. E., 1998. Evaluation ob Brown Swiss, Holsteins and Jerseys under hot arides climate for dairy production. In: Proceedings of the Southwest Nutrition and Management conference. University of Arizona, Tuscon, Ariz, pp: 153-165.

Arunvipas, P., Van Leeuwen, J.A., Dohoo, I.R., Keefe, G.P., 2004. Bulk tank milk urea nitrogen: seasonal patterns and relationship to individual cow milk urea nitrogen values. Can. J. Vet. Res. 68: 169-174.

Attebery, J.T., Johnson, H.D., 1969. Effects of environmental temperature, controlled feeding and fasting on rumen motility. J. Anim. Sci. 29: 734-737.

Aufrère, J., Baumont, R., Delaby, L., Pecatte, J.R., Andrieu, J., Andrieu, J.P., Dulphy J.P., 2007. Prévision de la digestibilité des fourrages par la méthode pepsine-cellulase. Le point sur les équations proposées. In : Alimentation des ruminants. Agabriel J. (Ed). Dossier, INRA Prod. Anim. 20: 129-136

## ***B***

Baeta, F.C., Meador, N.F., Shanklin, M.D., Johnson, H.D., 1987. Equivalent temperature index at temperatures above the thermoneutral for lactating cows. Paper No. 87-4015. Summer Meeting of the American Society of Agricultural Engineers, Baltimore, Maryland, 28 June–1 July 1987. St Joseph, ASAE.

Baker, M.A., 1989. Effect of dehydration and rehydration on thermoregulatory sweating in goats. J. Physiol. Lond. 417: 421–435.

Barash, H., Silanikove, N., Shamay, A., Ezra, E., 2001. Interrelationships among ambient temperature, day length, and milk yield in dairy cows under a Mediterranean climate. J. Dairy Sci. 84:2314-2320.

Basirico, L., Bernabucci, U., Morera, P., Lacetera, N., Nardone, A., 2009. Gene expression and protein secretion of apolipoprotein B100 (ApoB100) in transition dairy cows under hot or thermoneutral environments. Ital. J. Anim. Sci. 8(2): 592-594.

Bauman, D.E, Peel, C.J, Steinhour, W.D, Reynolds, P.J, Tyrrell, H.F, Brown A.C, et al. 1988. Effect of bovine somatotropin on metabolism of lactating dairy cows: influence on rates of irreversible loss and oxidation of glucose and nonesterified fatty acids. J. Nutr. 118:1031-1040.

Baumgard, L.H., Odens, L.J., Kay, J.K., Rhoads, R.P., VanBaale, M.J., Collier, R.J., 2006. Does negative energy balance (NEBAL) limit milk synthesis in early lactation? Proc. Southwest Nutr. Conf. 181-187.

Baumgard, L.H., Rhoads, R.P., 2007. The effects of hyperthermia on nutrient partitioning. Pages 93‑104 in 69th Proc. Cornell Nutr. Conf. Cornell University, Ithaca, NY.

Baumgard, L.H., Wheelock, J.B., Sanders, S.R., Moore S.R., Green, H.B., Waldron, M.R., et al., 2011. Post absorptive carbohydrate adaptations to heat stress and monensin supplementation in lactating Holstein cows. J. Dairy Sci. 94: 5620-5633.

Baumgard, L.H., Rhoads, R.P., 2013. Effects of heat stress on post absorptive metabolism and energetics. Annu Rev Anim Biosci.; 1: 311-337.

Beauchemin, K.A., Yang, W.Z., Morgavi, D.P., Ghorbani, G.R., Kautz, W., Leedle J.A., 2003. Effects of bacterial direct-fed microbials and yeast on site and extent of digestion, blood chemistry, and subclinical ruminal acidosis in feedlot cattle. J. Dairy Sci. 81: 1628-1640.

Beede, D.K., Collier, R.J., 1986. Potential nutritional strategies for intensively managed cattle during thermal stress. J. Anim. Sci. 62:543–554.

Berbigier, P., 1988a. Aspects théoriques des relations énergétiques entre l'animal et l'environnement climatique. In: Bioclimatologie des ruminants domestiques en zone tropicale. INRA, Paris, 19-56.

Berbigier, P., 1988b. Régulation des ruminants domestiques en climat tropical. Bioclimatologie des ruminants domestiques en Zone tropicale. INRA, Paris, 83-123.

Berman, A., Folman, Y.M., Kaim, M., Mamen. Z., Herz, D., Wolfenson, A., Graber, Y., 1985. Upper critical temperatures and forced ventilation effects for high-yielding dairy cows in a tropical climate. J. Dairy Sci. 68:488–495.

Berman, A.J., 2005. Estimates of heat stress relief needs for Holstein dairy cows. J. Anim. Sci. 83(6): 1377-1384.

Berman, A., Horovitz, T., 2012. Radiant heat loss, an unexploited path for heat stress reduction in shaded cattle. J. Dairy Sci. 95:3021-3031.

Bernabucci, U., Lacetera N., Ronchi, B., Nardone, A., 2002. Effects of the hot season on milk protein fractions in Holstein cows. Anim. Res. 51:25-33.

Bernabucci, U., Lacetera, N., Baumgard, L.H., Rhoads, R.P., Ronchi, B., Nardone, A., 2010. Metabolic and hormonal acclimation to heat stress in domestic ruminants. Animal 4: 1167-1183.

Bernabucci, U., Biffani, S., Buggiotti, L., Vitali, A., Lacetera, N., Nardone, A., 2014. The effects of heat stress in Italian Holstein dairy cattle. J. Dairy Sci. 97:471-486.

Berry, I.L, Shanklin, M.D., Johnson, H.D., 1964. Dairy shelter design based on milk production decline as affected by temperature and humidity. Trans. Am. Soc. Ag. Eng. 7:329-331.

Besnard, C., 1985. Météorologie et reproduction dans l'espèce bovine. Thèse de doctorat vétérinaire, Faculté de Médecine, Créteil, 161p.

Bianca, W., 1959. Acclimatization of calves to hot, humid environment. J. Agric. Sci. 52, 305–312.

Bianca, W., Findlay, J.D., 1962. The effect of thermally induced hyperpnoea on the acid-base status of theblood of calves. Res. Vet. Sci. 3:38-49.

Bianca, W., 1965. Reviews of the progress in dairy science. Cattle in hot environment. J. Dairy Res. 32:291–345.

Bligh, J.A., 1985. Temperature regulation. Chapter 8 in "Stress Physiology in Livestock Volume I Basic Principles". Ed M.K. Yousef. CRC Press USA. pp75-96.

Blackshaw, J.K., Blackshaw, A.W., 1994. Heat stress in cattle and the effect of shade on production and behaviour: A review. Aust. J. Exp. Agric. 34:285–295.

Blaxter, K.L., Wainman, F.W., 1961. Environmental temperature and the energy metabolism and heat emission of steers. J. Agric. Sci. (Camb.) 46: 81–90

Blazquez, N.B., Long, S.E., Mayhew, T.M., Perry, G.C., Prescott, N.J., Wathes, C.M., 1994. Rate of discharge and morphology of sweat glands in the perineal, lumbodorsal and scrotal skin of cattle. Res. Vet. Sci. 57: 277-284.

Bodoh, G.W., Battista, W.J., Schultze, L.H., Johnston, R.P., 1976. Variation in somatic cell counts in dairy herd improvement milk samples. J. Dairy Sci. 59: 1119-1123.

Bohmanova, J., Misztal, I., Tsuruta, S., Norman, H.D., Lawlor, T.J., 2005. National genetic evaluation of milk yield for heat tolerance of United States Holsteins. Interbull. Bulletin 33: 160–162.

Bohmanova, J., Misztal, I., Cole, J.B., 2007. Temperature-Humidity Indices as Indicators of Milk Production Losses due to Heat stress. J. Dairy. Sci. 90:1947-1956.

Boissy, A., 1990. Les réactions émotives chez les bovins domestiques femelles (*Bos Taurus* L.). Quantification et variation sous l'influence des facteurs environnementaux et hormonaux. Thèse de doctorat de l'université de Paris XIII, France.

Bond, T.E., Kelly, C.F., 1955. The globe thermometer in agricultural research. Agric. Eng. 36: 251–260.

Bond, T.E., Kelly, C.F., Garrett, W.N., Hahn, G.L., 1961. Livestock shades. Calif. Agri. 15 (7): 7.

Bond J., Mc Dowell, R.E., 1972. Reproductive performance and physiological responses of beef females as affected by a prolonged high environmental temperature. J. Anim. Sci. 35: 820-829.

Bonnefoy, J.M., Noordhuizen, J., 2011. Maîtriser le stress thermique chez la vache laitière. Bulletin des GTV.60: 77-85.

Bonnet, J.N., 2007. Appui conseil d'un expert de l'institut de l'élevage à la conception d'un projet de la race Tarentaise en Tunisie. Synthèse des activités 2006.

Bossuyt, R., Moermans, R.J., Waes, G., Naudts, M., 1976. The fluctuations of the cell content of milk and the optimum sampling frequency for the cell count. Milchwissenschaft 31: 4-8.

Bouraoui, R., Lahmar, M., Majdoub, A., Djemali, M., Belyea R., 2002.The relationship of temperature-humidity index with milk production of dairy cows in a Mediterranean climate. Anim. Res. 51:479-491.

Bouraoui, R., Ben Salem, M., Rekik, B., Jbira, H., 2013. Impact du stress thermique sur les performances des vaches laitières de race Holstein au centre de la Tunisie. Livestock Research for Rural Development 25 (4).

Breteau, G., 2010. Etudes des paramètres d'ambiance pour le bien être des bovins lors du transport de longue durée. Thèse pour l'obtention du grade de docteur vétérinaire. Ecole nationale vétérinaire de Toulouse. 104p.

Brody, S., 1945. Bioenergetics and Growth: With Special Reference to the Efficiency Complex in Domestic Animals. Reinhold Publishing Corporation, Waverly Press, Baltimore, MD.

Broom, D.M., Johnson, K.G., 1993: Stress and Animal Welfare. Chapman and Hall, London

Buffington, D.E., Collier, R.J., Canton, G.H., 1983. Shade management systems to reduce heat stress for cows in hot humid climates. Trans. ASAE 26: 1798-1802.

Bunting, L.D., Sticker, L.S., Wozniak, P.J., 1992. Effect of ruminal escape protein and fat on nitrogen utilization in lambs exposed to elevated ambient temperatures. J.Anim. Sci. 70: 1518-1525.

Burton, J.L., Ronald, J. Erskine. 2003. Immunity and mastitis: Some new ideas for an old disease. Vet. Clin. Food Anim. 19:1–45.

Burton, J.L., 2007. Stress, Immunity, and Mammary Health. Presentation at California Animal Nutrition Conference Pre-Conference Technical Symposium; Fresno, CA.

## ***C***

Calegari, F., Calamari, L., Frazzi, E., 2012. Misting and fan cooling of the rest area in dairy barn. Int. J. Biometeorol. 56:287-295.

Campisi, J., Leem, T.H., Fleshner, M., 2003. Stress-induced extracellular Hsp-72 is a functionally significant danger signal to the immune system. Cell Stress Chaperones 8:272–286.

Cannon, W.B., 1939.The Wisdom of the Body. New York, WW Norton.

Carlsson, J., Pehrson, B., 1993. The relationship between seasonal variations in the concentration of urea in bulk milk and the production and fertility of dairy herds. J. Vet. Med. A. 40:205-212.

Carlsson, J., Bergstrom, J., Pehrson, B., 1995. Variations with breed, age, season, yield, stage of lactation, and herd in the concentrayion of urea in bulk milk and individual cow's milk. Acta Vet. Scand. 36:245-254.

Cap Elevage, 2008. Régime maïs des vaches laitières ; à quoi sert le taux d'urée du lait. 22, 18-20.

Capuco, A.V., Wood, D.L., Baldwin, R., McLeod, K., Paape, M.J., 2001. Mammary cell number, proliferation, and apoptosis during a bovine lactation: relation to milk production and effect of bST. J. Dairy. Sci. 84: 2177-2187.

Cena, K., Monteith, K., 1975. Transfer processes in animal coats. 1. Radiative transfer. Proc. R. Soc. Lond. B 188, 377.

Chen, X.C., Fahy, A.L., Green, A.S., Anderson, M.J., Rhoads, R.P., Limesand, S.W., 2010. β2-Adrenergic receptor desensitization in perirenal adipose tissue in fetuses and lambs with placental insufficiency-induced intrauterine growth restriction. J. Physiol. 588: 3539-3549.

Chiliard, Y., Doreau, M., Bocquier, F., Lobley, G., 1995. Digestive and metabolic adaptations of ruminants to variations in food supply. In: M. Journet, E. Grenet, M.H. Farce, M. Thériez, C. Demarquilliy (eds), Recent Developments in the Nutrition of Herbivores, 329-360. INRA Editions, Paris.

Christison, G.I., Johnson, H.D., 1972. Cortisol turnover in heat stressed cows. J. Anim. Sci. 35: 1005-1010.

Christopherson, R.J., Kennedy, P.M., 1983. Effect of the thermal environment on digestion in ruminants. Can. J. Anim. Sci. 63: 477-496.

Close, W.H., Mount, L.E., Start, I.B., 1971.The influence of environmental temperature and plane of nutrition on heat losses from groups of growing pigs. Animal Prod. 13: 285-294.

Collier, R.J., Beede, D.K., Tatcher, W.W., Israel, L.A., Wilcox, C.J., 1982. Influences of environment and its modifications on dairy animal health and production. J. Dairy Sci. 65: 2213-2227.

Collier, R.J., Beede, D.K., 1985. Thermal stress as a factor associated with nutrient requirements and interrelationships. In Nutrition of Grazing Ruminants. (ed) by L. McDowell. Academic Press, New York, NY. pp 59-71.

Collier, R.J, Baumgard, L.H, Lock, A.L, Bauman, D.E, 2005. Physiological limitations, nutrient partitioning. In Yield of farmed species. Constraints and opportunities in the 21st Century (ed.R Sylvester-Bradley and J Wiseman), pp. 351–377. Nottingham University Press, Nottingham, UK.

Collier, R.J., Dahl, G., VanBaale, M., 2006. Major advances associated with environmental effects on dairy cattle. J. Dairy Sci. 89: 1244-1253.

Collier, R.J., Collier J.L., Rhoads R.P., Baumgard, L.H., 2008. Invited Review: Genes Involved in the Bovine Heat Stress Response. J. Dairy Sci. 91:445–454.

Collins, K.H., Weiner, H.S., 1968. Endocrinological aspects of exposure to high environmental temperature. Physiol. Rev. 48: 785–794.

Collins, F.G, Mitros, F.A, Skibba, J.L., 1980. Effect of palmitate on hepatic biosynthetic functions at hyperthermic temperatures. Metabolism. 29: 524-531.

Coppock, C.E., 1978. Feeding energy to dairy cattle. In : Coppock, C.E. (ed.) Large Dairy Management. University Presses of Florida, Gainesville, pp. 265-268.

Coppock, C.E., Grant, P.A., Portzer, S.J., Charles, D.A., Escobosa, A., 1982. Lactating dairy cow responses to dietary sodium, chloride, and bicarbonate during hot weather. J. Dairy Sci. 65: 566–576.

Correa-Calderón, A., Armstrong, D., Ray, D., DeNise, S., Enns, M., Howison, C., 2004. Thermoregulatory responses of Holstein and Brown Swiss Heat-Stressed dairy cows to two different cooling systems. Int. J. Biometeorol. 48:142-148.

Coulon, J.B., Chilliard, Y., Rémond. B., 1991. Effets du stade physiologique et de la saison sur la composition chimique du lait de vache et ses caractéristiques technologiques (aptitude à la coagulation, lipolyse). INRA Productions animales, 4 (3) : 219-228.

Coulon, J.B., D'hour, P., 1994. The effect of level of concentrate feeding on the performance of dairy-cows of different breeds. Ann. Zootech. 43:355-368.

Coulon, J.B, Dauver, F., Garel, J.P., 1996. Changes in somatic cell count in dairy cows free of clinical mastitis. INRA Prod. Anim. 9:133-139

Coulon, J.B., Dupont, D., Pochet, S., Pradel, P., Duployer H., 2001. Effect of genetic potential and level of feeding on milk protein composition. J. Dairy Res. 68:569-577.

Cummins, K.A., 1992. Effect of dietary Acid Detergent Fiber on responses to high environmental temperature. J. Dairy Sci. 75: 1465-1471.

***D***

Dahlanuddin Thwaites, C.J., Hill, M.K., 1996. Effects of increasing ambient temperature on the intake and digestibility of high- and low-quality feedstuffs in goats. J. Anim. Physiol. Anim. Nutr. 75: 185-191.

Dale, H.E, Goberdhan, C.K., Brody, S., 1954. A comparison of the effects of starvation and thermal stress on the acid-base balance of dairy cattle. Am J Vet Res. 15: 197-201.

Danfaer, A., Thysen I., Ostergaard, V., 1980. The effect of the level of dietary protein on milk production. 1. Milk yield, liveweight gain and health. Beret. Statens Husdyrbrugsfors. 492.

Das, R., Sailo, L., Verma, N., Bharti, P., Saikia, J., Imtiwati, et al., 2016. Impact of heat stress on health and performance of dairy animals: A review. Vet. World. 9: 260-268.

De Campeneere, S., de Brabander, D.L., Vanacker, J.M., 2006. Milk urea as affected by the roughage type offered to dairy cattle. Livest. Sci. 103: 30-39.

De Rensis, F., Scaramuzzi, R.J., 2003. Heat stress and seasonal effects on reproduction in the dairy cow. a review. Theriogenology. 60: 1139-1151

De Vliegher, S., Barkema, H.W., Stryhn, H., Opsomer, G., De Kruif, A., 2005. Impact of early lactation somatic cell count in heifers on milk yield over the first lactation. J. Dairy. Sci. 88 (3): 938-947.

DGPA, 2016. Annuaire des Statistiques agricoles 2016. Direction générale de la production agricole, Ministère de l'agriculture, Tunis Tunisie.

Dikmen, S., Martins, L., Pontes E., Hansen, P.J., 2009. Genotype effects on body temperature in dairy cows under grazing conditions in a hot climate including evidence for heterosis. Int. J. Biometeorol. 53: 327–331.

Do Amaral, B.C., Connor, E.E., Tao, S., Hayen, M.J, Bubloz., J.W., Dahl, G.E., 2011. Heat stress abatement during the dry period influences metabolic gene expression and improves immune status in the transition period of dairy cows. J. Dairy Sci. 94:86-97.

Dobson, H., Tebble, J.E., Smith, R.F., Ward, W.R., 2001. Is stress really all that important? Theriogenology 55: 65-73.

Dong, J., Cai, X.M., Zhao, L.L, Xue, X.Y., Zou, L.J., Zhang, X.L., et al., 2010. Lysophosphatidylcholine profiling of plasma: discrimination of isomers and discovery of lung cancer biomarkers. Metabolomics. 6: 478-488.

Doreau, M., Grimaud, P., Michalet-Doreau, B., 2000. La sous-alimentation chez les ruminants : ses effets sur la digestion. INRA Prod.Anim. 13: 247-255.

Dubois, P.R., Williams, D.J., 1980. Increased incidence of retained placenta associated with heat stress in dairy cows. Theriogenology. 13: 115-12.

Dufrasne, I., Cabaraux, J.F., Istasse, L., Hornick, J.L., 2008. Milk urea content: effects of environmental parameters and relationships with other milk traits. In: Proceedings of 22nd General Meeting of European Grassland Federation, 9-12 June, Sweden.

Dufrasne, I., Istasse, L., Lambert, R., Robaye, V., Hornick, J., 2010. Étude des facteurs environnementaux influençant la teneur en urée dans le lait de vache en Wallonie (Belgique). Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 14(S1): 59-66.

Dumas, A., 1826. Annales de chimie, 33,342.

Dunning, K.R., Russell, D.L, Robker, R.L., 2014. Lipids and ovocyte developmental competence: The role of fatty acids and β-oxidation. Reproduction. 148: R15-27.

Dunshea, F.R., Bell, A.W., Trigg, T.E., 1990. Non-esterified fatty acid and glycerol kinetics and fatty acid re-esterification in goats during early lactation. British J. Nutr. 64: 133-145.

Du Preez, J.H., Hatting, P.J., Giesecke, W.H., Eisenberg, B.E.,1990. Heat stress in dairy cattle and other livestock under Southern African conditions. III. Monthly temperature-humidity index mean values and their significance in the performance of dairy cattle. Onderstepoort. J. Vet. Res. 57:243-248.

Du Preez, J.H., 2000. Parameters for the determination and evaluation of heat stress in dairy cattle in South Africa. Onderstepoort Journal of Veterinary reaserch, 67: 263-271.

***E***

Ealy, A.D., Drost, M, Barros C.M., Hansen P.J. 1992. Thermoprotection of preimplantation bovine embryos from heat shock by glutathione and taurine. Cell. Biol. Int. Repr.16:125–31.

Ealy, A.D., Carlos, F., Arechiga, C.F., Bray, D.R., Risco C.A., Hansen, P.J., 1994. Effectiveness of short-term cooling and vitamin E for alleviation of infertility induced by heat stress in dairy cows. J. Dairy Sci. 77: 3601-3607.

El-Nouty, F. D, Elbanna, I. M, Davis, T.P, Johnson, H.D. 1980. Aldosterone and ADH response to heat stress and dehydration in cattle. J. Appl. Physiol. 48: 249-255.

Emery, R.S., 1978. Feeding for increased milk protein, J. Dairy Sci. 61: 825–828.

Enjalbert, F., 1995. Les lipides dans l'alimentation des ruminants. I. Principales sources et conséquences sur la digestion ruminale. Revue Méd. Vét. 146 : 299-308.

Esmay, M.L., 1969. Principles of Animal Environment. AVI, Westport, CT.

Espinosa, J.L., Sanchez, J., Garcia, J. A., Sanchez, J. R, Ortega, R., 2009. Thermoregulation differs in Chinampo (*Bos taurus*) and locally born dairy cattle. Turk. J. Vet. Anim. Sci. 33(3): 175-180.

***F***

Faget, T., 1992. Problèmes posés par l'intensification de la production laitière en pays développés et à climat chaud. Approche bibliographique. Thèse de doctorat vétérinaire, Université Paul Sabatier, Toulouse, 186 p.

Fatehi, F., Zali, A., Honarvar, M., Dehghan-banadaky, M., Young, A.J., Ghiasvand, M., Eftekhari, M., 2012. Review of the relationship between milk urea nitrogen and

days in milk, parity, and monthly temperature mean in Iranian Holstein cows. J. Dairy Sci. 95:5156-5163.

Febbraio, M.A., 2001. Alterations in energy metabolism during exercise and heat stress. Sports Med. 31: 47-59.

Ferguson, K.A., Dowling, D.F., 1955. The functions of cattle sweatglands. Aust. J. Agric. Res. 6 : 640–644.

FGE – France Génétique Elevage 2015.http://en.france-genetiqueelevage.org/Tarentaise,370.html et http://en.france-genetiqueelevage.org/Prim-Holstein,366.html. Consulté le 10 janvier 2017.

Finch, V.A., Bennett, I.L., Holmes, C.R., 1982. Sweating response in cattle and its relation to rectal temperature, tolerance of sun and metabolic rate. Journal of Agricultural Science Cambridge 99: 479–487.

Finch, V.A., 1984. Heat as a stress factor in herbivores under tropical conditions. In: Gilchrist, F.M.C., Mackie, R.I. (Eds.), Herbivore Nutrition in the Subtropics and Tropics. The Science Press, Graighall, South Africa, pp. 89–105.

Finch, V.A., 1986. Body temperature in beef cattle: its control and relevance to production in the tropics. J. Anim. Sci. 62: 531-542.

Flamenbaum, I., Wolfenson, D., Mamen, M., Berman, A., 1986. Cooling dairy cattle by combination of sprinkling and forced ventilation and its implementation in the shelter system. J. Dairy Sci. 69: 3140-3147.

Flamenbaum, I., Wolfenson, D., Kunz, P.L, Maman, M., Berman, A., 1995. Interactions between body condition at calving and cooling of dairy cows during lactation in summer. J. Dairy Sci.78: 2221-2229.

Fox, D.G., Tylutki, T.P., 1998. Accounting for the effects of environment on the nutrient requirements of dairy cattle. J. Dairy Sci. 81:3085–3089.

Fregonesi, J.A., Leaver, J.D., 2002. Influence of space allowance and milk yield level on behavior, performance and health of dairy cows housed in strawyard and cubicle systems. Livest. Prod. Sci. 78: 245-257.

Fukasawa, M., Tsukada, H., Kosako, T., Yamada, A., 2008. Short communication. Effect of lactation stage, season and parity on milk cortisol concentration in Holstein cows. Livest. Sci. 113: 280-284.

Fuquay, J.W., 1981. Heat stress as it effects animal production. J. Anim Sci. 52: 164-174.

## ***G***

Gaafar, H.M.A., Gendy, M.E., Bassiouni, M.I., Shamiah, S.M., Halawa, A.A., Hamd, M.A., 2011. Effect of heat stress on performance of dairy Friesian cow's milk production and composition. Researcher. 3(5): 85-93.

Gantner, V., Mijic, P., Kuterovac, K., Solic, D., Gantner, R., 2011. Temperature-humidity index values and their significance on the daily production of dairy cattle. Mljekarstvo. 61:56–63.

Garcia-Ispierto, I., Lopez-Gatius, F., Santolaria, P., Yaniz, J. L., Nogareda, C., Lopez-Bejar M., De Rensis, F., 2006. Relationship between heat stress during the peri-implantation period and early fetal loss in dairy cattle. Theriogenology. 65:799-807.

Gaughan, J.B., Mader, T.L., Holt, S.M., Lisle, A., 2008. A new heat load index for feedlot cattle. J. Anim. Sci. 86:226–234.

Gaughan, J.B, Lacetera, N., Valtorta, S.E., Khalifa, H.H, Hahn, L., Mader, T., 2009. Response of domestic animals to climate challenges. In Biometeorology of adaptation to climate variability and change (ed. KL Ebi, I Burton and GR McGregor), pp. 131–170. Springer Science, Heidelberg, Germany.

Gaughan, J.B., Bonner, S., Loxton, I., Mader, T.L., Lisle, A., Lawrence, R., 2010. Effect of shade on body temperature and performance on feedlot steers. J. Anim. Sci. 88: 4056-4067.

Gebremedhin, K.G., 1985. Heat exchange between livestock and the environment. In: Yosef, M.K. (Ed.). Stress Physiology in Livestock, Vol. 1. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 15–33.

Gebremedhin, K.G., Wu, B., 2001. Sensible and latent heat losses from wet-skin surface and fur layer. ASAE Annual International Meeting, Sacramento, CA. ASAE Paper no. 01-4040. ASABE, St. Joseph, MI, USA.

Geerts, N.E., De Brabander, D.L., Vanacker, J.M., De Boever, J.L., Botterman, S.M., 2004. Milk urea concentration as affected by complete diet feeding and protein balance in the rumen of dairy cattle, Livest. Prod. Sci. 85: 263–273,

Godden, S., Rapnicki, P., Stewart, S., Fetrow, J., Johnson, A., Bey, R., Farnsworth R., 2003. Effectiveness of an internal teat seal in the prevention of new intramammary

infections during the dry and early-lactation periods in dairy cows when used with a dry cow intramammary antibiotic. J. Dairy Sci. 86:3899–3911.

Goff, J., Kimura, K., 2002. Factors Affecting the Health and Disease Resistance of The Transition Cow. PSU Dairy Cattle Nutrition Workshop. Grantville, PA.

González-Pereyra, A.V., Maldonado, M.V., Catracchia, C.G., Herrero, M.A., Flores, M.F, Mazzini, M., 2010. Influence of water temperature and heat stress on drinking water intake in dairy cows. Chilean Journal Of Agricultural Research. 70(2): 328-336.

Gorniak, T., Meyer, U., Südekum, K.H, Dänicke, S., 2014. Impact of mild heat stress on dry matter intake, milk yield and milk composition in midlactation Holstein dairy cows in a temperate climate, Archives of Animal Nutrition. 68 (5): 358-369.

Gregory, N.G, Grandin, T., 2007. Animal Welfare and Meat Production. 2. Wallingford, Oxfordshire, United Kingdom: CABI Int. pp. 168–190.

Graham, N.Mc., Wainman, F.W., Blaxter, K.L., Armstrong, D.G., 1959. Environmental temperature, energy metabolism and heat regulation in sheep. I. Energy metabolism in closely clipped sheep. J. Agric. Sci. (Camb.) 52: 13–24.

Gwazdauskas, F.C., Wilcox, C.S., Thatcher, W.W., 1975. Environmental and managemental factors affecting conception rate in a subtropical climate. J. Dairy Sci. 58: 88-92.

***H***

Habeeb, A.A.M., Marai, I.F.M., Kamal, T.H., 1992. Heat stress. In: Phillips, C., Pigginns, D. (Eds.), Farm Animals and the Environment. CAB International, Wallingford, UK, pp. 27–47.

Hadsell, D.L., Parlow, A.F., Torres, D., George, J., Olea, W., 2008. Enhancement of maternal lactation performance during prolonged lactation in the mouse by mouse GH and long-R3-IGF-I is linked to changes in mammary signaling and gene expression. Journal of Endocrinology 198: 61-70.

Hafez, E.S.E., 1968. Philadelphia : Lea & Febiger. Adaptation of domestic animals. P415.

Hahn, G.L., 1982. Housing for cattle, sheep and poultry in the Tropics. In: M. K. Yosef (Ed.) Animal Production in the Tropics. 43-72. Praeger Publishers, New York

Hahn, G.L., 1985. Management and housing of farm animals in hot environments. Pages 151-174 in Stress Physiology in Livestock. Vol. II. Ungulates. M. K. Yousef. Ed. CRC Press, Boca Raton, FL.

Hahn, G.L.,1999. Dynamic responses of cattle to thermal heat loads. J. Anim Sci., 77(2), 10-10.

Hahn, G.L., Mader, T.L., Eigenberg, R.A., 2003. Perspective on development of thermal indices for animal studies and management in Proc. Symp.: Interactions Between Climate and Animal Production. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, the Netherlands. EAAP Technical Series No 7: P 31–45.

Halachmi, I., Maltz, E., Livshin, N., Antler, A., Ben-Ghedalia, D., Miron, J., 2004. Effects of replacing roughage with soy hulls on feeding behavior and milk production of dairy cows under hot weather conditions. J. Dairy Sci. 87:2230-2238.

Hales, J.R.S., Findlay, J.D., 1968. The oxygen cost of thermally induced and CO2 induced hyperventilation in the ox. Respir. Physiol. 4: 353-356.

Hales, J.R.S., Brown, G.D., 1974. Net energetic and thermoregulatory efficiency during panting in the sheep. Comp. Biochem. Physiol. 49A: 413–422.

Hales, J.R.S., 1976. Interactions between respiratory and thermoregulatory systems of domestic animals in hot environments. Anim. Biometeorol. 1:123–131.

Halipre, A., 1973. Etude du caractère culard, X. Sensibilité des bovins culards au stress thermique. Annales Génétique et Sélection Animales.5 (4) : 441-449.

Hamada, T., 1971. Estimation of lower critical temperatures for dry and lactating dairy cows. J. Dairy Sci. 54: 1704–1705.

Hammami, H., Rekik, B., Soyeurt, H., Bastin C., Stoll, J., Gengler, N., 2008a. Genotype × Environment interaction for milk yield in Holsteins using Luxembourg and Tunisuan Populations. J. Dairy Sci. 91 (9): 3661-3671.

Hammami, H., Rekik B., Soyeurt H., Ben Gara, A., Gengler, N., 2008b. Genetic parameters of Tunisian Holsteins using a test-Day Random Regression Model J. Dairy Sci. 91 (5): 2118-2126.

Hammami, H., Bormann, J., M'hamdi N., Montaldo, H.H, Gengler, N., 2013a. Evaluation of heat stress effects on production traits and somatic cell score of Holsteins in a temperate environment. J. Dairy Sci. 96:1844-1855.

Hammami, M., Bouraoui, R., Lahmar, M., Selmi, H., 2013b. L'élevage bovin laitier hors sol dans le sahel tunisien (Cas de la région de Sousse). Livestock Research for Rural Development. Volume 25, Article #55. Retrieved April 25, 2017, from http://www.lrrd.org/lrrd25/4/hamm25055.htm

Hammel, H.T., 1968. Regulation of internal body temperature. Annu. Rev. Physiol. 30: 641–646.

Hamzaoui, S., Salama, A.A.K., Caja, G., Albanell, E., Flores, C., Such, X., 2012. Milk production losses in early lactating dairy goats under heat stress. J. Dairy Sci. 95(2): 672-673.

Harmon, R.J., Lu, M., Trammell, D.S., Smith, B.A., Spain, J.N., Spiers, D., 1997. Influence of heat stress and calving on antioxydant activity in bovine blood. J. Dairy Sci. 80: 264 (résumé)

Hao, L.Y., Wang, J., Sun, P., 2016. The Effect of Heat Stress on the Metabolism of Dairy Cows: Updates & Review. Austin Journal of Nutrition & Metabolism 3(1)

Heasman, S.J., Giles, K.M., Ward, C., Rossi, A.G., Haslett, C., Dransfield, I., 2003. Glucocorticoid-mediated regulation of granulocyte apoptosis and macrophage phagocytosis of apoptotic cells: implications for the resolution of inflammation. Journal of Endocrinology 178: 29–36.

Her, E., Wolfenson, D., Flamenbaum, I., Folman, Y., Kaim, M., Berman, A., 1988. Thermal, productive, and reproductive responses of high yielding cows exposed to short-term cooling in summer. J. Dairy Sci. 71 : 1085-92.

Hermann, H., Cier, J.F., 1976. Physiologie de la régulation thermique: précis de physiologie. Masson et Cie. Paris, 2eme édition, pp 537.

Hervé, L., Lollivier, V., Lamberton, P., Wiart, S., Mustiere, C., Philau, S., Quesnel, H., Boutinaud, M., 2016. Caractérisation du processus d'exfoliation des cellules épithéliales mammaires au cours de la traite chez la vache laitière Renc. Rech. Ruminants, 2016, 23, p 351

Higashiyama, Y., Nashiki, M., Narita, H., Kawasaki, M., 2007. A brief report on effects of transfer from outdoor grazing to indoor tethering and back on urinary cortisol and behaviour in dairy cattle. Appl. Anim. Behav. Sci. 102: 119–123.

Hof, G., Vervoorn, M. D., Lenaers, P. L., Tamminga, S., 1997. Milk urea nitrogen as a tool to monitor the protein nutrition of dairy cows. J. Dairy Sci. 80: 3333-3340.

Hojman, D., Kroll, O., Adin, G., Gips, M., Hanochi, B., Ezra, E., 2004. Relationships between milk urea and production, nutrition and fertility traits in Israeli dairy herds. J. Dairy Sci. 87:1001-1011.

Holmes, C.W., Close, W.H., 1977. The influence of climatic variables on energy metabolism and associated aspects of productivity in the pig. In W. Haresign, H. Swan, and D.

Lewis (Eds.), Nutrition and the climatic environment, Butterworths, Studies in the agricultural and food sciences, London, 51-73.

Hopster, H., Bruckmaier, R.M., Van der Werf, J.T.N., Korte, S.M., Macuhova, J., Korte-Bouws, G., van Reenen, C.G., 2005. Stress responses during milking; comparing conventional and automatic milking in primiparous dairy cows. J. Dairy Sci. 85: 3206–3216.

Huber, J.T., 1996. Amelioration of heat stress in dairy cattle. Pages 211–243 in Progress in Dairy Science. C.J.C. Philips, ed. CAB Int., Wallingford, UK.

Huber, J.T.,1998. Yeast products help cattle handle heat. Hoard's Dairyman 143-367.

Huhnke, R.L., McCowan, L.C., Meraz, L.C., Harp, S. L., Payton, M.E., 2001. Determining the frequency and duration of elevated temperature-humidity index. ASAE Annu. Int. Mtg., Sacramento, CA. Am. Soc. Agric. Biol. Eng., St. Joseph, MI.

***I***

Idele, 2015. Résultats du Contrôle laitier- Espèce bovine 2015. P.111.

Igono, M.O., Johnson, H.D., Steevens, B.J., Hainen, W.A., Shanklin, M.D., 1988. Effect of season on milk temperature, milk growth hormone, prolactin and somatic cell counts of lactating cattle. Int. J. Biometeorol. 32:194-200.

Igono, M.O., Johnson, H.D.,1990. Physiological stress index of lactating dairy cows based on diurnal pattern of rectal temperature.J. Interdiscip. Cycle Res. 21: 303–320.

Igono, M.O., jotvedt, G., Sanford-Crane, H.T.,1992. Environmental profile and critical temperature effects on milk production of Holstein cows in desert climate. Int. J. Biometerol. 36:77-87.

Ingram, D.L., Mount, L.E., 1975. Heat exchange between animal and environment. In Man and animals in hot environments (ed. DL Ingram and LE Mount), pp. 5–23. Springer-Verlag, New York, Heidelberg, Berlin.

INRA, 1989. L'alimentation des animaux monogastriques : porc, lapin, volailles. INRA Paris (France), 2-85340-548-6.

INRA, 2007. Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux. Valeurs des aliments, Tables INRA 2007. Editions Quae, Paris, France, 307p.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007) Climate Change: Synthesis Report. Available from: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment report/ar4/syr/ar4_syr_sym.pdt Accessed on 28-11-2015.

Itoh, F., Obara, Y., Rose, M.T., Fuse, H., 1998. Heat influences on plasma insulin and glucagon in responses to secretogogues in non lactating dairy cows. Domest. Anim. Endocrinol. 15: 499-510.

***J***

Janni, K.A., Allen, D.M., 2001. Thermal environmental conditions in curtain-sided naturally ventilated dairy free stall barns. Pages 367-376 in Livestock Environment, Proc. 6th Int. Symp., Louisville, KY. American Society of Agricultural Engineers, ST. Joseph, MI.

Janzekovic, M., 2005. Measuring heart rate of cows milking parlour. Agricultura. 3: 21-25.

Jenkins, T.C., 1993. Symposium: advances in ruminant lipid metabolism. Lipid metabolism in the rumen. J. Dairy Sci. 76: 3851-3863.

Johnson, H.D., Ragsdale, A.C., Berry, I.L., Shanklin, M.D., 1962. Effects of various temperature-humidity combinations on milk production of Holstein cattle. Res. Bull. No.791. College of Agriculture, Agricultural Experimental Station, Univ. of Missouri, Colombia.

Johnson, H.D., Ragsdale, A.C., Berry, I.L., Shanklin, M.D.,1963. Temperature-humidity effects including of acclimation in fed and water consumption of Holstein cattle. Res. Bull. No.846. College of Agriculture, Agricultural Experimental Station, Univ. of Missouri, Colombia.

Johnson, H.D., 1976. World climate and milk production. Biometeorology., 6: 171-175

Johnson, H.D., Vanjonack, W.J., 1976. Effects of environmental and other stressors on blood hormone patterns in lactating animals. J. Dairy Sci. 59: 1603-1617.

Johnson, H.D.,1980. Depressed chemical thermogenesis and hormonal functions in heat. In: Environmental Physiology: Aging, Heat and Altitude. Elsevier/ North Holland, New York, pp. 3-9.

Johnson, H.D., 1985. Physiological responses and productivity of cattle, in: Youssef M.K.(Ed), Stress physiology in livestock. Basic principles, Vol.1:4-19,CRC Press, Boca Raton, Florida.

Johnson, H.D, Shanklin, M.D., Hahn, L., 1987. Productive adaptability of Holstein cows to environmental heat, Part 1. Research Bulletin no. 1060, University of Missouri, College of Agriculture, Agricultural Experimental Station, MO, USA.

Johnston, J.E., McDowell, R.E., Shrode, R.R., Legates, J.E., 1959. Summer climate and its effect on dairy cattle in the Southern region. In: Southern Cooperative Series Bulletin No. 63.

Joksimoviæ-Todoroviæ, V.M., Hristov Davidoviæ, S., Stankoviæ, B., 2011. Effect of heat stress on milk production in dairy cows. Biotechnol. Anim. Husb. 27(3): 1017-1023.

***K***

Kadokawa, H., Sakatani, M., Hansen, P.J., 2012. Perspectives on improvement of reproduction in cattle during heat stress in a future Japan. Anim. Sci. J. 83(6):439-445.

Kadzere, C.T., Murphy, M.R., Silanikove, N., Maltz E., 2002. Heat stress in lactating dairy cows: a review. Livest. Prod. Sci.77:59-91.

Kamal, I., Ibraim, I.I., 1969. The effect of natural environment of the Sahara and controlled climate on thyroid gland activity in Friesian cattle and water buffaloes. Int. J. Biometeorol. 13 : 275–285.

Keck, M., Zähner, M., 2004. Etables de construction simple pour les vaches laitières. Recommandations pour la planification et l'exploitation. Rapport FAT n° 620, Tänikon.

Kennedy, P.M., Young, B.A., Christopherson, R.J., 1977. Studies on the relationship between thyroid function, cold acclimation and retention time of digesta in sheep. J. Anim. Sci. 45: 1084-1090.

Kettlewell, P., Mitchell, M., Harper, E., 2003 Guide to the ventilation of livestock during transport.

Kibler, H.H., Brody, S., 1952. Relative efficiency of surface evaporative and non-evaporative cooling in relation to heat production in Jersey, Holstein, Brown Swiss and Brahman cattle, 50 to 105°F. Univ. Missouri Agric. Exp. Stat. Res. Bull., N°497.

Kibler, H.H., Brody, S., 1954. Effects of temperature, 50 to 105°F and 50 to 90°F on heat production and cardio respiratory activities in Brahman, Jersey and Holstein cows. Univ. Misof souri Agric. Exp. Sat. Res; Bull., N°497.

Kibler, H.H., 1964.Thermal effects of various temperature-humidity combinations on Holstein cattle as measured by eight physiological responses. University of Missouri Agricultural Experiment Station, Research Bulletin. 120862:1-42.

Knapp, D.M., Grummer, R.R., 1991. Response of lactating dairy cows to fat supplementation during heat stress. J. Dairy Sci. 74:2573-2579.

Koprowski, J.A., Tucker, H.A., 1973. Serum prolactin during various physiological states and its relationship to milk production in the bovine. Endocrinology 92: 1480-1487.

Kansas, G.S., 1996. Selectins and their ligands: current concepts and controversies. Blood 88: 3259–3287.

Koubkova, M., Knizkova, I., Kunc, P., Hartlova, H., Flusser, J., Dolezal, O., 2002. Influence of high environmental temperatures and evaporative cooling on some physiological hematological and biochemical parameters in high-yielding dairy cows. Czech. J. Anim. Sci. 47: 309-318.

Kramer, A., 2001. Aussenklimaställe – Erfahrungen und Trends. In: Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, BAL. Gumpensteiner Bautagung 2001, Irdning, S. 29–34.

Kress, D.D., Doornbos, D.E., Anderson, D.C., Davis, K.C.,1995. Tarentaise and Hereford breed effects on cow and calf traits and estimates of individual heterosis. J. Anim. Sci. 73:2574-2578.

Kronfeld, DS., 1982. Major metabolic determinants of milk volume, mammary efficiency, and spontaneous ketosis in dairy cows. J. Dairy Sci. 65: 2204-2212

Kubkomawa, I.H., Emenalom, O.O., Okoli, I.C., 2015. Body Condition Score, Rectal Temperature, respiratory, pulse and heart rates of Tropical indigenous Zebu cattle: a Review. International Journal of Agriculture Innovations and Research 4 (3):448-454.

Kumar, S., Mote, S., Singh, D., Chauhan, S.S., Ghosh, N., 2014. Effects of environmental factors on lactation yield and lactation length of Holdeo crossbred cattle. Indian J. Appl. Res. 4(10): 4-7.

***L***

Lamp, O., Derno, M., Otten, W., Mielenz, M., Nurnberg, G., Kuhla, B., 2015. Metabolic Heat Stress Adaption in Transition Cows: Differences in Macronutrient Oxidation between Late-Gestating and Early-Lactating German Holstein Dairy Cows. PloS one 10(5):e0125264.

Larroy, D., Ambid, L., Richard, D., 1995. La Thermorégulation. In: la Thermorégulation. Nathan, Ed, Toulouse, 1-128.

Ledger, H.P., 1959. A possible explanation for part of the heat tolerance exhibited by Bos taurus and Bos indicus beef cattle. Nature (Lond.) 184, 405.

Lee, D.H.K., 1965. Climatic stress indices for domestic animals. Int. J. Biometeorol. 9 : 29–35.

Lefebvre, D., Plamodon, P., 2003. La revue Le Producteur de Lait Québécois. PATLQ.

Lefebvre, D., Lafontaine, S., 2007. Le stress thermique; Produire du lait en été, c'est hot. Le producteur de lait Québécois: 22-24.

Legates, J.E., Farthing, B.R., Casady, R.B., Barrada, M.S., 1991. Body temperature and respiratory rate of lactating dairy cattle field and chamber conditions. J. Dairy Sci. 74: 2491– 2500.

Linn, J., Reath-Knight, M., Larson, R., 2004. Managing heat stressed lactating dairy cows. Hubbard Feeds Inc. 26: 9-10.

Lu, Q., Wen, J., Zhang, H., 2007. Effect of chronic heat exposure on fat deposition and meat quality in two genetic types of chicken. Poult Sci. 86: 1059-1064.

***M***

Magdub, A.B., Johnson, H.D., Belyea, R.L., 1982. Effect of environment heat and dietary fiber on thyroid physiology of the lactating cows. Int. J. Biometeorol. 25: 2323–2329.

Majdoub-Mathlouthi, L., Kraiem, K., Larbier, M., 2008. L'addition de levure dans l'alimentation de la vache laitière semble être plus efficace en condition de stress thermique In 15èmes Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, Paris, Fr. Dec. 2008. p293.

Majdoub-Mathlouthi, L., Kraiem, K., Larbier, M., 2009. Effects of feeding Saccharomyces cerevisiae Sc 47 to dairy cows on milk yield and milk components, in Tunisian

conditions. Livestock Research for Rural Development. Volume 21, Article #73. Retrieved April 25, 2017, from http://www.lrrd.org/lrrd21/5/majd21073.htm.

Mariasegaram, R., Chase, C.C., Jr Chaparro, J.X., Olson, T.A., Brenneman, R.A., Niedz, R.P., 2007. The slick air coat locus maps to chromosome 20 in Senepol-derived cattle. Anim. Genet. 38: 54-59.

Marsola, R.S., Favoreto, M.G., Silvestre, F.T., Shin, J C., Walker, N., Adesogan, A., Staples, C.R., Santos, J. E.P., 2010. Effect of feeding live yeast on performance of Holstein cows during summer. J. Dairy Sci. 93:432 (résumé).

McArthur, A.J., Clark, J.A., 1988. Body temperature of homeotherms and the conservation of energy and water. J. Therm. Biol. 3: 9–13.

McDowell, R.E., Hooven, N.W., Camoens, J.K., 1976. Effects of climate on performance of Holsteins in first lactation. J. Dairy Sci. 59:965–973.

McDowell, R.E., 1958. Physiological approaches to animal climatology. J. Hered. 49: 52–61.

McLean, J.A., 1963. The partition of insensible losses of body weight and heat from cattle under various climatic conditions. J. Physiol. (Lond.) 167: 427–434.

McManus, C., Prescott, E., Paludo, G., Bianchini, E., Louvandini, H., Mariante, A., 2009. Heat tolerance in naturalized Brazilian cattle breeds. Livestock Science 120:256–264.

Mihm, M., Curran, N., Hyttel, P., Knight, P.G., Boland, M.P., Roche, J.F., 1999. Effect of dominant follicle persistence on follicular fluid oestradiol and inhibin and on oocyte maturation in heifers. Journal of Reproduction and Fertility. 116: 293-304.

Miller, R.H., Norman, H.D., Wiggans, G.R., Wright, J.R., 2004. Relationship of test day Somatic cell score with test day and lactation milk yields. J. Dairy. Sci. 87 (7): 2299-2306.

Milnor, R., 1979. Aortic wavelength as a determinant of the relation between heart rate and body size in mammals. American journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative physiology. Vol. 237. no. 1, R3-R6.

Mitra, R.G., Christison, G.I., Johnson, H.D., 1972. Effect of prolonged thermal exposure on growth hormone (GH) secretion in cattle. J. Anim. Sci. 34: 776–779.

Moe, P.W., Flatt, W.P., Tyrrell, H.F., 1972. Net energy value of feeds for dairy cattle. J. Dairy Sci. 55: 945–958.

Monteiro, A.P., Guo, J.R., Weng, X.S., Ahmed, B.M., Hayen, M.J., Bernard, J.K., et al., 2016. Effect of maternal heat stress during the dry period on growth and metabolism of calves. J. Dairy Sci. 99: 3896-3907.

Moore, C.E., Kay, J.K., VanBaale, M.J., Collier, R.J., Baumgard L.H., 2005. Effect of conjugated linoleic acid on heat stressed Brown Swiss and Holstein cattle. J. Dairy Sci. 88:1732–1740.

Moran, J.B., 1989. The influence of season and management system on intake and productivity of confined dairy cows in a Mediterranean climate. Animal Production 49:339–344.

Morand-Fehr, P., Doreau, M., 2001. Ingestion et digestion chez les ruminants soumis au stress de chaleur. INRA Prod-Anim. 14:15-27.

Morrison, S.R., 1983. Ruminant heat stress: Effect on production and means of alleviation. J. Anim. Sci. 57:1594–1600.

Muller, C.J.C, Botha, J.A., 1993. Effect of summer climatic conditions on different heat tolerance factors in primiparous Friesian and Jersey cows. S. Afr. J. Anim. Sci. 23 (3/4): 98-103.

Muller, C.J.C., Botha, J.A., Smith, W.W., 1994a. Effect of shade on various parameters of Friesian cows in a Mediterranean climate in South Africa. 1. Feed and water intake, milk production and milk composition. South Afric. J. Anim. Sci. 24: 49–55.

Muller, C.J.C., Botha, J.A., Coetzer, W.A., Smith, W.W., 1994b. Effect of shade on various parameters of Friesian cows in a Mediterranean climate in South Africa. 2. Physiological responses. South Afric. J. Anim. Sci. 24: 56–60.

Muller, C.J.C., Botha, J.A., Smith, W.W., 1994c. Effect of shade on various parameters of Friesian cows in a Mediterranean climate in South Africa. 3. Behavior. South Afric. J. Anim. Sci. 24: 61–66.

Mullick, D.N.,1960. Effect of humidity and exposure to sun on the pulse rate, respiration rate, rectal temperature and hemoglobin level in different sexes of cattle and buffalo. J. Agric. Sci. 54: 391–402.

Murphy, M.R., 1992. Water metabolism of dairy cattle. J. Dairy Sci. 75: 326–333.

## ***N***


Nardone, A., Lacetera, N., Ronchi, B., Bernabucci, U., 1992. Effects of heat stress on milk production and feed intake in Holstein cows. Produzione Animale 5: 1–15.

Nardone, A., 1998. Thermoregulatory capacity among selection objectives in dairy cattle in hot environment. Zootecnica e Nutrizione Animale 24: 297–308.

Nardone, A., Valentini, A., 2000. The genetic improvement of dairy cows in warm climates. In Livestock production and climatic uncertainty in the Mediterranean. Proceeding of the joint ANPA-EAAP-CHIEAM-FAO symposium (ed. F Guessous, N Rihani and A Ilham), pp. 185–191. EAAP publication no. 94, Wageningen Press, Wageningen, The Netherlands.

Nardone, A., Ronchi, B., Lacetera, N., Bernabucci, U., 2006. Climatic effects on productive traits in livestock. Vet. Res. Commun. 30(1): 75-81.

Nardone, A., Ronchi, B., Lacetera, N., Ranieri, M.S., Bernabucci, U., 2010. Effect of climate changes on animal production and sustainability of livestock systems. Livest. Sci. 130(1-3): 57-69.

National Research Council, 1989. In: 6th Revised Edition Update. Nutrient Requirements of Dairy Cattle. National Academy Press, Washington, DC.

National Research Council, 2007. Nutrient Requirements of Small Ruminants, Sheep, Goats, Cervids, and New World Camelids. National Academy Press, Washington, DC.

Negrao, J.A., Porcionato, M.A., de Passille, A.M., Rushen, J., 2004. Cortisol in saliva and plasma of cattle after ACTH administration and milking. J. Dairy Sci. 87: 1713–1718.

NIC, 2009. North Africa: The impact of climate change to 2030 (selected coutries). In : Special report. NIC 2009-07D: 1-56.

Nickerson, S.C., 1987. Mastitis management under hot, humid conditions. Pages 32-38 in Proceeding of the dairy herd management conference, Macon, GA.

Nickerson, S.C., 2014. Management Strategies to Reduce Heat Stress, Prevent Mastitis and Improve Milk Quality in Dairy Cows and Heifers.University of Georgia, Fort Valley State University, the U.S. UGA Extension Bulletin 1426 1-10.

NOAA, 1976. Livestock hot weather stress. Operations Manual Letter C-31–76. NOAA, Kansas City, MO.

## *O*

Oldick, B.S., Firkins, J.L., 1997. Dietary changes may improve heat stress performance. Feedstuffs 69 (23), 13: 26-27.

Olson, T.A, Chase, C.C., Jr Lucena, C., Codoy, E., Zuniga, A., Collier, R.J., 2006. Effect of hair characteristics on the adaptation of cattle to warm climates. In Proceeding of the 8th World Congress on Genetic applied to Livestock Production, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil.

Ominski, K.H., Kenneedy, A.D., Wittenberg, K.M., Moshtaghi Nia, S.A., 2002. Physiological and Production Responses to Feeding Schedule in Lactating Dairy Cows Exposed to Short-Term, Moderate Heat Stress. J. Dairy Sci. 85: 730–737.

Ontario.ca. 2017. http://www.omafra.gov.on.ca/french/engineer/facts/15-018.htm. Consulté le 17 janvier 2017.

O'Brien, M.D., Rhoads, R.P., Sanders, S.R., Duff, G.C, Baumgard., LH., 2010.Metabolic adaptations to heat stress in growing cattle. Domest Anim Endocrinol, v.38, p.86-94.

O'Reece, W., 2004. Dukes' Physiology of Domestic Animals. Cornell University Press. Ithaca New York. 12ed: 962-973.

## *P*

Paape, M.J., Schultze, W.D., Miller, R.H., Smith, J. W., 1973. Thermal stress and circulating erythrocytes, leucocytes, and milk somatic cells. J. Dairy Sci. 56:84-91.

Padilla, L., Matsui, T., Kamiya, Y., Kamiya, M., Tanaka, M., Yano, H., 2006. Heat stress decreases plasma vitamin C concentration in lactating cows. Livest. Sci. 101: 300–304.

Pearson, R.A., Archibald, R.F., 1990. Effect of ambient temperature and urea supplementation on the intake and digestion of alkali-treated straw by Brahman cattle and swamp buffaloes. J. Agric. Sci. Camb. 114:177-186.

Penning, P.D., 2004. Animal-based techniques for estimating herbage intake. Herbage Intake Handbook. 53-93.

Peterson, S.E., Rezamand, P., Williams, J.E., Price, W., Chahine, M., McGuire, M.A., 2012. Effects of dietary betaine on milk yield and milk composition of mid-lactation Holstein dairy cows. J. Dairy Sci. 95 (11): 6557–6562.

Peyraud, J.L.,1998. Techniques for measuring faecal f ow, digestibility and intake of herbage in grazing ruminants. In: Proceedings of the IXth European Intake Workshop, North Wyke, UK. pp 39–43.

Phillips, C.J.C., Schofield, S.A., 1989. The effect of supplementary light on the production and behaviour of dairy cows. Anim. Prod. 48 : 293-303.

Piton, I., 2004. Canicule et reproduction chez la vache laitière. Résultats à partir d'une enquête dans des élevages du Rhône. Thèse de doctorat vétérinaire, école nationale vétérinaire de Lyon, 220 p.

Ponsart, C., Ponter, A.A., Humblot, P., 2004. Conséquences du stress lié à la chaleur sur la fonction de reproduction. Relations avec l'alimentation. A paraître.

Ponter, A.A., Ponsart, C., Duvuax-Ponter, C., 2004. Sécheresse et nutrition : conséquences sur les performances des ruminants. Bulletin des GTV 26: 46-49.

Prosser, C.L., Brown, F.A., 1969. Comparative Animal Physiology. Saunders Co, London

Purwanto, B.P., Abo ,Y., Sakamoto, R., Furumoto, F., Yamamoto, S.,1990. Diurnal patterns of heat production and heart rate under thermoneutral conditions in Holstein Friesian cows differing in milk production. J. Agri. Sci. (Camb.) 114:139-142.

## ***R***

Ragsdale, A.C., Thompson, H.J., Worstell D.M., Brody, S., 1953. The effect of humidity on milk production and composition, feed and water consumption and body weight in cattle. MO Agr. Exp. Sta. Res. Bull. 521.

Raud, H.R., Kiddy, C.A., Odell, W.D., 1971. The effect of stress upon the determination of serum prolactin by radioimmunoassay. Proc. Soc. exp. Biol. Med. 136: 689-693.

Ravagnolo, O., Misztal, I., 2000. Genetic component of heat stress in dairy cattle, parameter estimation. J. Dairy Sci. 83:2126-2130.

Refsdal, A.O., Baevre, L., Bruflot, R., 1985. Urea concentration in bulk milk as an indicator of the protein supply at the herd level. Acta. Vet. Scand. 26: 153-163.

Rejeb, M., Najar, T., Ben M'rad, M., 2012. The effect of heat stress on dairy cows performance and animal behaviour. International Journal of Plant Animal and Environnemental sciences. 3:29-34.

Rejeb Bellil, M., 2014. Etude de la physiologie, du comportement alimentaire et des performances des vaches à faible et à forte production laitière dans les conditions du stress thermique. Thèse de doctorat. INAT, Tunis.128p.

Rejeb, M., Sadraoui, R., Najar, T., Ben M'rad, M., 2016. A Complex interrelationship between rectal temperature and dairy cows' performance under heat stress conditions. Open Journal of Animal Sciences, 5, 24-30. http://dx.doi.org/10.4236/ojas.2016.61004.

Rekik, B., Ben Gara, A., Ben Hammouda, M., Hammami, H., 2003. Fitting lactation curves of dairy cattle in different types of herds in Tunisia. Livest. Prod. Sci., 83 (2-3): 309-315.

Rekik, B., Bouraoui, R., Ben Gara, A., Hammami, H., Hmissi, M., Rouissi, H., 2009. Milk production of imported heifers and Tunisian-born Holstein cows. American-Eurasian J. Agr. 2 (1):36-42.

Reneau, J.K., 1986. Effective use of dairy herd improvement somatic cell count in mastitis control. J. Dairy Sci. 69:1708-1720.

Rhoads, M.L., Rhoads, R.P., Baale, M.J., Collier, R.J., Sanders, S.R., Weber, W.J., Croocker, B.A., Baumgard, L.H., 2009. Effects of heat stress and plane of nutrition on lactating Holstein cows: I. Production, metabolism, and aspects of circulating somatotropin. J. Dairy Sci. 92(5): 1986-1997.

Rhoads, R.P., LaNoce, A.J., Wheelock, J.B., Baumgard, L.H., 2011.Alterations in expression of gluconeogenic genes during heat stress and exogenous bovine somatotropin administration. J. Dairy Sci. 94: 1917-1921.

Rhoads, R.P., Baumgard, L.H., Suagee, J.K., Sanders, S.R., 2013. Nutritional interventions to alleviate the negative consequences of heat stress. Adv. Nutr., 4(3): 267-276.

Richards, J.I., 1985. Milk production of Friesian cows subjected to high daytime temperatures when allowed food either ad lib or at nighttime only. Trop. Anim. Health Prod., 17: 141–152.

Robertshaw, D., Damiel, R., 1983. The effect of dehydration on the control of panting and sweating in the black Bedouin goat. Physiol. Zool. 56: 412–418.

Robertshaw, D., Vercoe, J.E., 1980. Scrotal thermoregulation of the bull (Bos spp.). Aust. J. Agric. Res. 31: 401–407.

Robinson, E.N., 1999. Termorregulação, In: Cunningham, J.G. (Ed.), Tratado de fisiologia veterinária, 2.ed. Guanabara Koogan, Rio de Janeiro, pp. 427–435. cap.51.

Roche, J.R., Friggens, N.C., Kay, J.K., Fisher, M.W., Stafford, K.J., Berry D.P., 2009. Invited review: Body condition score and its association with dairy cow productivity, health, and welfare. J. Dairy Sci. 92(12):5769-5801.

Rodriguez, L.W., Mekonnen, G., Wilcox, C.J., Martin, F.G., Krienk, W.A., 1985. Effects of relative humidity, maximum and minimum temperature, pregnancy and stage of lactation on milk composition and yield. J. Dairy Sci. 68:973-978.

Roenfeldt, S., 1998. You can't afford to ignore heat stress. Dairy Manage. 35 (5): 6–12. 2012; 95: 6557-6562.

Roman-Ponce, H., Thatcher, W.W., Buffington, D.E., Wilcox, C.J., Van Horn, H.H., 1977. Physiological and production responses in dairy cattle to a shade structure in a subtropical environment J. Dairy Sci. 60: 424-430

Ronchi, B., Bernabucci, U., Lacetera, N., Nardone, A., 1997. Effetti dello stress termico sullo stato metabolico-nutrizionale di vacche Frisone in lattazione. Zoot Nutr Anim 23:3–15.

Ronchi, B., Bernabucci, U., Lacetera, N., Verini Supplizi, A., Nardone, A., 1999. Distinct and common effects of heat stress and restricted feeding on metabolic status of Holstein heifers. Zoot. Nutr. Anim. 25:11–20.

Roseler, D.K., Ferguson, J.D., Sniffen, C.J., Herrema, J., 1993. Dietary protein degradability effects on plasma and milk urea nitrogen in Holstein cows. J. Dairy Sci. 76: 525-534.

Rosenkrans, C. Jr., Banks, A., Reiter, S., Looper M., 2010. Calving traits of crossbred Brahman cows are associated with heat shock protein 70 genetic polymorphisms. Anim. Reprod. Sci.119:178-182.

Roussel, J.D., Ortego, J.D., Gholson, J.H., Frye J.B., 1969. Effect of thermal stress on the incidence of abnormal milk. J. Dairy Sci. 52:912.

Rübsamen, K., Hales, J.R.S., 1985. Circulatory adjustment of heat-stressed livestock, in Stress physiology in livestocj. Basic principles, 1, edited by M.K. Yousef. Boca Raton, Florida: CRC Press: 143-154.

## ***S***

Sanchez, W.K., McGuire, M.A., Beede, D.K., 1994. Macromineral nutrition by heat stress interactions in dairy cattle: Review and original research. J. Dairy Sci. 77:2051–2079.

Sanders, S.R., Cole, L.C., Flann, K.L., Baumgard, L.H., Rhoads, R.P., 2009. Effects of acute heat stress on skeletal muscle gene expression associated with energy metabolism in rats. FASEB J. 23.

Satter, L.D., Roffler, R.E., 1975. Nitrogen requirements and utilization in dairy cattle. J. Dairy Sci. 58:1219-1237.

Scharf, B., Carroll, J.A., Riley, D.G., Chase, C.C. Jr, Coleman, S.W., Keisler, D.H., et al. 2010. Evaluation of physiological and blood serum differences in heat-tolerant (Romosinuano) and heat susceptible (Angus) *Bos taurus* cattle during controlled heat challenge. J. Anim. Sci. 88: 2321-2336.

Schneider, P.L., Beede, D.K., Wilcox, C.J., 1988. Nycterohemeral patterns of acid–base status, mineral concentrations and digestive function of lactating cows in natural or chamber heat stress environments. J. Anim. Sci. 66: 112–125.

Schütz, K.E., Rogers, A.R., Poulouin, Y.A., Cox, N.R., Tucker, C.B., 2010. The amount of shade influences the behaviour and physiology of dairy cattle. Journal of Dairy Science 93: 125-133.

Schüller, L. K., Burfeind, O., Heuwieser, W., 2013. Short communication: Comparison of ambient temperature, relative humidity, and temperature-humidity index between on-farm measurements and official meteorological data. J. Dairy Sci. 97: 6334-6343.

Selye, H., 1978. The Stress of Life. McGraw-Hill Book Co., New York.

Shebaita, M.K., El-Banna, I.M., 1982. Heat load and heat dissipation in sheep and goats under environmental heat stress. In: Proc. 6th Int. Conf. on Animal and Poultry Production, held at University of Zagazig, Zagazig, Egypt, 21–23 September 1982, Vol. 2. Egyptian Society of Animal Production, pp. 459–469.

Serieys F., 1985. Interprétation des concentrations cellulaires du lait individuel de vache pour le diagnostic de l'état d'infection mammaire. Annales de Recherches Vétérinaires, INRA Editions, 1985, 16 (3), pp.263-269.

Shafie, M.M., 1985. Physiological responses and adaptation of water buffalo, in Stress physiology in livestock. Ungulates, 2, edited by M.K. Yousef. Boca Raton, Florida: CRC Press: 67-80.

Shalit, O., Maltz, E., Silanikove, N., Berman, A., 1991.Water, Na, K, and Cl metabolism of dairy cows at onset of lactation in hot weather. J. Dairy Sci. 74: 1874–1883.

Sharma, A.K., Rodriguez L.A., Mekonnen, G., Wilcox, C.J., Bachman, K.C., Collier, R.J., 1983. Climatological and genetic effects on milk composition and yield. J. Dairy Sci. 66:119-126.

Sharma, A.K., Rodriguez, L.A., Wilcox, C.J., Collier, R.J., Bachman, K.C. Martin, F.G., 1988. Interactions of climatic factors affecting milk yield and composition. J. Dairy Sci. 71:819-825.

Shearer, J.K., Beede, D.K., 1990a. Effects of high environmental temperature on production, reproduction, and health of dairy cattle. Agri-Practice. 11:6-17.

Shearer, J.K., Beede, D.K., 1990b. Thermoregulation and physiological responses of dairy cattle in hot weather. Agri-Practice. 11: 5–17.

Shock, D.A., LeBlanc, S.J., Leslie, K.E., Hand, K., Godkin, M.A., Coe, J.B., Kelton, D.F., 2016. Studying the relationship between on-farm environmental conditions and local meteorological station data during the summer. J. Dairy Sci. 99:2169-2179.

Shoshani, E., Hetzroni, A., 2013. Optimal barn characteristics for high-yielding Holstein cows as derived by a new heat-stress model. Animal. 7:176-182.

Shütz, K.E., Cox, N.R., Mattews L.R., 2008. How important is shade to dairy cattle? Choice between shade or lying following different levels of lying deprivation. Appl. Anim. Behav. Sci. 114:307-318.

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. J. Dairy Sci. 92:935–942.

Sieder, C., 1999. Wärmeleitung von Liegeflächen. Facharbeit IP. FAT Tänikon, nicht publiziert.

Silanikove, N., 1992. Effects of water scarcity and hot environment on appetite and digestion in ruminants: a review. Livest. Prod. Sci. 30: 175-194.

Silanikove, N., 2000. Effects of heat stress on the welfare of extensively managed domestic ruminants. Livest. Prod. Sci. 67:1-18.

Silva, R.G., 2000. Introdução à Bioclimatologia Animal. Ed. Nobel, São Paulo. 286 pp.

Singh, S.P., Newton, W.M., 1978. Acclimatization of young calves to high temperatures: physiological responses. Am. J.Vet. Res. 39: 795–797.

Smith, J. W., Schultze, W. D., 1967. Variation in cell content of milk associated with time of sample collection. I. Diurnal variation. J. Dairy Sci. 50:1083–1087.

Smith, J.F., Brouk, M.J., Harner, III J.P., 2002. Managing heat stress in dairy facilities. In : the AABP Proceedings, September, 35: 71-76.

Smith, R.F., Dobson, H., 2002. Hormonal interactions within the hypothalamus and pituitary with respect to stress and reproduction in sheep. Domestic Animal Endocrinology 23: 75-85.

Smith, T.R., Chapa, A., Willard, S., Herndon Jr., C., Williams, R.J., Crouch, J., Riley, T., Pogue, D., 2006. Evaporative tunnel cooling of dairy cows in the southeast. II: Impact on lactation performance. J. Dairy Sci. 89:3915-3923.

Smith, D. L., Smith, T., Rude, B.J., Ward, S. H., 2013. Short communication: Comparison of the effects of heat stress on milk and component yields and somatic cell score in Holstein and Jersey cows. J. Dairy Sci. 96:3028-3033.

Spain, J.N., Spiers, D., 1998. Effect of fan cooling on thermoregulatory responses of lactating dairy cattle. In; Proceedings of the Fourth International Dairy Housing Conference. ASAE, St. Louis, MO, pp 232-238

Spiers, D.E., Spain J.N., Sampson, J.D. Rhoads, R.P., 2004. Use of physiological parameters to predict milk yield and feed intake in heat-stressed dairy cows. Journal of Thermal Biology 29: 759–764.

St-Pierre, N.R., Cobanov, B., Schnitkey, G., 2003. Economic losses from heat stress by US livestock industries. J. Dairy Sci. 86: 52-77.

Stewart, R.E., Brody, S., 1954. Effect of radiation intensity on hair and skin temperatures and on respiration rates of Holstein, Jersey and Brahman cattle at air temperatures 45, 70 and 80 8F. In: Univ. Missouri Agric. Exp. Stat. Res. Bull. No. 561.

Stott, G.H., Robinson, J.R., 1970. Plasma corticosteroids as indicators of gonadotropin secretion and fertility in stressed bovine. Presented at: Sixty-Fifth Annual Meeting, Amer. Dairy Sci. Ass., Gainesville, Florida.

Stowell, R., Gooch, C., Inglis, S., 2001. Performance of tunnel ventilation for free stall dairy facilities as compared to natural ventilation with supplemental cooling fans. Pages 29-40 in Livestock Environment, Proc. 6th Int. Symp., Louisville, KY. American Society of Agricultural Engineers, ST. Joseph, MI.

Streffer, C., 988 Aspects of metabolic change after hyperthermia. Recent Results Cancer Res. 1: 107:7-16.

Sunil Kumar, B.V., Kumar, A., Kataria, M., 2011. Effect of heat stress in tropical livestock and different strategies for its amelioration. J. Stress Physiol. Biochem., 7(1): 45-54.

Swenson, M.J., Reece, W.O., 1996. Dukes' Fisiologia dos animais domésticos. São Paulo: Guanabara Koogan, 11. Ed. (856 pp.).

## ***T***


Tao, S., Dahl, G.E., 2013. Heat stress effects during late gestation on dry cows and their calves. J. Dairy Sci. 96(7): 4079-4093.

Taylor, S.C.S., Thiessen, R.S., Murray, J., 1986. Inter-breed relationship of maintenance efficiency to milk yield in cattle. Anim. Prod. 43, 37–62.

Thatcher, W.W., 1974. Effects of season, climate, and temperature on reproduction and lactation. J. Dairy Sci. 57:360-368.

Thatcher, W.W., Flamenbaum, I., Block, J., Bilby, T.R., 2010. Interrelationships of heat stress and reproduction in lactating dairy Cows. High plains dairy conference.

Thibault, 2000. Thermorégulation des homéothermes. In : Cours théorique de physiologie Ecole Nationale Vétérinaire de Lyon, Marcy l'Etoile, p20.

Thom, E.C., 1959. The discomfort index. Weatherwise. 12:57-60.

Thomas, C.K., Pearson, R.A., 1986. Effects of ambient temperature and heat cooling on energy expenditure, food intake and heat tolerance of Brahman and Brahman3Fresian cattle working on treadmills. Anim. Prod. 43: 83–90.

Thompson, G.E., 1985. Lactation and the thermal environment, in Stress physiology in livestock. Basic principles, 1, edited by M.K. Yousef. Boca Raton, Florida: CRC Press: 4-19.

Tian, H., Wang, W.Y., Zheng, N., Cheng, J.B., Li, S.L., Zhang Y.D., et al., 2015. Identification of Diagnostic Biomarkers and Metabolic Pathway Shifts of Heat-Stressed Lactating Dairy Cows. J. Proteomics. 125: 17-28.

Toutain, P.L., Combrisson, H., 1990. Thermorégulation et reproduction. In: Association pour l'étude de la reproduction animale. Influence de l'environnement sur la reproduction, Maisons-Alfort, 25 janvier 1990 AERA, Maisons-Alfort, A1-A17.

Trinder, P., 1969. Determination of Glucose in Blood using Glucose Oxidase with an alternative oxygen acceptor. Ann. Clin. Biochem. 24 (6): 24-27.

Tucker, H.A., 1982. Seasonality in cattle. Theriogenology 17: 53-59.

Turner, H.G., 1982. Genetic variation of rectal temperature in cows and its relationship to fertility. Animal Production 35: 401–412.

Turner, H.G., Taylor, C.S., 1983. Dynamic factors in models of energy utilization with particular reference to maintenance requirement of cattle. World Rev. Nutr. Diet. 42:135–190.

***V***

Vale, W.G., 2007. Effects of environment on buffalo reproduction. Ital. J. Anim. Sci. 6(2): 130-142.

Van Soest, P.J., Wine, R.H., 1967. Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. IV Determination of plant cell-wall constituents. J. Assoc. Off. Anal. Chem. 50-55.

Verkerk, G.A., Phipps, A.M., Carragher, J.F., Matthews, L.R., Stelwagen, K., 1998. Characterization of milk cortisol concentrations as a measure of short-term stress responses in lactating dairy cow. Anim. Welf. 7: 77–86.

***W***

Waage, S., Sviland, S., Odeogaard, S.A., 1998. Identification of risk factors for clinical mastitis in dairy heifers. J. Dairy Sci. 81:1275-1284.

Wang, J.P., Bu, D.P., Wang, J.Q., Huo, X.K., Guo, T.J., Wei, H.Y., et al., 2010. Effect of saturated fatty acid supplementation on production and metabolism indices in heat-stressed mid-lactation dairy cows. J. Dairy Sci. 93: 4121-4127.

Warren, W.P., Martz, F.A., Asay, K.H., Hilderbrand, E.S., Payne, C.G., Vogt, J.R., 1974. Digestibility and rate of passage by steers fed tall fescue, alfalfa and orchard grass hay in 18 and 32 8C ambient temperature. J. Anim. Sci. 39: 93–96.

Ward, G.E., Schultz, L.H., 1972. Relationship of somatic cells in quarter milk to type of bacteria and production. J. Dairy Sci. 55: 1428- 1431.

Wayman, O., Johnson, H.D., Merilan, C.P., Berry, I.L., 1962. Effect of ad libitum or force-feeding of two rations on lactating dairy cows subject to temperature stress. J. Dairy Sci. 45: 1472–1478.

Weber, P., Toelboell, T., Chang, L., Tirrell, J., Saama, P.M., Smith, G.W., Burton, J.L., 2004. Mechanisms of glucocorticoid-induced down-regulation of neutrophil L-selectin in cattle: evidence for effects at the gene-expression level and primarily on blood neutrophils. Journal of Leukocyte Biology. 75:815-827.

Webster, A.J.F., Osuji, P.O.,Weekes, T.E.C., 1976. Origins of the heat increment of feeding in sheep. In: Proceedings 7th Symposium Energy Metabolism, EAAP Publication 19, pp. 45–53.

Webster, A.J.F., Osuji, P.O., White, F., Ingram, J.F., 1975. The influence of food intake on portal blood flow and heat production in the digestive tract of sheep. Br. J. Nutr. 34: 125–139.

Wegner, T.N., Schuh, J.D., Nelson, F.E., Stott, G.H., 1974. Effect of stress on blood leucocytes and milk somatic cell counts in dairy cows. J. Dairy Sci. 59: 949-956.

Wegner, T. N., Schuh, J. D., Nelson, F. E. and Stott, G. H. 1976. Effect of Stress on Blood Leukocyte and Milk Somatic Cell Counts in Dairy Cows. J. Dairy Sci. 59, No. 5

Wenzel, C., Schonreiter-Fischer, S., Unshelm, J., 2003. Studies on step–kick behavior and stress of cows during milking in an automatic milking system. Livest. Prod. Sci. 83: 237–246.

West, J.W., Mullinix, B.G., Sandifer, T.G., 1991. Changing dietary electrolyte balance for dairy cows in cool and hot environments. J. Dairy Sci. 74:1662–1674.

West, J.W., Haydon, K.D., Mullinix, B.G., Sandifer, T.G.,1992. Dietary cation-anion balance and cation source effects on production and acid-base status of heat-stressed cows. J. Dairy Sci. 75:2776–2786.

West, J.W., 1994. Interactions of energy and bovine somatotropin with heat stress. J. Dairy Sci. 77:2091-2102.

West, J.W., 1999. Nutritional strategies for managing the heat stressed dairy cows. J. Anim. Sci. 77(2): 21-35.

West, J.W., 2003. Effects of heat-stress on production in dairy cattle. J. Dairy Sci. 86:2131-2144.

Wheelock, J.B., Rhoads, R.P., Van Baale, M.J., Sanders, S.R., Baumgrad, L.H., 2010. Effects of heat stress on energetic metabolism in lactating Holstein cows. J. Dairy Sci. 93:644-655.

Whittier, J.C., 1993. Hot weather livestock stress. Univ. Missouri. Ext. Bull G2099. Mt. Vernon.

Wiersma, F., 1982. Shades for dairy cattle. Unv. Ariz. Ext. Serv., Wrep 51. Univ. Arizona, Tucson.

Wiersma, F.,1990. Temperature-humidity index table for dairy producer to estimate heat stress for dairy cows. Department of Agricultural Engineering. The University of Arizona, Tucson.

Wilks, D.L., Coppock, C.E., Lanham, J.K., Brooks, K.N., Baker, C.C., Bryson, W.L., Elmore, R.G., Stermer, R.A., 1990. Responses of lactating Holstein cows to chilled drinking in high ambient temperatures. J. Dairy Sci. 73: 1091-1099.

Wilson, S.J., Marion, R.S., Spain, J.N., Spiers, D.E., Keisler, D.H., Lucy, M.C., 1998. Effects of controlled heat stress on ovarian function of dairy cattle. 1.Lactating cows. J. Dairy Sci. 81: 2124-31.

Wise, M.E., Armstrong, D.V., Huber, J.T., Hunter, R., Wiersma, F., 1988 Hormonal alterations in the lactating dairy cow in response to thermal stress, J. Dairy Sci. 71: 2480–2485.

Wittwer, F.G., Gallardo, P., Reyes J., Opitz, H., 1999. Bulk milk urea concentration and their relationship with cow fertility in grazing dairy herds in southern Chile. Prev. Vet. Med., 38: 159-166.

Wolfenson, D., Thatcher, W.W., Badinga, L., Savio, J.D., Meidan, R., Lew, B.J., Brawtal, R., Berman, A., 1995. Effect of heat stress on follicular development during the estrus cycle in lactating dairy cattle. Biol. Repro. 52: 1106-1113.

Wolfenson, D., Lew, BJ., Thatcher, W.W., Graber, Y., Meidan R., 1997. Seasonal and acute heat stress effects on steroid production by dominant follicles in cows. Anim. Reprod. Sci. 47: 9-19.

Worstell, D.M, Brody, S., 1953. Environmental physiology and shelter engineering with special references to domestic animals. 20. Comparative physiological reactions of European and Indian cattle to changing temperature. Mo. Agric. Exp. Stn. Res. Bull. 515:1-42.

## ***Y***

Yamamato, S., Young, B.A., Purwanto, B.P., Nakamasu, F., Natsumoto, T., 1994. Effect of solar radiation on the heat load of dairy heifers. Aust. J. Agric. Res. 45: 1741–1749.

Yasothai, R., 2014. Effect of climate on nutrient intake and metabolism and countering heat stress by nutritional manipulation. International Journal of Science, Environment and Technology. 3 (5):1685 – 1690.

Yaspelkis, B.B., Scroop, G.C., Wilmore, K.M., Ivy, J.L.,1993. Carbohydrate metabolism during exercise in hot and thermoneutral environments. Int. J. Sports Med. 14:13-19.

Yeck, R.G., Stewart, R.E., 1959. A ten year summary of psychro-energetic lab dairy cattle research at the University of Missouri. Trans. ASAE 2:71.

Younas, M., Fuquay, J.W., Smith, A.E., Moore, A.B., 1993. Estrous and endocrine responses of lactating Holsteins to forced ventilation during summer. J. Dairy Sci. 76: 430-443.

Yousef, M.K., Johnson, H.D., 1966. Calorigenesis of dairy cattle as influenced by thyroxine and environmental temperature. J.Anim. Sci. 25:150–156.

Yousef, M.K., 1985. In: Basic Principles. Stress Physiology in Livestock, Vol 1 CRC Press, Boca Raton, FL.

## ***Z***

Zähner, M., Schrader, L., Hauser, R., Keck, M., Langhans, W., Wechsler, B., 2004. The influence of climatic conditions on physiological and behavioural parameters in dairy cows kept in open stables. Anim Sci. 78:139– 147.

Zheng, L., Chenh, M., Zhi-Cheng, G., 2009. Effects of heat stress on milk performance and fatty acids in milk fat of Holstein dairy cows. J. Chin. Dairy Ind. 37(9): 17-19.

Zimbelman, R.B., Rhoads, R.P., Rhoads, M.L., Duff, G.C., Baumgard, L.H., Collier, R.J., 2009. A re-evaluation of the impact of temperature humidy index (THI) and block globe humidity index (BGHI) on milk production in high producing dairy cows. Proceedings of the 25th Annual Southwest Nutrition and Management Conference:158-168.

# ANNEXES

# Questionnaire d'enquête systèmes d'élevage de la race Tarentaise en Tunisie

Date : … / … /… Numéro de questionnaire : … ..

Gouvernorat : ……. Délégation : ……..

## 1-Identification de l'exploitant

Nom et prénom de l'exploitant : ……

Présence d'une autre activité : Grandes cultures ☐ Culture maraîchère ☐ Arboriculture ☐

## 2- Identification de l'exploitation

Mode d'élevage : Hors sol et affouragement ☐ Pâture + ☐ Parcours naturel ☐

En vert Complément CC

**A. Bâtiments d'élevage**

Type de bâtiment : …… Mur : ……. Toiture : …….

Type de stabulation : Libre ☐ Entravée ☐ Autre ☐

Cornadis : Oui ☐ Non ☐ Nbr de place/long. d'auge ……..

Air de couchage : Sol ☐ Sol paillé ☐ Béton ☐ Béton paillé ☐

Autre :….

Nettoyage de la litière se fait chaque jour : oui ☐ non ☐ si non préciser : …….

Ventilation : Naturelle ☐ mécanique ☐ précisez : ……...

Accès libre aux aires d'exercices : oui ☐ non ☐ **saison** : été ☐ hiver ☐

Présence des points d'eau dans les aires d'exercices : oui ☐ non ☐

Présence d'ombrage dans les aires d'exercices : oui ☐ non ☐

Etat sanitaire des étables : Bon ☐ Moyen ☐ Médiocre ☐

**B. Production végétale**

| Culture | Rotation | Surface (Ha) | Destination |
|---|---|---|---|
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | **Total surface** | |

**C. Production animale**

*Effectif du cheptel bovin :

| Race<br>Effectif | Vaches laitières en P° | Vaches taries | Génisses | | | Taurillons | Taureaux |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 0-12 mois | 12-24 mois | 24-36 mois | | |
| Tarentaise | | | | | | | |
| Holstein | | | | | | | |
| Autres races traites | | | | | | | |
| Vaches allaitantes | | | | | | | |

*Autres activités d'élevage :

……

……

## *Conduite alimentaire (Vache laitière)

**Calendrier alimentaire** septembre 2013 à septembre 2014 (griser les cases concernées)

| Mois | | Sept | oct | nov | Déc | Jan | Fev | Mar | Avr | Mai | Juin | Juil | Août |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Fourrages en vert** | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| **Ensilage** | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| **Foin** | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| **Paille** | | | | | | | | | | | | | |
| **Concentré industriel** | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| **Concentré fermier** | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| **Autres fourrages** | | | | | | | | | | | | | |
| **Pâturage** | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |

Ration distribuée le jour de l'enquête : Distribution des repas

(Fréquence/heure) :……...

L'ordre de distribution des aliments :

…….

Aliments rationnés / à volonté :

…….....

Est-ce que la distribution des repas varie entre l'hiver et l'été ? Oui ☐ Non ☐

Si oui, précisez entre quelle et quelle date ……

Y'a-t-il une dépression de la prise alimentaire pendant la période estivale : Oui ☐ Non ☐

Si oui précisez : baisse de l'ingestion de l'ordre
de :……

Abreuvement : Eau à volonté Oui ☐ Non ☐

Disponibilité des points d'eau par individu :

……...

Propreté de l'eau : Bon ☐ Moyen ☐ Médiocre ☐

## *La production laitière

Nombre de traites par jour :

…….

Y'a-t-il une chute de la production laitière pendant la période estivale : Oui ☐ Non ☐

Si oui précisez la quantité :

……..

Suivi contrôle laitier : Oui ☐ Non ☐

| Production laitière/ Saison | Hivernale (Déc-Jan-Fév) | Estivale (Juil-Août) |
|---|---|---|
| Quantité de lait (Kg) Tarentaise | | |
| Quantité de lait (Kg) | | |

| | | |
|---|---|---|
| Autres races | | |

Y'a-t-il un changement dans la qualité du lait pendant la saison estivale ? Oui ☐ Non ☐

Si oui précisez :

……

Y'a-t-il une augmentation dans le taux des cellules somatiques du lait en été ? Oui ☐ Non ☐

Si oui précisez de combien : ……

Remarques ou quelques choses à ajouter :

……

……

..

Quelle est la destination finale du lait : Fromage ☐ Lait de consommation ☐

Autre :

## *La conduite de la reproduction

Comment se fait la reproduction des vaches laitières ?……

Age au premier vêlage :

……...

Comment se fait la détection des chaleurs ?.....

Y'a-t-il une difficulté à détecter les chaleurs pendant la période estivale : Oui ☐ Non ☐

Diminution de la durée des chaleurs : Oui ☐ Non ☐

Diminution de l'intensité des chaleurs : Oui ☐ Non ☐

Si oui quelles sont les moyens utilisés pour détecter les chaleurs ?.....

Si oui précisez :

……

Augmentation de la fréquence des IA non fécondantes en été : Oui ☐ Non ☐
précisez :...

Répartition des vêlages ; vêlage en été : Oui ☐ Non ☐

Pratique de la synchronisation des chaleurs ou autres mesures pour regrouper les vêlages en dehors de la saison estivale : Oui ☐ Non ☐ Autre :
……

| Paramètres | Pour les vaches inséminées pendant la saison hivernale (Déc-Jan-Fév) | Pour les vaches inséminées pendant la saison estivale (Juil-Août) |
|---|---|---|
| Intervalle vêlage-vêlage (j) | | |
| Intervalle vêlage-première insémination (j) | | |
| Intervalle vêlage-insémination fécondante (j) | | |
| Nombre d'insémination pour insémination fécondante (j) | | |

Dans le cas des élevages mixtes : Y'a-t-il des différences entre races : Oui ☐ Non ☐
Précisez si
oui :…….

## *La conduite sanitaire

| Pathologie | Nombre d'apparition selon la saison | |
|---|---|---|
| | Eté | Hiver |
| Mammites | | |
| Boiteries | | |
| Acidoses | | |
| Non-délivrance | | |
| Mortalité embryonnaire/avortement | | |

| | | |
|---|---|---|
| Autres | | |

## *Renouvellement du cheptel

Combien de vaches réformées sur l'année ?……..

Sur quels critères vous réformez les vaches ?.....

Comment choisir les génisses à garder ?.....

## *Appréciations personnelles

Pourquoi avoir choisi cette race (ces races) ? :

……

Quels sont les points forts et les points faibles de cette race (ces races) ?.....……
……

# PUBLICATIONS

Int J Biometeorol
DOI 10.1007/s00484-017-1314-4

ORIGINAL PAPER

# Evaluation of heat stress on Tarentaise and Holstein cow performance in the Mediterranean climate

**Rahma Bellagi**[1,2,3] · **Bruno Martin**[1,2] · **Chantal Chassaing**[1,2] · **Taha Najar**[3] · **Dominique Pomiès**[1,2]

Received: 17 October 2016 / Revised: 22 January 2017 / Accepted: 23 January 2017
© ISB 2017

**Abstract** This study was undertaken to first quantify the effect of heat stress on milk yield and components of Tarentaise in comparison to Holstein cows. A dataset of 16,143 monthly individual records of production traits was collected for 435 Tarentaise and 543 Holstein cows from 21 farms in Tunisia (2009 to 2014). This dataset was merged with meteorological data from 5 public stations relative to the 21 farms. The temperature-humidity index (THI), calculated as a combination of ambient temperature and relative humidity, was used to characterize heat stress. When the THI increased from an average value of 53.7 in winter to 75.4 in summer, the Holstein and Tarentaise cows decreased their milk production by 0.93 and 0.15 kg/day, respectively. Milk fat, protein, and urea content decreased similarly in both breeds (−2.20 g/kg, −1.40 g/kg, and −14 mg/L, respectively), and the milk somatic cell count increased for Holstein cows (+352,000/mL) while decreased for Tarentaise cows (−160,000/mL). The second aim of this study was to describe the relationship between the variations of the milk yields between the summer and the winter (Δ milk yields) and some barn characteristics during the hot season. A survey carried out on 19 of the 21 previous farms permitted to conclude that the closed buildings led to a higher decrease in milk yield between the summer and winter than the open buildings (−1.13 vs. −0.27 kg/day). A metallic roof had a more negative impact on Δ milk yields than the other roof types (−1.04 vs. −0.15 kg/day).

**Keywords** Tarentaise cow · Heat stress · Temperature-humidity index · Production traits · Barn characteristics

✉ Rahma Bellagi
bellagi.rahma@yahoo.com

[1] INRA, UMR1213 Herbivores, F63122 Saint-Genès-Champanelle, France

[2] Clermont Université, VetAgro Sup, UMR1213 Herbivores, BP 10448, F-63000 Clermont-Ferrand, France

[3] INAT, Département des ressources animales, halieutiques et technologies agro-alimentaires, 1082 Tunis, Tunisia

## Introduction

High temperatures associated with high humidity are the principal origins of heat stress. Heat stress is defined as a condition that develops when the dissipation of an adequate quantity of heat by animals is no longer possible (Bernabucci et al. 2014). Heat stress may prompt physiological dysfunction that negatively affects an animal's production and reproduction capacity and causes serious economic losses estimated to be in the billions of dollars (West 2003; Rosenkrans Jr et al. 2010). Hot climates tend to reduce the dry matter intake (DMI) of dairy cows by up to 40% when the temperature exceeds 30 °C (Kadzere et al. 2002), which leads to a reduction of energy balance and a decrease in milk yield (Johnson et al. 1963). McDowell et al. (1976) suggested that when temperatures change from 18 to 30 °C, the efficiency of energy use for milk production is reduced by 35% and milk yields decrease by 15%.

The temperature-humidity index (THI) established by Thom (1959) is a combination of ambient temperature and relative humidity used as a common heat stress indicator for dairy cattle comfort. It allows the impact of heat stress on milk yield after prolonged exposure to a hot environment to be modeled (Bianca and Findlay 1962; Johnson 1985). Different thresholds of THI are used to evaluate the effect of heat stress on the production traits of dairy cattle (Hammami et al. 2013). According to Johnson (1985) and Du Preez et al. (1990), milk production is not affected when the THI is

Published online: 02 February 2017

between 35 and 72. The exposure of dairy cows to a higher THI causes a reduction in milk yield from 10 to 34% (Bianca 1965; Itoh et al.1998; Smith et al. 2013). Under the Mediterranean climatic conditions of Tunisia, Bouraoui et al. (2002) reported that milk yields decline by 21% when the THI increases from 68 to 78 during the summer period. Heat stress is also often associated with changes in milk composition and milk somatic cell count (SCC) (Nickerson 1987; Du Preez et al. 1990; Rejeb et al. 2012). On the other hand, many studies have proven that the effect of heat stress is increased for high-producing cows such as Holsteins due to their more intense metabolic activity (West 1994). For Purwanto et al. (1990), the metabolic heat production of cows yielding 18.5 and 31.6 kg/day produced 27.3 and 48.5% more heat than dry cows, respectively. The intensive selection for high yields over fitness traits such as heat tolerance can generally explain the high sensitivity of Holsteins to heat stress (Hammami et al. 2013). According to Smith et al. (2013), selecting the most suitable cattle for heat stress tolerance requires an examination of the differences between the dairy breeds. For example, Holstein cows have shown a greater sensitivity to heat stress than Brown Swiss cows (Johnson and Vanjonack 1976; Correa-Calderón 2004) or Jersey (Smith et al. 2013).

In the context of global warming, heat stress is one of the major issues that can dramatically affect milk production in areas with a Mediterranean climate, emphasizing the importance of selecting more heat-tolerant dairy cattle breeds. In Tunisia, the Tarentaise cow, a dual-purpose rustic breed imported from the northern region of the French Alps, is appreciated by the farmers. Although this breed was initially selected to face harsh mountain conditions and not for heat stress tolerance, farmers consider that Tarentaise breed is also well suited to the Mediterranean climate. Some experiments have demonstrated that the moderate milk yield of the breed (15.0 kg/day; Idele 2015) is balanced by its hardiness, high reproductive performance, and walking ability (Coulon and D'hour 1994; Kress et al. 1995; Coulon et al. 2001), although its heat stress tolerance has never been investigated. Nevertheless, because the selection for more heat-tolerant breeds is an effective strategy to mitigate the effects of heat stress, the role of an improved environment within dairy farms should not be neglected. Factors such as the barn design influence the on-farm environment by their contribution to alleviating heat accumulation and therefore the cows' response to heat. Several studies have found that the temperature inside the barn can be reduced by adequate structural components (Stowel et al. 2001; Janni and Allen 2001) that provide isolation, ventilation, and shade.

The objectives of the present study were (1) to compare the resistance of Tarentaise and Holstein cows to the Mediterranean climatic conditions and (2) to assess the relationship between barn characteristics and summer milk depletion.

## Materials and methods

In Tunisia, dairy cattle rearing, the Tarentaise breed in particular, is concentrated in the north, which is characterized by a Mediterranean climate with mild winters and hot and dry summers. Twenty-one herds spread over five administrative areas situated in the north of Tunisia (Beja, Bizerte, Jendouba, Siliana, and Tunis) have been selected for this study. The selected herds, comprising either Holstein cows, Tarentaise cows, or both breeds together, were representative of the administrative areas. Among these herds, each area had a balanced number of Holstein and Tarentaise cows. To achieve the objectives of this study, the cows' milk production traits, the meteorological data, and the barn characteristics of these 21 herds were compiled.

### Data collection

A dataset with individual milk production traits was electronically obtained from the genetic improvement direction of the Livestock and Pasture Office (OEP, Tunisia). The milk yields and milk components (fat content, protein content, urea concentration, and SCC) relative to 435 Tarentaise and 543 Holstein cows were obtained monthly between 2009 and 2014 from the control of performance of the 21 farms. The daily milk yield of each cow from each herd was individually measured and recorded once a month using calibrated weigh jars. At the same time, a representative sample of each controlled milking was collected for analysis. The individual milk components were measured at the laboratory of the genetic improvement direction with an infrared analyzer (MilkoScan 4000, Foss Electronics, France). The records of the milk yields and components were stored in the dataset with one control per line ranged by herd, cow, breed, rank of lactation, days in milk (DIM), and test day. In addition, the dataset was verified: duplicated records were removed and missing data were considered as such. Cows with only one record were removed from the dataset, and outliers of each parameter were excluded: milk yields >42 kg/day; fat contents <20.0 g/kg; protein contents <20.0 g/kg; urea concentrations <10 or >670 mg/L; and SCC <3.00 $\log_{10}$/mL. After the removal of duplicate and outlier records, the final dataset included 16,143 monthly individual lines (Table 1).

A dataset with records of ambient temperature (AT, in °C) and relative humidity (RH, percentage expressed as a decimal) was electronically provided by the National Institute of Meteorology of Tunisia. The meteorological data were transmitted from five public weather stations relative to the five areas where the 21 farms were located. The meteorological records (AT and RH) corresponded to the average values per month of daily data collected between 2009 and 2014. For each herd and for each month, AT and RH were used to

**Table 1** Parameters available for the statistical analysis of the dataset

| Regions | Farmers (*n*) | Dairy cows (*n*) | | Parameters (*n*) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Holstein | Tarentaise | Milk yield | Fat content | Protein content | Urea concentration | SCC |
| Beja | 1 | 40 | 12 | 752 | 202 | 526 | 458 | 332 |
| Bizerte | 8 | 148 | 178 | 5374 | 3598 | 4124 | 3871 | 3090 |
| Jendouba | 2 | 15 | 14 | 601 | 155 | 387 | 335 | 325 |
| Siliana | 5 | 239 | 66 | 4496 | 2306 | 4017 | 3223 | 3028 |
| Tunis | 5 | 101 | 168 | 4873 | 3325 | 4018 | 3467 | 2948 |
| Total | 21 | 543 | 435 | 16,092 | 9586 | 13,072 | 11,354 | 9723 |

calculate the temperature-humidity index as follows: THI = 1.8 × AT − [1 − RH] × [AT − 14.3] + 32 (Kibler 1964).

The THI was merged with production traits by assigning each dairy control of each farmer to the monthly weather records from the nearest weather station. Some parameters from the final dataset were divided into classes to facilitate the statistical analysis. Parity of cows was classified into four classes corresponding to the rank of lactation: first, second, third, and "four and more." Days in milk were classified into four classes according to the stage of lactation: beginning (<120 days), middle (120–179 days), end (180–300 days), and prolonged lactation ( 300 days). Additionally, the THI was divided into four classes according to Silanikove's classification (2000). This classification was adopted to categorize dairy cows' heat stress as without effect, light, moderate, and extreme. The corresponding THI thresholds were THI < 70, 70 ≤ THI < 75, 75 ≤ THI < 78, and THI ≥ 78, respectively. The aim of this classification was also to better visualize the effect of heat stress on the production traits of Tarentaise and Holstein cows.

## Statistical analysis of the dataset

The final data were analyzed using the mixed procedure of SAS software (version 9.4; SAS Institute, 2013). The effects of THI, breed, and the interaction (THI × breed) on milk yield, milk components (fat, protein, and urea), and SCC (expressed in $\log_{10}$/mL) were analyzed using a linear mixed model. The model is:

$$Y_{ijklmn} = \mu + THI_i + breed_j + THI \times breed_{ij} + farmer_k + DIM_l + parity_m + cow(f)_n + e_{ijklmn}$$

where $Y_{ijklmn}$ is the dependent variable (milk yield, fat content, protein content, urea concentration, or SCC); $\mu$ is the population mean; the fixed effects tested are the THI *i* (numeral or in classes), the breed *j*, the interaction THI × breed *ij*, the farmer *k*, the DIM class *l*, and the parity class *m*; the random effect is the cow (nested within the farmer) *n*; and $e_{ijklmn}$ is the residual error.

Additionally, each cow was characterized within its breed as "low" or "high" producer according to its average daily milk yield adjusted by farmer, DIM, parity, and the effect of the cow nested within the farmer. In each breed, the median of the adjusted daily milk yields was used as the threshold between the "low" and "high" levels of production: 15.5 kg/day for the Holstein cows and 13.0 kg/day for the Tarentaise cows.

## Description of the barn characteristics

A survey of the 21 farms was carried out in September 2014 to assess housing practices that may increase or alleviate the impact of heat stress on the production traits of Holstein and Tarentaise cows (Table 2). The farmers were informed of the day and the aim of the study before the visit. Because two farmers were not available, only 19 farmers were included in the survey. Data were collected through face-to-face interviews with the farmers using a questionnaire with multiple-choice and semi-closed questions to collect data on barn characteristics. The provision of shade and the nature of the roof, the provision of drinking water, the nature of the stalls, and the conditions of the exercise areas were reviewed. This survey was carried out to (1) determine the possible differences in the barn characteristics between the two breeds and (2) understand if the nature of the buildings (open or closed), stalls (tie or free), roofing (metallic or not), and lying area (bare or concrete floor) and the provision of an exercise area with drinking water and shade were associated with the sensitivity of the herds to summer heat stress. This sensitivity was estimated by the difference in milk yields between summer (July, August, and September, defined as the hottest months) and winter (December, January, and February, defined as the coolest months) (Δ milk yields), from 2009 to 2014.

## Statistical analysis for the survey

Calculation of the Δ milk yields was performed using another analysis of the first dataset with a new mixed model:

**Table 2** Description of the 19 surveyed farms and management practices by dominant breed

| Item | Farms with Holstein cow as dominant breed (*n*) | Farms with Tarentaise cow as dominant breed (*n*) | Total (*n*) |
|---|---|---|---|
| Type of farming | | | |
| Extensive | 5 | 5 | 10 |
| Pasture-based | 0 | 0 | 0 |
| Semi-intensive | 5 | 4 | 9 |
| Building types | | | |
| Open | 6 | 6 | 12 |
| Closed | 4 | 3 | 7 |
| Nature of the stalls | | | |
| Tie stall | 7 | 3 | 10 |
| Free stall | 3 | 6 | 9 |
| Exercise area provided with shade and water during the summer season | | | |
| Yes | 4 | 6 | 10 |
| No | 6 | 3 | 9 |
| Free access to the exercise area during the summer season | | | |
| Yes | 3 | 4 | 7 |
| No | 7 | 5 | 12 |
| Roof types | | | |
| Metallic | 6 | 5 | 11 |
| Non-metallic | 4 | 4 | 8 |
| Nature of the lying area | | | |
| Bare floor | 5 | 3 | 8 |
| Concrete floor | 5 | 6 | 11 |
| Cooling equipment | | | |
| Fans | 0 | 0 | 0 |
| Sprinklers | 1 | 0 | 1 |

$Y_{ijklmno} = \mu + season_i + farmer_j + year_k + farmer \times season \times year_{ijk} + breed_l + DIM_m + parity_n + cow(f)_o + e_{ijklmno}$ where $Y_{ijklmno}$ is the milk yield; $\mu$ is the population mean; the fixed effects tested are the season (summer or winter) $i$, the farmer $j$, the year $k$, the interaction (farmer × season × year) $ijk$, the breed $l$, the DIM class $m$, and the parity class $n$; the random effect is the cow (nested within the farmer) $o$; and $e_{ijklmno}$ is the residual error. The adjusted means of the farmer × season × year interactions were used to calculate the Δ milk yields for each farm and year. Herd eligibility required a minimum of 30 individual records of production traits per year and a balanced number of Tarentaise and Holstein cows by area and between summer and winter. The final dataset contained 67 different Δ milk yields relative to 17 herds.

The impact of the main barn characteristics (type of barn, lying area, building type, exercise area, and roof type) on Δ milk yields was tested using the one-way analysis of variance (ANOVA) of SAS (version 9.4; SAS Institute 2013).

## Results and discussion

### Climatic conditions in the north of Tunisia and identification of heat stress thresholds

The average monthly AT, RH, and THI from the 5 public weather stations relative to the 21 herds were 18.8 °C, 68.9%, and 64.0, respectively (Fig. 1). There was no large climatic contrast between the five stations because the standard deviation for AT, RH, and THI were 0.81 °C, 2.30%, and 1.22, respectively. Mean monthly AT and THI peaked in August (28.1 °C and 76.6, respectively) and were the lowest in February (10.7 °C and 52.1, respectively). The Mediterranean climate in the north of Tunisia during the summer is mainly influenced by the sirocco wind that generates a sudden rise in temperature (NIC 2009). The relative humidity tends to be inversely related to AT and THI, with a peak in January (RH = 77.5%) and a minimum value in July (RH = 56.4%). The rise in AT induces an increase in evaporation and therefore a decrease of RH in the areas of this study. During the 5 years of this study, the dairy cows from these farms were exposed to a hot summer period that lasts from June (AT = 24.4 °C, THI = 71.7) to September (AT = 24.9 °C, THI = 73.2). Both AT and THI values during this period indicated that the cows were under heat stress conditions. The upper critical AT of 25–26 °C is considered to be a threshold above which milk production and composition are affected (Berman et al. 1985; Youssef 1985; Kadzere et al. 2002). The THI thresholds found in the literature vary from 68 to 74. Silanikove (2000) suggested that when THI exceeds 70, special measures such as provision of shade shelter are essential to the welfare of farm animals. Johnson et al. (1962) also determined that when THI exceeds 70, a linear reduction in milk yield occurs. Bouraoui et al. (2002) found that under the Mediterranean climatic conditions of Tunisia, lactating Holstein cows reduced their milk yield and DMI when the THI is over 68. However, several authors defined THI = 72 as the upper critical value above which production traits began being modified (Ravagnolo et al. 2000; Thatcher et al. 2010). Additionally, Bohmanova et al. (2007) found a THI threshold of 72 in Georgia and 74 in Arizona (US environment). In the current study, the environmental conditions were sufficiently high to induce heat stress from June to September.

### The effect of heat stress on milk production, milk composition, and somatic cell count

As expected, the average milk yield was higher for Holstein than Tarentaise cows (+3.40 kg/day, $P < 0.001$) (Table 3). Tarentaise cows produced 11.4 kg/day, which is 24% lower than the average milk yield of Tarentaise cows reared in France (Idele 2015). While Holstein cows are commonly a high-yielding breed, in this study, they produced in average

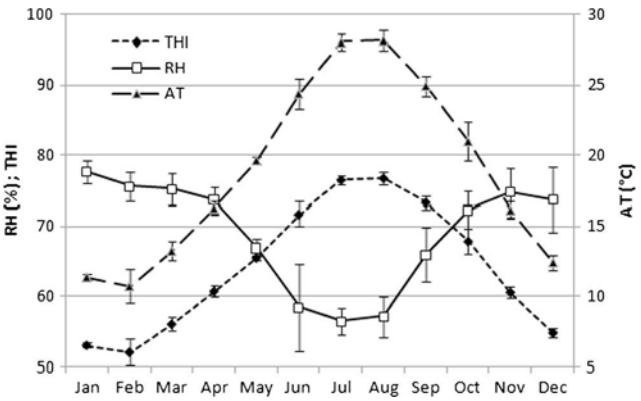



**Fig. 1** Average monthly temperature-humidity index (*THI*), temperature (*AT*, °C), and relative humidity (*RH*, %) in the five stations during the 5 years. The *bars* represent standard deviations between the years

14.8 kg/day, which is only 55% of the milk yield of the Holstein cows reared in France (Idele 2015). Rekik et al. (2009) also found that the mean performance of Tunisian-born Holstein cows (18.6 kg/day) was below the mean production levels of Holstein cows in countries with developed dairy industries. The milk traits of both breeds were significantly affected by THI. However, there was a significant interaction between THI and breed for milk yield. The decrease in milk yield when THI increased was higher for Holstein than for Tarentaise cows (slope −43.0 and −7.00 g/day of milk by point of THI, respectively). In fact, as THI increased from 53.7 in winter (mean value of the coolest months where AT = 11.8 °C and RH = 75.6%) to 75.4 in summer (AT = 27.0 °C and RH = 59.8%), Holstein milk yield decreased by 0.93 kg/day (−6%), while Tarentaise milk yield decreased by 0.15 kg/day (−1%). The absence of differences between the barn characteristics where Holstein and Tarentaise cows are housed (Table 2) confirms that the interaction between breed and THI reported here reveals a higher heat stress tolerance in the Tarentaise cows. The decline in milk yield under heat stress conditions has also been highlighted in earlier studies, confirming that the exposure of dairy cows to high values of THI causes a reduction of 10 to 34% in milk yield (Du Preez et al. 1990; Itoh et al. 1998). Smith et al. (2013) found that when THI exceeds 72, Holstein milk yield decreased from 35.6 to 34.2 kg/day (−3.9%). Bernabucci et al. (2002) noted that milk yield during the summer was 10% lower than during the spring (26.7 vs. 29.5 kg/day, respectively). Moreover, Bouraoui et al. (2002) noted that when THI values increased from 68 to 78 during the summer period in Tunisia, the milk yield was reduced by 21%. Our results reported a less noticeable effect of THI on milk yield for both Tarentaise and Holstein cows in comparison to the results reported by the previous study. In fact, Bouraoui et al. (2002) carried out their study in Kairouan, a department situated in the center of Tunisia with severe climatic conditions during the summer season (mean daily THI value 78 ± 3.23). In addition, Holstein cows from this study produced less milk than those found in the previous study (14.8 and 20.3 kg/day, respectively). It is known that the effect of heat stress is increased for high-producing cows such as Holsteins (Purwanto et al. 1990; Kadzere et al. 2002). West et al. (2003) stressed that high-producing cows face major challenges to dissipating an adequate amount of heat by metabolic processes. As the productive capacity of cows improves, the metabolic heat production increases.

Within the two breeds, the decrease in milk yield in this study was not related to the cows' milk production. Actually, there was no interaction between the THI and the level of production, confirming that for both Tarentaise and Holstein cows, the decrease in milk yield due to high THI is similar for both high- and low-yielding animals ($P > 0.05$; results not shown). Therefore, the higher heat stress tolerance of Tarentaise cows seems to be a breed effect rather than a milk-production-level effect. Some studies have already shown a reduced adaptability of Holstein cows to heat stress under hot climatic conditions in comparison to other breeds (Jersey and Brown Swiss). Ragsdale et al. (1953) found that when AT and RH rose from 24 °C and 38% to 34 °C and 80%, Holstein, Jersey, and Brown Swiss cows (also a mountain breed) reduced their milk productions by 59, 44, and 29%, respectively. However, there were no other studies carried out regarding the effects of heat stress on the production traits of Holsteins in comparison to Tarentaise cows. It is well known that Holstein cows have greater body weights than Tarentaise (50 to 150 kg; FGE 2015). As a direct consequence, the Tarentaise cows have a higher surface area to mass ratio, which is favorable to heat dissipation (Bernabucci et al. 2010).

**Table 3** Effects of breed and temperature-humidity index (THI) on milk yield and milk composition

| | Holstein | Tarentaise | SEM[a] | THI | Breed | THI × breed |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Milk yield (kg/day) | 14.8 | 11.4 | 0.26 | *** | *** | *** |
| Fat (g/kg) | 38.2 | 37.2 | 0.31 | *** | NS | NS |
| Protein (g/kg) | 31.8 | 32.6 | 0.15 | *** | NS | NS |
| Urea (mg/L) | 212 | 213 | 0.70 | *** | NS | NS |
| SCC ($log_{10}$/mL) | 5.47 | 5.42 | 0.03 | NS | *** | *** |

NS (non-significant) $P > 0.05$, ***$P < 0.001$

[a] Standard error of the mean

In addition, the Tarentaise cows have also a relative lower metabolic heat production due to their 10 to 20% lower milk yield per metabolic weight ratio. These points contribute to explain the lower sensitivity of Tarentaise cows to heat stress.

For many authors, the effect of heat stress is not linear, but it increases with high THI (Silanikove 2000; Smith et al. 2013). Different classes of THI were established to indicate the level of heat stress. Those levels are quite variable among authors and indices. For example, heat stress was characterized as mild, moderate, or severe (Armstrong 1994) for THI values ranging from 72 to 79, 79 to 90, and ≥90, respectively. In the current study, the four ranges of Silanikove's classification were adopted, as they created a better visualization of the non-linear effect of THI and were more suited to the Mediterranean climate of Tunisia (Fig. 2). It is clear that the decline in milk yield in the Holstein cows began as THI changed from "without effect" to "light." Moreover, this decline in milk yield was more rapid for Holstein cows than for Tarentaise as THI went from "moderate" to "extreme" (−0.82 vs. −0.13 kg/day).

There was no difference between the two breeds regarding the milk composition. However, THI affected milk fat, protein, and urea contents for both Holstein and Tarentaise cows, and the interaction between breed and THI was not significant. As shown in Table 3, Holstein and Tarentaise cows produced 38.2 and 37.2 g/kg of milk fat, respectively. The increase of THI reduced the milk fat content by 2.20 g/kg between the winter and summer seasons (slope −0.10 g/kg by point of THI), which corresponds with the reduction from 37.9 to 36.5 g/kg when THI rose from 65.6 to 83.9 in an earlier study conducted during the summer season in Tunisia on Holstein cows (Rejeb Bellil 2014). Bouraoui et al. (2002) attributed the depression in milk fat content observed in their study (from 35.8 g/kg during the spring to 32.4 g/kg during the summer) to the decrease in forage intake (17%) and to the lower fiber levels in the rations during the summer season. The significant effect of heat stress observed in the present study is less pronounced than that observed by the earlier

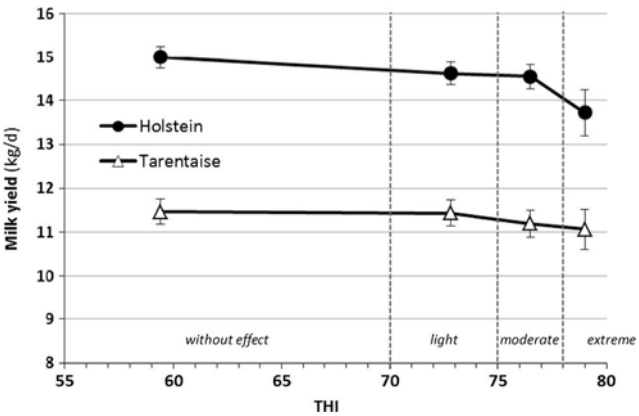



**Fig. 2** Average milk yield by breed and Silanikove's ranges of temperature-humidity index (*THI*). The *bars* represent the standard errors

authors. The observed variation between our results and those reported earlier may have occurred because of the differences in experimental conditions, higher levels of THI, and perhaps animal genetic characteristics. However, other earlier studies stipulated that heat stress either increased milk fat (Sharma et al. 1983; Smith et al. 2013) or did not have any effect (Knapp et al. 1991; Wheelock et al. 2010). In our study, the decrease in milk fat was may be due to the cumulative effects of heat stress on feed intake, the nature of the feeding system, or the physiology of the cows. However, feeding system and nutrient analysis data in the selected herds were not available.

Milk protein percentage also decreased with THI (−1.40 g/kg) between winter and summer (slope −0.06 g/kg by point of THI). These results are in agreement with those reported by Barash et al. (2001), who stipulated that the minimum protein yield of Israeli Holstein cows occurred in August. McDowell (1976) stated that the milk protein percentage decreased by 17% when the dry-bulb temperature increased from 18 to 30.8 °C. Hammami et al. (2013) suggested that the decrease in milk protein percentage is probably due to the decrease in DMI and energy intake during the hot season. Bernabucci et al. (2002) reported that milk protein percentages were 9.9% lower during the summer than in the spring (30.1 and 33.1 g/kg, respectively) and attributed this reduction to a decrease in casein content. The decline in milk protein observed during the hot season in the current study may have occurred due to lower dietary energy and protein intake, a consequence of decreased feed intake. In fact, as heat stress reduces both feed intake and milk yield, a decline in nutrient intake occurs, leading to metabolic changes in the mammary gland.

In addition, concentration of urea in the milk decreased by 14 mg/L between winter and summer seasons (slope −0.11 mg/L by point of THI). Consistent with our results, Rejeb Bellil (2014) reported that when THI increased from an average value of 65.6 to 83.2, milk urea was reduced by 25% for high-producing cows and by 31% for lower-producing ones. However, Hojman et al. (2004) reported higher milk urea concentrations during the summer months and the lowest concentration in November (181 vs. 118 mg/L). Fatehi et al. (2012) also found that the urea concentration in milk was positively correlated with the monthly mean temperature, with a maximum mean value recorded in July. These authors suggested that the increase in urea concentration during the summer period was probably due to the changes that occurred in the nutritional content of the diet when housed cows were at pasture during the hot season. The low urea contents during the summer period in this study could be associated with the cumulative effect of heat stress and the low amounts of dietary protein and degradable protein as a consequence of a potential decrease in DMI.

On average, Holsteins had higher SCC than Tarentaise cows ($P < 0.001$), as shown in Table 3. Several factors such as husbandry conditions in the selected herds and the effect of the breed could account for this difference between the two

breeds. However, high SCC values were observed for both breeds, even in the absence of mammary infections, as all cows with mastitis were removed from the final database. It is possible that this database included cows with subclinical mammary infections that therefore have elevated cell counts at baseline. In addition, the SCC of the milk reflected the interaction between breed and THI ($P < 0.001$) (slope +0.05 $\log_{10}$/mL by point of THI for Holstein cows vs. −0.004 $\log_{10}$/mL for Tarentaise cows). In fact, in the current trial, when THI rose to 75.4, the SCC of the Holstein cows increased by 352,000/mL, while the SCC of the Tarentaise cows decreased by 160,000/mL. The different response to heat stress between the two breeds could be attributed to the fact that heat stress for Holstein cows may increase the pathogen load, resulting in a modification of the immunological parameters, which tend to support the presence of large numbers of infected quarters. It is also possible that Holstein cows developed subclinical mastitis cases after experiencing extreme heat stress (Wegner et al. 1974). As the two breeds were nearly similarly managed, Tarentaise were apparently more heat tolerant than Holstein cows as they presented healthier udders. On the other hand, the obvious differences of hygiene and sanitary practices among the farmers support the fact that the relationship of SCC with the climate change is quite complex. Our result is counter to the common idea that THI is often associated with greater SCC (Igono et al. 1988; Waage et al. 1998; Bouraoui et al. 2002). Hammami et al. (2013) attributed the higher SCC in milk observed during heat stress to the depressed immune function during the hot season. However, some studies (Rousel et al. 1969; Paape et al. 1973) conducted in a climatic chamber with high temperatures have shown that there was no variation in the SCC. Paape et al. (1973) explained in their findings that animals in chamber studies are more closely observed for bacteriological status and other symptoms of udder health.

## Impact of the barns' characteristics on milk yields

The average difference in milk yields between summer and winter is −0.6 kg/day. For 70% of the farms, the Δ milk yields ranged between −0.30 and −2.00 kg/day, while the others did not lose or slightly increased their milk production (+0.10 to +0.70 kg/day).

No differences in Δ milk yields were found among the farmers' group regarding the barn type (tie-stall/free-stall) ($P = 0.13$; Table 4) and the nature of the lying area ($P = 0.69$). Housing type in other studies had a significant effect on the environmental conditions of the farms. A survey from Shoshani and Hetzroni (2013) showed that cows in loose housing had lower ambient temperatures than cows that were free-stalled (32.1 vs. 31.6 °C). The authors noted that under hot climatic conditions, the respiration rate of a cow housed in a free-stall barn will increase earlier compared with those in loose housing. The difference was attributed to the greater animal density in the free stalls. Similarly, Shock et al. (2016) found that tie-stall barns, generally with higher cow densities, had higher temperature and humidity values than free-stall barns. A rise in AT and RH leads to a greater THI that may expose cows to thermal stress that therefore may lead to a reduction in their milk production. However, because the cow density in the current trial was not measured inside the selected herds, the limited differences are possibly due to the lack of difference in cow density between the types of barns.

**Table 4** Relationships between the barn characteristics and the farm difference in milk yields between summer and winter

| Item | Number of farms | Means of Δ milk yields (kg) | *P* value |
|---|---|---|---|
| Type of the barn | | | 0.13 |
| Tie stall | 5 | −0.18 | |
| Free stall | 12 | −0.80 | |
| Nature of the lying area | | | 0.69 |
| Bare floor | 6 | −0.50 | |
| Concrete floor | 11 | −0.68 | |
| Building types | | | 0.01 |
| Open | 7 | −0.27 | |
| Closed | 10 | −1.13 | |
| Exercise area provided with shade and water | | | 0.42 |
| Yes | 9 | −0.48 | |
| No | 8 | −0.77 | |
| Roof types | | | 0.01 |
| Metallic | 9 | −1.04 | |
| Non-metallic | 8 | −0.15 | |

The Δ milk yields were significantly affected by the type of buildings. The decrease in milk yields was higher for the closed buildings than for the open ones (−1.13 vs. −0.27 kg; $P < 0.05$). Closed barns contain additional structural elements such as columns and dividers that can obstruct the airflow (Shoshani and Hetzroni 2013). In addition, open barns are ventilated with natural airflow that helps decrease the ambient temperature and relative humidity inside the barns. The presence of adequate ventilation indoors contributes to minimizing the effects of heat stress on the cows' physiological functions, and therefore milk production and reproductive and immunological functions will be maintained (Smith et al. 2006; Do Amaral et al. 2011; Calegari et al. 2012).

The exercise areas were not all equipped with water and shade, but the means of Δ milk yields between the groups were not significant ($P = 0.42$). However, 40% of the farmers gave free access to the exercise areas during the hot season. Under heat stress conditions, cows, when they are given the choice, prefer to be indoors in the hottest periods of the day. In fact, it is known that to avoid heat and sunlight during thermal stress, cows have a strong motivation to seek shade (Schütz et al.

2008). Armstrong (1994) considered that shade is essential to maintaining the efficiency of milk production and reproduction in hot climates. Furthermore, a cow's heat balance is improved by increasing shade area, an effective means to lose more heat by radiation to a surface cooler than their body surface (Berman and Horovitz 2012), hence the importance of making rational decisions to give free access to shaded areas indoors as well as outdoors to maintain the cattle's body temperature as low as possible.

Roof types were found to have a significant impact on Δ milk yields ($P < 0.05$). Metallic roofs lead to a significantly higher decrease in milk production between the summer and winter seasons than non-metallic roofs. The corrugated metal sheet is the most popular shade material because it is less expensive than the other types of roofs and requires low maintenance. However, metallic roofs are considered to be a hot shade structure that generates thermal radiation and increases radiant heat gain by the body surface. Armstrong (1994) suggested that to create more effective shade, the upper surface of metallic roofs should be painted white. According to Bond et al. (1961), the radiation heat load on the cow can be reduced by installing 2.5 cm of insulation directly beneath the metallic roof.

The management practices assessment of the surveyed farms showed that farmers in the five areas of this study were not concerned about providing adequate barn design and management of the environment. In fact, shade and cooling systems are effective means of minimizing external heat and economic losses that farmers cannot afford. Although sprinklers and fans are effective in decreasing the temperature inside the barns during the hot season (Armstrong 1994), these devices were absent in almost all of the farms.

## Conclusions

According to the current results, heat stress decreased milk yield and induced changes in milk composition in both breeds. However, Tarentaise cows seem to be less impacted than Holstein cows, especially when the THI is higher than 78, as often occurs in the summer climatic conditions of Tunisia. Closed barns and metallic roofs were found to lead to thermal stress, influencing the dairy productivity of the herd. Illuminating the various factors that can generate or increase the effect of heat stress and understanding the responses of the animals to hot climatic conditions are essential to preventing economic losses due to heat stress. The next step of this study will be to quantify the metabolic and physiologic responses of Tarentaise cows under heat stress conditions.

**Acknowledgements** The authors express their gratitude to the Genetic Improvement Direction of the Livestock and Pasture (OEP, Tunisia) and to the National Institute of Meteorology of Tunisia for their collaboration. Thanks also to "Le Groupement des éleveurs de la race Tarentaise en Tunisie" who provided the herd list and organized the visits. The authors acknowledge the American Journal Experts for revising the English.

## References

Armstrong DV (1994) Heat stress interaction with shade and cooling. J Dairy Sci 77:2044–2050

Barash H, Silanikove N, Shamay A, Ezra E (2001) Interrelationships among ambient temperature, day length, and milk yield in dairy cows under a Mediterranean climate. J Dairy Sci 84:2314–2320

Berman A, Folman YM, Kaim M, Mamen Z, Herz D, Wolfenson A, Graber Y (1985) Upper critical temperatures and forced ventilation effects for high-yielding dairy cows in a tropical climate. J Dairy Sci 68:488–495

Berman A, Horovitz T (2012) Radiant heat loss, an unexploited path for heat stress reduction in shaded cattle. J Dairy Sci 95:3021–3031

Bernabucci U, Lacetera N, Ronchi B, Nardone A (2002) Effects of the hot season on milk protein fractions in Holstein cows. Anim Res 51:25–33

Bernabucci U, Lacetera N, Baumgard LH, Rhoads RP, Ronchi B, Nardone A (2010) Metabolic and hormonal acclimation to heat stress in domesticated ruminants. Animal 4:1167–1183

Bernabucci U, Biffani S, Buggiotti L, Vitali A, Lacetera N, Nardone A (2014) The effects of heat stress in Italian Holstein dairy cattle. J Dairy Sci 97:471–486

Bianca W, Findlay JD (1962) The effect of thermally induced hyperpnoea on the acid-base status of the blood of calves. Res Vet Sci 3:38–49

Bianca W (1965) Reviews of the progress in dairy science. Cattle in hot environment. J Dairy Res 32:291–345

Bohmanova J, Misztal I, Cole JB (2007) Temperature-humidity indices as indicators of milk production losses due to heat stress. J Dairy Sci 90:1947–1956

Bond TE, Kelly CF, Garrett WN, Hahn GL (1961) Livestock shades. Calif Agri 15:7

Bouraoui R, Lahmar M, Majdoub A, Djemali M, Belyea R (2002) The relationship of temperature-humidity index with milk production of dairy cows in a Mediterranean climate. Anim Res 51:479–491

Calegari F, Calamari L, Frazzi E (2012) Misting and fan cooling of the rest area in dairy barn. Int J Biometeorol 56:287–295

Correa-Calderón A, Armstrong D, Ray D, DeNise S, Enns M, Howison C (2004) Thermoregulatory responses of Holstein and Brown Swiss heat-stressed dairy cows to two different cooling systems. Int J Biometeorol 48:142–148

Coulon JB, D'hour P (1994) The effect of level of concentrate feeding on the performance of dairy cows of different breeds. Ann Zootech 43: 355–368

Coulon JB, Dupont D, Pochet S, Pradel P, Duployer H (2001) Effect of genetic potential and level of feeding on milk protein composition. J Dairy Res 68:569–577

Do Amaral BC, Connor EE, Tao S, Hayen MJ, Bubloz JW, Dahl GE (2011) Heat stress abatement during the dry period influences metabolic gene expression and improves immune status in the transition period of dairy cows. J Dairy Sci 94:86–97

Du Preez JH, Hatting PJ, Giesecke WH, Eisenberg BE (1990) Heat stress in dairy cattle and other livestock under southern African conditions. III. Monthly temperature-humidity index mean values and their significance in the performance of dairy cattle. Onderstepoort J Vet Res 57:243–248

Fatehi F, Zali A, Honarvar M, Dehghan-banadaky M, Young AJ, Ghiasvand M, Eftekhari M (2012) Review of the relationship between milk urea nitrogen and days in milk, parity, and monthly temperature mean in Iranian Holstein cows. J Dairy Sci 95:5156–5163

FGE – France Génétique Elevage (2015) http://en.france-genetique-elevage.org/Tarentaise,370.html and http://en.france-genetique-elevage.org/Prim-Holstein,366.html. Accessed 10 January 2017

Hammami H, Bormann J, M'hamdi N, Montaldo HH, Gengler N (2013) Evaluation of heat stress effects on production traits and somatic cell score of Holsteins in a temperate environment. J Dairy Sci 96:1844–1855

Hojman D, Kroll O, Adin G, Gips M, Hanochi B, Ezra E (2004) Relationships between milk urea and production, nutrition and fertility traits in Israeli dairy herds. J Dairy Sci 87:1001–1011

Idele (2015) Résultats du Contrôle laitier-Espèce bovine 2015. P.111

Igono MO, Johnson HD, Steevens BJ, Hainen WA, Shanklin MD (1988) Effect of season on milk temperature, milk growth hormone, prolactin and somatic cell counts of lactating cattle. Int J Biometeorol 32: 194–200

Itoh F, Obara Y, Rose MT, Fuse H (1998) Heat influences on plasma insulin and glucagon in response to secretogogues in non-lactating dairy cows. Domest Anim Endocrinol 15:499–510

Janni KA, Allen DM (2001) Thermal environmental conditions in curtain-sided naturally ventilated dairy free-stall barns. Pages 367–376 in Livestock Environment Proc 6th Int. Symp Louisville KY American Society of Agricultural Engineers S Joseph MI

Johnson HD, Ragsdale AC, Berry IL, Shanklin MD (1962) Effects of various temperature-humidity combinations on milk production of Holstein cattle. Res Bull No 791. College of Agriculture, Agricultural Experimental Station, Univ of Missouri, Colombia

Johnson HD, Ragsdale AC, Berry IL, Shanklin MD (1963) Temperature-humidity effects including of acclimation in fed and water consumption of Holstein cattle. Res Bull No 846. College of Agriculture, Agricultural Experimental Station, Univ of Missouri, Colombia

Johnson HD, Vanjonack WJ (1976) Effects of environmental and other stressors on blood hormone patterns in lactating animals. J Dairy Sci 59:1603–1617

Johnson HD (1985) Physiological responses and productivity of cattle. In: Youssef MK (ed) Stress physiology in livestock. Basic principles, vol 1. CRC Press, Boca Raton, Florida, pp 4–19

Kadzere CT, Murphy MR, Silanikove N, Maltz E (2002) Heat stress in lactating dairy cows: a review. Livest Prod Sci 77:59–91

Kibler HH (1964) Thermal effects of various temperature-humidity combinations on Holstein cattle as measured by eight physiological responses. Univ of Missouri, Agricultural Experiment Station, Research Bulletin 120862:1–42

Knapp DM, Grummer RR (1991) Response of lactating dairy cows to fat supplementation during heat stress. J Dairy Sci 74:2573–2579

Kress DD, Doornbos DE, Anderson DC, Davis KC (1995) Tarentaise and Hereford breed effects on cow and calf traits and estimates of individual heterosis. J Anim Sci 73:2574–2578

McDowell RE, Hooven NW, Camoens JK (1976) Effects of climate on performance of Holsteins in first lactation. J Dairy Sci 59:965–973

NIC (2009) North Africa: the impact of climate change to 2030 (selected countries). In: Special report. NIC 2009-07D, pp1–56

Nickerson SC (1987) Mastitis management under hot, humid conditions. In: Proceeding of the dairy herd management conference, Macon, GA, pp32–38

Paape MJ, Schultze WD, Miller RH, Smith JW (1973) Thermal stress and circulating erythrocytes, leucocytes, and milk somatic cells. J Dairy Sci 56:84–91

Purwanto BP, Abo Y, Sakamoto R, Furumoto F, Yamamoto S (1990) Diurnal patterns of heat production and heart rate under thermoneutral conditions in Holstein Friesian cows differing in milk production. J Agri Sci (Camb) 114:139–142

Ragsdale AC, Thompson HJ, Worstell DM, Brody S (1953) The effect of humidity on milk production and composition, feed and water consumption and body weight in cattle. Mo Agr Exp Sta Res Bull 521

Ravagnolo O, Misztal I (2000) Genetic component of heat stress in dairy cattle, parameter estimation. J Dairy Sci 83:2126–2130

Rejeb M, Najar T, Ben M'rad M (2012) The effect of heat stress on dairy cows performance and animal behaviour. Int J Pl An and Env Sci 3: 29–34

Rejeb Bellil M (2014) Etude de la physiologie, du comportement alimentaire et des performances des vaches à faible et à forte production laitière dans les conditions du stress thermique. PhD Thesis. INAT, Tunis

Rekik B, Bouraoui R, Ben Gara A, Hammami H, Hmissi M, Rouissi H (2009) Milk production of imported heifers and Tunisian-born Holstein cows. Am-Euras J Agron 2:36–42

Rosenkrans C Jr, Banks A, Reiter S, Looper M (2010) Calving traits of crossbred Brahman cows are associated with heat shock protein 70 genetic polymorphisms. Anim Reprod Sci 119:178–182

Roussel JD, Ortego JD, Gholson JH, Frye JB (1969) Effect of thermal stress on the incidence of abnormal milk. J Dairy Sci 52:912

SAS Institute Inc. (2013) SAS/STAT® 9.4 user's guide, 2nd edn. SAS Institute Inc., Cary

Sharma AK, Rodriguez LA, Mekonnen G, Wilcox CJ, Bachman KC, Collier RJ (1983) Climatological and genetic effects on milk composition and yield. J Dairy Sci 66:119–126

Shock DA, LeBlanc SJ, Leslie KE, Hand K, Godkin MA, Coe JB, Kelton DF (2016) Studying the relationship between on-farm environmental conditions and local meteorological station data during the summer. J Dairy Sci 99:2169–2179

Shoshani E, Hetzroni A (2013) Optimal barn characteristics for high-yielding Holstein cows as derived by a new heat-stress model. Animal 7:176–182

Shütz KE, Cox NR, Mattews LR (2008) How important is shade to dairy cattle? Choice between shade or lying following different levels of lying deprivation. Appl Anim Behav Sci 114:307–318

Silanikove N (2000) Effects of heat stress on the welfare of extensively managed domestic ruminants. Livest Prod Sci 67:1–18

Smith TR, Chapa A, Willard S, Herndon C Jr, Williams RJ, Crouch J, Riley T, Pogue D (2006) Evaporative tunnel cooling of dairy cows in the southeast. II: impact on lactation performance. J Dairy Sci 89: 3915–3923

Smith DL, Smith T, Rude BJ, Ward SH (2013) Short communication: comparison of the effects of heat stress on milk and component yields and somatic cell score in Holstein and Jersey cows. J Dairy Sci 96:3028–3033

Stowell R, Gooch C, Inglis S (2001) Performance of tunnel ventilation for free-stall dairy facilities as compared to natural ventilation with supplemental cooling fans. Pages 29–40 in. Livestock Environment, Proc 6th Int Symp, Louisville, KY American Society of Agricultural Engineers, ST Joseph, MI

Thatcher WW, Flamenbaum I, Block J, Bilby TR (2010) Interrelationships of heat stress and reproduction in lactating dairy cows. In: High plains dairy conference, Amarillo, Texas, pp46–60

Thom EC (1959) The discomfort index. Weatherwise 12:57–60

Waage S, Sviland S, Odeogaard SA (1998) Identification of risk factors for clinical mastitis in dairy heifers. J Dairy Sci 81:1275–1284

Wegner TN, Schuh JD, Nelson FE, Stott GH (1974) Effect of stress on blood leucocytes and milk somatic cell counts in dairy cows. J Dairy Sci 59:949–956

West JW (1994) Interactions of energy and bovine somatotropin with heat stress. J Dairy Sci 77:2091–2102

West JW (2003) Effects of heat-stress on production in dairy cattle. J Dairy Sci 86:2131–2144

Wheelock JB, Rhoads RP, Van Baale MJ, Sanders SR, Baumgrad LH (2010) Effects of heat stress on energetic metabolism in lactating Holstein cows. J Dairy Sci 93:644–655

Yousef MK (1985) In: Basic principles. Stress physiology in livestock, vol Vol 1. CRC Press, Boca Raton, FL

# The interest of a mountain dairy cow breed to cope with Mediterranean summer heat stress

**R. Bellagi[1,2,3,*], D. Pomiès[1,2], B. Martin[1,2] and T. Najar[3]**

[1]INRA, UMR1213 Herbivores, F-63122 Saint-Genès Champanelle (France)
[2]Clermont Université, VetAgro Sup, UMR1213 Herbivores,
BP 10448, F-63000 Clermont-Ferrand (France)
[3]INAT, Département des ressources animales, halieutiques
et technologies agro-alimentaires, 1082 Tunis (Tunisia)
*e-mail: bellagi.rahma@yahoo.com

**Abstract.** The Tarentaise cow, a rustic breed from the norther part of the French Alps, is well adapted to the mountain harsh conditions, in particular during the summer season due to its ability to use efficiently the highland pastures. The Tunisian farmers also consider that the Tarentaise cows are well adapted to the Mediterranean climate. The aim of this work was to quantify the effect of summer heat stress on milk yield and quality of Tarentaise cows in comparison to Holstein cows. A dataset was collected for 441 Tarentaise and 560 Holstein cows reared in 21 farms in Tunisia from 2009 to 2014. This data comprising 16,400 monthly individual records of milk yield, fat, protein, urea and somatic cell count was merged with meteorological data from 5 public stations relative to the 21 farms. The temperature-humidity index (THI) calculated as a combination of ambient temperature (Ta) and relative humidity (RH) was used to characterize heat stress. Tarentaise and Holstein cows produced 11.4 and 14.8 kg/d of milk respectively. When THI increased from an average value of 53.7 in winter to 75.4 in summer, the Holstein and Tarentaise cows decreased their production by 0.93 and 0.15 kg/d respectively. Milk fat, protein and urea content decreased similarly in both breeds (-0.22 g/kg, -0.14 g/kg and -14 mg/L respectively) and milk somatic cell count increased for Holstein cows (+352,000 /mL) while it decreased slightly for Tarentaise cows (-160,000 /mL). The Tarentaise cows seem to be more resistant to heat stress than Holstein cows, especially when THI is over 78.

**Keywords.** Tarentaise cow – Heat stress – Temperature-humidity index – Milk yield – Milk composition.

***L'intérêt d'une race bovine laitière de montagne pour faire face aux conditions de stress thermique méditerranéen***

***Résumé.*** *La race Tarentaise, originaire des Alpes françaises, est particulièrement adaptée aux conditions montagneuses, précisément pendant la saison estivale. Cette race rustique est aussi appréciée des éleveurs tunisiens qui la considèrent comme bien adaptée au climat méditerranéen. L'objectif de cette étude était de quantifier l'effet du stress thermique sur les performances de production de la race Tarentaise en comparaison avec la race Holstein. Une base de données contenant 16 400 contrôles laitiers individuels de 441 Tarentaise et 560 Holstein élevées dans 21 exploitations en Tunisie, a été collectée entre 2009 et 2014 puis fusionnée avec les données météorologiques de 5 stations publiques. A partir des températures ambiantes et des humidités relatives, un index humidité-température (THI) a été calculé afin de comparer entre les deux races son effet sur la production laitière, le taux butyreux (TB), le taux protéique (TP), l'urée et le comptage des cellules somatiques (CCS). Les vaches Tarentaise et Holstein ont produit respectivement 11,4 et 14,8 kg/j de lait. Quand le THI passe d'une valeur moyenne de 53,7 en hiver à 75,4 en été, la production laitière de la Holstein et la Tarentaise baissent respectivement de 0,93 et 0,15 kg/j. Le TB, le TP et l'urée ont aussi chuté pour les deux races (-0,22 g/kg, -0,14 g/kg et -14 mg/L, respectivement) alors que le CCS a augmenté pour les Holstein (+352 000 /mL) et a baissé légèrement pour les Tarentaise (-160 000 /mL). La Tarentaise semble mieux résister au stress thermique que la Holstein, notamment quand le THI est supérieur à 78.*

***Mots-clés.*** *Vache Tarentaise – Stress thermique – Index température-humidité – Production laitière – Composition du lait.*

## I – Introduction

High temperatures associated with elevate relative humidity are the principal origin of heat stress. This may prompt physiological dysfunction that negatively affects animal's production capacity. A temperature-humidity index (THI) was established to allow modeling the impact of heat stress on production traits of dairy cattle (Johnson, 1985). According to Johnson (1985) and Du Preez *et al.* (1990), the milk production is not affected when the THI is between 35 and 72. Moreover, under Mediterranean climatic conditions of Tunisia, Bouraoui *et al.* (2002) reported that milk yield began to decline when THI reached 68; and as the THI values increased from 68 to 78 during the summer period, heat stress reduced daily cow's milk yield by 21%. Some observations (Nickerson, 1987; Du Preez *et al.*, 1990) have suggested that heat stress is often associated with changes in milk composition and milk somatic cell count (SCC). On the other hand, the effect of heat stress is increased for high producing cows, as Holstein cows. According to Smith *et al.* (2013), selecting most suitable cattle for heat stress tolerance can be reached by discovering differences between dairy breeds. In Tunisia, Tarentaise cow, a mountain breed originating from the French Alps, was imported to achieve self-sufficiency in meat and milk. Dairy producers consider that Tarentaise cows are well suited to the Mediterranean climate of Tunisia. The aim of the present study is to compare the milk yield and composition of Tarentaise and Holstein cows under the climatic conditions of Tunisia.

## II – Materials and methods

A dataset, provided by the genetic improvement direction of Sidi Thabet (Tunisia), contained individual data of 441 Tarentaise and 560 Holstein cows from 21 farms, obtained monthly between 2009 and 2014. This dataset included 16,400 individual records of milk yield, fat, protein, urea and somatic cell count. A meteorological dataset comprising monthly records of ambient temperature (Ta, in °C) and relative humidity (RH, in %) was obtained from 5 public weather stations in Tunisia, relative to the 21 herds over the five years. The THI index was calculated using equation as follows: THI = 1.8×Ta - [1-RH] × [Ta-14.3] + 32 (Kibler 1964).

The THI was merged with production traits by assigning each dairy control of each farmer to the monthly weather records from the nearest weather station. Dairy cows were considered under hot climatic condition when THI is over 72. Later, Silanikove's (2000) classification of THI was used where heat stress is categorized as: without effect, light, moderate and extreme. The corresponding THI thresholds were: THI<70, 70≤THI<75, 75≤THI<78 and THI≥78. The aim of this classification was to have a better visualisation of the effect of heat stress on production traits of Tarentaise and Holstein cows. Days in milk classes (DIM) were established according to the following thresholds: <120, 120-179, 180-300, and >300. Additionally, parity of all cows was classified into 4 ranges corresponding to the rank of lactation: first, second, third and "four and more".

The final data were analysed using Proc Mixed of SAS (version 9.4; SAS Institute, 2013). The effects of heat stress, breed and the interaction (THI×breed) on milk yield, milk components and SCC (expressed in $\log_{10}$/mL) were tested using the following model: $\mathbf{Y_{ijklmn} = \mu + t_i + b_j + tb_{ij} + f_k + d_l + p_m + c(f)_n + e_{ijklmn}}$ where $Y_{ijklmn}$ is a measurement of milk yield, fat, protein, urea or SCC; μ is the population mean; t is the fixed effect for numeral THI (or in classes for the second milk yield analyse) i; b is the fixed effect for breed j; tb is the interaction THI×breed ij; f is the fixed effect for farmer k; d is the fixed effect for DIM class l; p is the fixed effect for parity class m; c(f) is the random effect for cow nested within the farmer (f) n; and $e_{ijklmn}$ is the residual error.

## III – Results and discussion

The milk traits of both breeds were significantly affected by heat stress (Table 1). As expected, the average milk yield was higher for Holstein than for Tarentaise cows (+3.4 kg/d, P<0.001). Moreover,

there is a significant interaction between THI and breed for milk yield. As THI increased from 53.7 in winter (mean value of the coolest months where Ta = 11.8°C and RH = 76%) to 75.4 in summer (Ta = 27.0°C and RH = 59.8%), Holstein milk yield decreased by 0.93 kg/d (-6%) while Tarentaise milk yield decreased by 0.15 kg/d (-1%). The decline in milk yield under heat stress conditions was also highlighted in earlier studies, confirming that exposure of dairy cows to high values of THI causes a reduction in milk yield from 10 to 34% (Du Preez *et al.*, 1990; Itoh *et al.*, 1998). Smith *et al.* (2013) found that when THI exceeds 72, Holstein milk yield decreased from 35.6 to 34.2 kg/d (-3.9%).

**Table 1. Effects of breed and temperature-humidity index (THI) on milk yield and milk composition**

| | Holstein | Tarentaise | THI | Breed | THI × breed |
|---|---|---|---|---|---|
| Milk yield (kg/d) | 14.8 | 11.4 | *** | *** | *** |
| Fat (g/kg) | 38.2 | 37.2 | *** | NS | NS |
| Protein (g/kg) | 31.8 | 32.6 | *** | NS | NS |
| Urea (mg/L) | 212 | 213 | *** | NS | NS |
| SCC ($log_{10}$/mL) | 5.47 | 5.42 | NS | *** | *** |

NS (non-significant) P>0.05; *** P<0.001.

The effect of heat stress on milk yield is not linear but it increases with high THI (Silanikove, 2000; Smith *et al.*, 2013). The 4 ranges Silanikove's classification gave an appropriate visualisation of the non-linear effect of THI (Fig. 1). The decline in milk yield for the Holstein cows started as THI changed from 'without effect' range to 'light' range. Moreover, this decline in milk yield was more rapid for Holstein cows than Tarentaise between the ranges 'moderate' and 'extreme' (-0.82 *vs.* -0.13 kg/d).

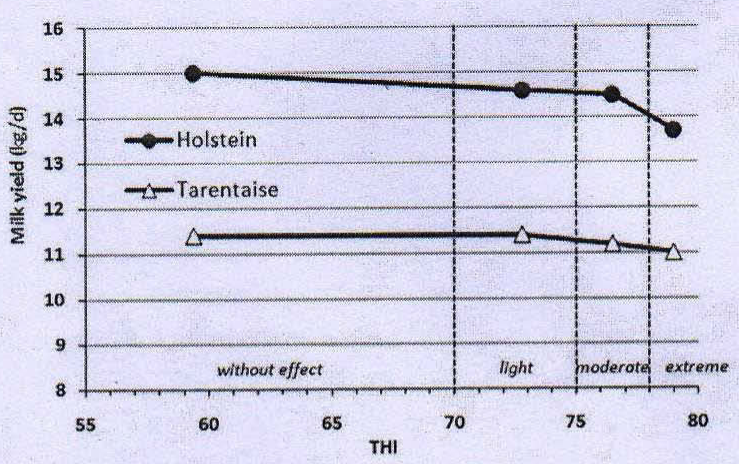



**Fig. 1. Average milk yield by breed and Silanikove's ranges of temperature-humidity index (THI).**

There was no difference between the two breeds regarding the milk composition. However, THI affected milk fat, protein and urea contents in both Holstein and Tarentaise cows (Table 1). Temperature-humidity index decreased milk fat content (-0.22 g/kg), which agrees with the reduction from 3.79 to 3.65% when THI rose from 65.6 to 83.9 in summer (Rejeb Bellil, 2014). Conversely, other studies carried on Holstein cows reported that heat stress either increased (THI>68; Bouraoui

*et al.*, 2002) or did not have an effect on milk fat (THI>72.4; Wheelock *et al.*, 2010). Milk protein percentage also decreased with THI (-0.14 g/kg) between winter and summer. These results are in agreement with those reported by Barash *et al.* (2001). In addition, concentration of urea in milk decreased by 14 mg/L between winter and summer season. However, Hojman *et al.* (2004) reported higher milk urea concentration during the summer months and a lowest concentration in November (181 *vs.*118 mg/L). These authors suggested that it was probably due to changes in the nutritional content of the cow's diet.

The SCC of the milk reflected the interaction between breed and THI (P<0.001). On average, Holstein had higher SCC than Tarentaise cows (P<0.001). During heat stress, the SCC from Holstein cows increased by 352,000 /mL while the SCC from Tarentaise cows decreased by 160,000 /mL. This result is counter to the common idea that elevated THI is often associated with greater SCC. Hammami *et al.* (2013) explained the higher SCC in milk observed in heat stress by the depressive immune function during the hot season.

## IV – Conclusions

According to the current results, heat stress decreased milk yield and induced changes in milk composition for both breeds. However, Tarentaise cows seem to be more resistant than Holstein cows, especially when THI is over 78 as very often in the summer climatic conditions of Tunisia. The next step of this study is to quantify the metabolic and physiologic responses of Tarentaise cows under heat stress conditions.


## Acknowledgments

The authors express their gratitude to the Genetic Improvement Direction of Sidi Thabet and to the National Institute of Meteorology of Tunisia for their collaboration.


## References


**Barash H., Silanikove N., Shamay A. and Ezra E., 2001.** Interrelation ships among ambiant temperature, day lengh, and milk yield in dairy cows under a Mediterranean climate. *Journal of Dairy Science,* 84, 2314-2320.

**Bouraoui R., Lahmar M., Majdoub A., Djemali M. and Belyea R., 2002.**The relationship of temperature-humidity index with milk production of dairy cows in a Mediterraneen climate. *Animal Research,* 51, 479-491.

**Du Preez J.H., Hatting P.J., Giesecke W.H. and Eisenberg B.E., 1990.** Heat stress in dairy cattle and other livestock under Southern African conditions. III. Monthly temperature-humidity index mean values and their significance in the performance of dairy cattle. Onderstepoort. *Journal of Veterinary Research,* 57, 243-248.

**Hammami H., Bormann J., M'hamdi N., Montaldo H.H. and 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, 1844-1855.

**Hojman D., Kroll O., Adin G., Gips M., Hanochi B. and Ezra E., 2004.** Relationships between milk urea and production, nutrition and fertility traits in Israeli dairy herds. *Journal of Dairy Science,* 87, 1001-1011.

**Itoh F., Obara Y., Rose M.T. and Fuse H., 1998.** Heat influences on plasma insulin and glucagon in response to secretogogues in non lactating dairy cows. *Domestic Animal Endocrinology,* 15, 499-510.

**Johnson H.D., 1985.** Physiological reponses and productivity of cattle. In: Youssef M.K.(Ed), *Stress physiology in livestock. Basic principles*, Vol.1, 4-19, CRC Press, Boca Raton, Florida.

**Kibler H.H., 1964.** Thermal effects of various temperature-humidity combinations on Holstein cattle as measured by eight physiological responses. *University of Missouri Agricultural Experiment Station, Research Bulletin,* 120862, 1-42.

**Nickerson S.C., 1987.** *Mastisis management under hot, humid conditions.* Proceedings of the dairy herd management conference, Macon, GA, February, 9-11, 1987, pp. 32-38.

**Rejeb Bellil M., 2014.** *Etude de la physiologie, du comportement alimentaire et des performances des vaches à faible et à forte production laitière dans les conditions du stress thermique.* Thèse de doctorat, INAT, 162 p.

# La Tarentaise semble mieux résister que la Holstein au climat méditerranéen
## *Tarentaise cows seem to be more resistant than Holstein to the Mediterranean weather*

BELLAGI R. (1, 2, 3), POMIÈS D. (2, 3), MARTIN B. (2, 3), NAJAR T. (1)
(1) INAT, Département des ressources animales, halieutiques et technologies agro-alimentaires, 1082 Tunis, Tunisie
(2) INRA, UMR1213 Herbivores, F-63122 Saint-Genès-Champanelle, France
(3) Clermont Université, VetAgro Sup, UMR1213 Herbivores, BP 10448, F-63000 Clermont-Ferrand, France

## INTRODUCTION

La race Tarentaise a été réintroduite en Tunisie dans les années 1990, en raison de ses nombreux atouts (rusticité, valorisation des rations pauvres…).Cette race est bien appréciée des éleveurs tunisiens qui, de plus, la considèrent comme bien adaptée au climat de type méditerranéen avec des hivers doux et humides et des étés chauds et secs. Les températures estivales entraînent un stress thermique qui induit une baisse des performances, surtout chez les vaches hautes productrices comme la Holstein (Kadzere, 2002). L'objectif de cette étude est donc de vérifier que la Tarentaise résiste mieux que la Holstein aux conditions climatiques méditerranéennes.

## 1. MATERIEL ET METHODES

Cette étude s'appuie sur une base de données de 16 400 contrôles laitiers individuels réalisés entre 2009 et 2014 dans 21 exploitations laitières de 5 régions de Tunisie (Bizerte, Beja, Jendouba, Siliana et le Grand-Tunis) élevant des vaches Tarentaise (TRT), Holstein (HST), ou les deux races ensemble. Cette base, fournie par la direction de l'amélioration génétique de l'Office de l'Élevage et des Pâturages, contient les contrôles mensuels de 441 TRT et 560 HST. A partir des températures ambiantes moyennes (Ta) et des humidités relatives (RH) transmises par l'Institut National de météorologie, nous avons calculé et associé à chaque contrôle laitier de chaque éleveur un index humidité-température (THI = 1,8×Ta - [1-RH]×[Ta-14,3] + 32) habituellement utilisé pour quantifier l'effet du stress thermique sur les vaches laitières (Kibler,1964). Ces données ont permis de comparer l'impact du stress thermique entre les deux races sur la production laitière (PL), le taux butyreux (TB), le taux protéique (TP), l'urée et le comptage des cellules somatiques (CCS) du lait. Cette comparaison a été réalisée par analyse de variance (logiciel SAS 9.2 ; modèle mixte) en introduisant dans le modèle statistique l'éleveur, l'animal, le rang de lactation (1 ; 2 ; 3 ; ≥4), le stade de lactation (<120 j ; 120-179 j ; 180-300 j ; >300 j), la race (TRT ; HST), le THI (variable continue) et l'interaction THI*race.

## 2. RESULTATS ET DISCUSSION

Comme attendu, la production laitière des TRT est en moyenne inférieure de 3,4 kg/j à celle des HST (Tableau 1). L'effet du THI sur la quantité de lait produite par les deux races est significatif (P<0,001) et il existe une interaction entre le THI et la race. Par exemple, la production laitière moyenne des HST chute 6 fois plus que celle des TRT (-0,93 *vs* -0,15 kg/j) entre les mois les plus frais (janvier, février, mars ; Ta = 11,8°C, RH = 76% et THI = 53,7) et les plus chauds (juillet, août, septembre ; Ta = 27,0°C, RH = 59,8% et THI = 75,4). En moyenne, il n'y a pas de différence de TB, TP et urée du lait entre les deux races. Cependant, le THI élevé est associé à une baisse (P<0,001) de ces 3 paramètres, identique chez TRT et HST. Cette baisse, conforme à la bibliographie (Rejeb Bellil, 2014), est ici de 0,22 g de matières grasses et 0,14 g de matières protéiques par kg de lait, et de 14 mg d'urée par L de lait entre les deux périodes définies précédemment. Le CCS des HST est supérieur à celui des TRT (P<0,001), mais contrairement à ce qui est observé classiquement (Smith et *al*., 2013 ; Rejeb Bellil, 2014) l'élévation du THI n'entraine pas d'augmentation des CCS moyens. Par contre, il existe une interaction entre le THI et la race ; par exemple entre les mois les plus frais et les plus chauds (situation précédente), le CCS des HST augmente de 352×10$^3$/mL alors qu'il baisse de 160×10$^3$/mL pour les TRT.

**Tableau 1** : Effets du THI et de la race sur la production laitière et la composition du lait

| | HST | TRT | THI | Race | THI*race |
|---|---|---|---|---|---|
| PL *(kg/j)* | 14,8 | 11,4 | *** | *** | *** |
| TB *(g/kg)* | 38,2 | 37,8 | *** | NS | NS |
| TP *(g/kg)* | 31,8 | 32,6 | *** | NS | NS |
| urée *(mg/L)* | 212 | 213 | *** | NS | NS |
| CCS *($log_{10}$/mL)* | 5,47 | 5,42 | NS | *** | *** |

NS (non significatif) P>0,05 ; *** P<0,001

Pour de nombreux auteurs (Silanikove, 2000 ; Smith et *al.,* 2013), l'effet du THI sur le stress thermique des vaches laitières n'est pas linéaire mais s'amplifie avec les THI les plus élevés. Nous avons donc repris la classification des THI de Silanikove (2000) à 4 niveaux (voir Figure 1), afin de mieux visualiser l'effet du stress thermique sur la variation de PL des deux races. On remarque que la chute de PL est bien plus importante pour les HST que pour les TRT entre les classes « modéré » et « extrême » (-0,82 *vs* -0,13 kg/j).

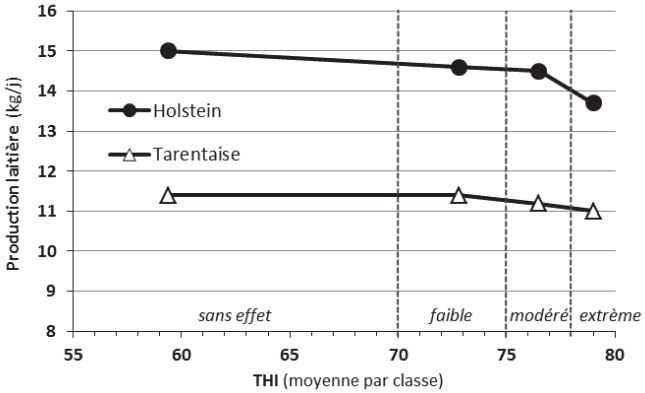



**Figure 1** : Production laitière moyenne des deux races par classe de THI [1]

[1] Sans effet = THI<70 ; Stress faible = 70≤THI<75 ; Stress modéré = 75≤THI<78 ; Stress extrême = THI≥78

## CONCLUSION

En matière de production laitière, la Tarentaise résiste mieux que la Holstein à des conditions de stress thermique extrême. La prochaine étape de cette étude est de quantifier la réaction des vaches Tarentaise soumises à un stress thermique, sur le plan métabolique et physiologique.

**Kadzere C.T., Murphy M.R., Silanikove N., Maltz E., 2002.** Livest. Prod. Sci., 77, 59-91
**Kibler H.H., 1964.** Research Bulletin, 862
**Rejeb Bellil M., 2014.** Thèse INAT, 162 p
**Silanikove N., 2000.** Livest. Prod. Sci., 67, 1-18
**Smith D.L., Smith B., Rude B.J., Ward S., 2013.** J.Dairy Sci., 96, 3028-3033