



HAL
open science

Comportement et physiologique de vaches laitières hautes productrices en période chaude: effets d'un matelas de logettes à eau refroidie

Mélanie Tourillon

► **To cite this version:**

Mélanie Tourillon. Comportement et physiologique de vaches laitières hautes productrices en période chaude: effets d'un matelas de logettes à eau refroidie. Sciences du Vivant [q-bio]. 2022. dumas-03857862

HAL Id: dumas-03857862

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03857862>

Submitted on 17 Nov 2022

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.

ANNEE 2022 - Thèse n° 60

**COMPORTEMENT ET PHYSIOLOGIE DE
VACHES LAITIÈRES HAUTES
PRODUCTRICES EN PÉRIODE CHAUDE :
EFFETS D'UN MATELAS DE LOGETTES À
EAU REFROIDIE**

THÈSE

pour l'obtention du diplôme d'État de
DOCTEUR VÉTÉRINAIRE
présentée et soutenue publiquement devant
l'UFR de Médecine de l'Université de Nantes
le 11 octobre 2022

par

Mélanie TOURILLON

Sous la direction de

Anne RELUN

Président du jury : Monsieur LUSTENBERGER
Professeur à la Faculté de Médecine de Nantes

Membres du jury : Madame RELUN
Maître de Conférence en médecine des animaux d'élevage à Oniris

Monsieur GUATTEO
Professeur en médecine des animaux d'élevage à Oniris

ANNEE 2022 - Thèse n° 60

**COMPORTEMENT ET PHYSIOLOGIE DE
VACHES LAITIÈRES HAUTES
PRODUCTRICES EN PÉRIODE CHAUDE :
EFFETS D'UN MATELAS DE LOGETTES À
EAU REFROIDIE**

THÈSE

pour l'obtention du diplôme d'État de
DOCTEUR VÉTÉRINAIRE
présentée et soutenue publiquement devant
l'UFR de Médecine de l'Université de Nantes
le 11 octobre 2022

par

Mélanie TOURILLON

Sous la direction de

Anne RELUN

Président du jury : Monsieur LUSTENBERGER
Professeur à la Faculté de Médecine de Nantes

Membres du jury : Madame RELUN
Maître de Conférence en médecine des animaux d'élevage à Oniris

Monsieur GUATTEO
Professeur en médecine des animaux d'élevage à Oniris

Liste des membres du corps enseignant

Département BPSA Biologie, Pathologie et Sciences de l'Aliment		
Responsable : Emmanuel JAFFRES – Adjointe : Frédérique NGUYEN		
Nutrition et Endocrinologie		
Pharmacologie et Toxicologie	Jean-Claude DESFONTIS (Pr) Yassine MALLEM (Pr) Hervé POULIQUEN (Pr)	Antoine ROSTANG (MC) Meg-Anne MORICEAU (CERC)
Physiologie fonctionnelle, cellulaire et moléculaire	Lionel MARTIGNAT (Pr) Julie HERVE (MC HDR) Grégoire MIGNOT (MC) Adélie SALIN (CERC)	
Histologie et anatomie pathologique	Marie-Anne COLLE (Pr) Jérôme ABADIE (MC)	Laetitia JAILLARDON (MC) Frédérique NGUYEN (MC)
Pathologie générale, microbiologie et immunologie	Hervé SEBBAG (MC)	
Biochimie alimentaire industrielle	Carole PROST (Pr) Joëlle GRUA (MC) Florence TEXIER (MC)	Clément CATANEO (MC) Alix KHALIL (CERC) Laurent LE THUAUT (MC)
Microbiotech	Hervé PREVOST (Pr) Géraldine BOUE (MC) Nabila HADDAD (MC)	Emmanuel JAFFRES (MC) Mathilde MOSSER (mc) Boris MISERY (CERC) Raouf TAREB (MC)
Département SAESP Santé des Animaux d'Élevage et Santé Publique		
Responsable : Raphaël GUATTEO – Adjoint : Jean-Michel CAPPELIER		
Élevage, nutrition et santé des animaux domestiques	Nathalie BAREILLE (Pr) François BEAUDEAU (Pr) Christine FOURICHON (Pr) Lucile MARTIN (Pr)	Juan Manuel ARIZA CHACON (CERC) Ségolène CALVEZ (MC) Aurélien MADOUASSE (MC) Nora NAVARRO-GONZALES (MC)
Infectiologie	Alain CHAUVIN (Pr) François MEURENS (Pr) Emmanuelle MOREAU (Pr) Nathalie RUVOEN-CLOUET (Pr)	Albert AGOULON (MC) Suzanne BASTIAN (MC) Léa LOISEL (CERC) Kenny OBERLE (CERC) Nadine RAVINET (MC)
Médecine des animaux d'élevage	Catherine BELLOC (Pr) Christophe CHARTIER (Pr) Raphaël GUATTEO (Pr) Anne RELUN (MC)	Sébastien ASSIE (MC) Isabelle BREYTON (MC) Mily LEBLANC MARIDOR (MC) Maud ROUAULT (AERC)
Hygiène et qualité des aliments	Jean-Michel CAPPELIER (Pr) Michel FEDERIGHI (Pr) Bruno LE BIZEC (Pr) Marie-France PILET (Pr)	Eric DROMIGNY (MC HDR) Fanny RENOIS-MEURENS (MC HDR) Sofia STRUBBIA (CERC)

Département DSC Sciences cliniques		
Responsable : Catherine IBISCH – Adjoint : Olivier GAUTHIER		
Anatomie comparée	Eric BETTI (MC) Claude GUINTARD (MC) Margarida RIBEIRO DA SILVA NEUNLIST (CERC)	
Pathologie chirurgicale et anesthésiologie	Eric AGUADO (Pr) Olivier GAUTHIER (Pr) Eric GOYENVALLE (MC HDR)	Pierre MAITRE (MC) Caroline TESSIER (MC) Gwénola TOUZOT-JOURDE (MC)
Dermatologie, parasitologie des carnivores et des équidés, mycologie	Jacques GUILLOT (Pr) Emmanuel BENSIGNOR (Pr Ass)	
Médecine interne, imagerie médicale et législation professionnelle vétérinaire	Anne COUROUCE (Pr) Jack-Yves DESCHAMPS (Pr) Françoise ROUX (Pr) Juan HERNANDEZ-RODRIGUEZ (Pr Ass) Nora BOUHSINA (MC)	Nicolas CHOUIN (MC) Amandine DRUT (MC) Marion FUSELLIER-TESSON (MC) Catherine IBISCH (MC) Aurélia LEROUX (MC) Odile SENECAT (MC)
Biotechnologies et pathologie de la reproduction	Jean-François BRUYAS (Pr) François FIENI (Pr)	Djemil BENCHARIF (MC HDR) Lamia BRIAND (MC HDR)
Département GPA Génie des procédés alimentaires		
Responsable : Sébastien CURET-PLOQUIN – Adjointe : Vanessa JURY		
Lionel BOILLEREAUX (Pr) Sébastien CURET-PLOQUIN (Pr) Marie DE LAMBALLERIE (Pr) Francine FAYOLLE (Pr) Michel HAVET (Pr)	Alain LEBAIL (Pr) Olivier ROUAUD (Pr) Kévin CROUVISIER-URION (MC) Vanessa JURY (MC HDR) Emilie KORBEL (MC)	Jean-Yves MONTEAU (MC HDR) Eve-Anne NORWOOD (MC) Raphaël PORYLES (MC) Laurence POTTIER (MC) Cyril TOUBLANC (MC)
Département MSC Management, statistiques et communication		
Responsable : Samira ROUSSELIERE – Adjointe : Evelyne VIGNEAU		
Mathématiques, statistiques, informatique	El Mostafa QANNARI (Pr) Chantal THORIN (Pr Ag) Evelyne VIGNEAU (Pr)	Véronique CARIOU (MC HDR) Philippe COURCOUX (MC) Benjamin MAHIEU (MC) Michel SEMENOU (MC)
Economie, gestion, législation	Jean-Marc FERRANDI (Pr) Pascal BARILLOT (MC) Ibrahima BARRY (MC) Florence BEAUGRAND (MC)	Sibylle DUCHAINE (MC) Sonia MAHJOUB (MC) Samira ROUSSELIERE (MC)
Langues et communication	Marc BRIDOU (PLPA) David GOYLER (Ens. Cont.) Patricia JOSSE (Ens. Cont.)	Shaun MEEHAN (Ens. Cont.) Linda MORRIS (PCEA) Ian NICHOLSON (ENS. Cont.)

Pr Ag : Professeur Agrégé

Pr : Professeur

MC : Maître de Conférence

MCC : MC contractuel

PLPA : Professeur Lycée Professionnel Agricole

PCEA : Professeur Certifié Enseignement Agricole

HDR : Habilité à Diriger des Recherches

CERC : Chargé d'Enseignement et de Recherche Contractuel

Cont. : Enseignant Contractuel Ens.

La reproduction d'extraits est autorisée avec mention de la source. Toute reproduction partielle doit être fidèle au texte utilisé. Cette thèse devra donc être citée comme suit :

TOURILLON, M (2022). Physiologie et comportement de vaches laitières hautes productrices en période chaude : effets de matelas de logette à eau refroidie. Thèse de doctorat vétérinaire, Faculté de Médecine, Nantes. Oniris : Ecole Nationale Vétérinaire, Agroalimentaire et de l'Alimentation Nantes Atlantique, 138 p.

Le défaut de citation est considéré comme du plagiat. Ce dernier est puni par la loi française et passible de sanctions allant jusqu'à 3 ans d'emprisonnement et 300 000 € d'amande.

Table des matières

Table des équations.....	11
Table des figures.....	12
Table des tableaux.....	14
Liste des abréviations.....	16
Introduction.....	17
Partie I - Bibliographie : Comportement et physiologie des bovins laitiers lors de stress thermique	
I- Thermorégulation, stress thermique et physiologie chez les bovins.....	19
A- Mécanismes de thermorégulation chez les bovins.....	19
1- Thermogénèse des bovins.....	19
2- Thermolyse des bovins.....	20
3- Notion de confort thermique chez les bovins.....	20
B- Conditions de stress thermique et réponses physiologiques des vaches laitières (hors production laitière et reproduction).....	21
1- Les conditions de stress thermique chez les bovins.....	21
2- Réponses physiologiques des vaches laitières au stress thermique.....	27
II- Réponses comportementales des vaches laitières au stress thermique.....	31
A- Pour compenser les pertes hydriques.....	31
B- Pour faciliter l'évapotranspiration.....	32
1- Recherche d'ombre dans leur milieu de vie afin de réduire l'effet des radiations.....	32
2- Favoriser la position debout.....	32
C- Pour diminuer la production de chaleur.....	33
1- Diminution de l'activité.....	33
2- Diminution de la quantité d'aliment ingéré.....	33
III- Paramètres autres que le stress thermique pouvant influencer la physiologie et le comportement des vaches laitières.....	34
A- Parité, stade de lactation et niveau de production laitière.....	34
1- Parité.....	34
2- Niveau de production laitière.....	34
3- Stade de lactation.....	35
B- Race.....	35
C- Place hiérarchique.....	36
D- Logement et ration alimentaire.....	36
1- Logement.....	36
2- Ration alimentaire.....	36

E-	Maladies intercurrentes et œstrus.....	37
1-	Maladies intercurrentes	37
2-	Œstrus.....	38
IV-	Moyens et méthodes existants pour limiter le stress thermique chez les bovins laitiers	40
A-	Concernant les conditions d'hébergement.....	40
1-	Bâtiment et ombre : limitation du rayonnement solaire	40
2-	Rafraichissement par convection : la ventilation	41
3-	Rafraichissement par évaporation par aspersion d'eau sur l'animal.....	42
4-	Refroidissement par conduction grâce aux matelas de logettes à eau réfrigérée	43
5-	Association de moyens physiques de rafraichissement.....	45
B-	Concernant la gestion d'eau et d'aliment	46
1-	Distribution et composition de l'aliment	46
2-	Distribution de l'eau et d'électrolytes.....	47
C-	Génétique.....	48
Partie II - Etude expérimentale : Effet d'un matelas de logettes à eau refroidie sur le bien-être et la physiologie des bovins laitiers en période chaude		
I-	Contexte et objectifs du projet BOVICLIM	51
A-	Contexte du projet BOVICLIM.....	51
B-	Objectifs et hypothèses du projet BOVICLIM	52
II-	Matériel et méthode.....	53
A-	Type d'étude.....	53
B-	Critères d'efficacité	53
C-	Participants.....	54
1-	Lieu de l'essai : critères de sélection	54
2-	Dates de l'essai.....	55
3-	La sélection des individus de l'étude : taille de l'effectif et allocation	55
D-	Les interventions : les matelas de logettes à eau refroidie AQUACLIM® et matelas de logettes LOUISIANE®	56
E-	Récolte des données et analyses statistiques	58
1-	Choix des variables explicatives et à expliquer	58
2-	Collecte et analyse des données d'ambiance du bâtiment : le THI	61
3-	Collecte et analyse des données de température ruminale	63
4-	Collecte et analyse des données de durée de rumination	66
5-	Collecte et analyse des données concernant la durée d'ingestion.....	69
6-	Collecte et analyse des données de comportement des vaches	70
F-	Validation du projet par un comité éthique.....	77

III- Résultats	78
A- Description des échantillons de l'étude	78
B- Description des conditions de THI durant la période de l'étude	79
C- Données concernant la température ruminale.....	80
1- Statistiques descriptives.....	80
2- Comparaisons de moyennes	83
3- Modèle linéaire mixte	84
D- Données concernant la durée de rumination	85
1- Statistiques descriptives.....	85
2- Comparaisons de moyennes	88
3- Modèle linéaire mixte	89
E- Données concernant la durée d'ingestion	91
1- Statistiques descriptives.....	91
2- Comparaisons de moyennes	93
3- Modèle linéaire mixte	94
F- Données comportementales.....	96
1- Budgets-temps	96
2- Indices de confort et d'utilisation des logettes.....	103
G- Conclusions concernant les résultats	110
Partie III - Discussion : Mise en perspective et effets des matelas de logettes à eau réfrigérée sur la physiologie et le comportement des vaches laitières durant cette étude	
I- Conditions environnementales	113
A- Faible THI sur l'ensemble de l'étude	113
B- Choix du THI en tant que paramètre évaluant le stress thermique.....	113
II- Significativité des résultats obtenus.....	114
A- Concernant la température ruminale	114
B- Concernant les durées d'ingestion et de rumination mesurées par les colliers Lely Qwes HR 115	
C- Concernant les données comportementales	116
III- Contraintes liées au bâtiment	118
A- Homogénéité au sein du bâtiment.....	118
B- Mise en route des ventilateurs.....	119
IV- Matelas de logettes à eau réfrigérée	119
A- Dimension des logettes	119
B- Confort des matelas	121
C- Système de refroidissement.....	122

Conclusion	123
Bibliographie.....	125
Documentation fournie par les entreprises	134

Table des équations

Équation 1 : Formule du THI selon le NRC de 1971.....	22
Équation 2 : Modèle linéaire mixte avec structure autorégressive d'ordre 1	59
Équation 3 : Equation du THI selon NRC (1971)	62
Équation 4 : Conversion des pourcentages alloués à chaque activité par lot et par jour en durée allouée à l'activité par jour.....	75
Équation 5 : Modèle de régression Bêta explicatif des indices calculés pour les données de comportement	77
Équation 6 : Equation du THI ajusté selon Herbut et al. (2018).....	113

Table des figures

Figure 1 : Thermorégulation et confort thermique des bovins adultes.....	21
Figure 2: Modifications hormonales présentes lors de stress thermique chez les bovins	30
Figure 3 : Stratégies génétiques afin de limiter le stress thermique chez des races productives (d'après Miranda Millérioux, JNGTV 2022)	48
Figure 4 : Hypothèses du projet BOVICLIM.....	52
Figure 5 : Plan du bâtiment de l'exploitation sélectionnée réalisé par l'entreprise LELY®	54
Figure 6 : Relevé du nombre de jour où le THI≥68 sur les 4 quatre dernières années à la station météorologique de Naizin.....	55
Figure 7 : Matelas de logettes LOUISIANE® (source : https://agri.bioret-corp.com/produits/matelas/louisiane)	56
Figure 8 : Transferts thermiques du dispositif AQUACLIM® (source : https://agri.bioret-corp.com/produits/matelas-et-genouilleres-eau/aquaclim-thermodynamique)	56
Figure 9 : Schéma d'un matelas de logette AQUACLIM® (source : https://agri.bioret-corp.com/produits/matelas-et-genouilleres-eau/aquaclim-thermodynamique)	57
Figure 10 : ventilateur CYCLONE 360®/72'' (source : https://agri.bioret-corp.com/produits/ventilation/cyclone-360)	57
Figure 11 : Constitution et logement des vaches dans chaque lot	58
Figure 12 : Répartition de la durée de rumination et d'ingestion en fonction des jours en lait.....	60
Figure 13 : Capteur Tinytag® Plus 2 TGP 4500	61
Figure 14 : Emplacement des capteurs Tinytag dans le bâtiment	61
Figure 15 : Flowchart des données des capteurs de température et d'humidité.....	62
Figure 16 : Répartition des Thermobolus®	64
Figure 17 : Flowchart des données de température ruminale.....	65
Figure 18 : Composition et position du collier LELY QWES HR (source : https://used.lely.com/fr).....	66
Figure 19 : Flowchart des données de durée quotidienne de rumination.....	67
Figure 20 : Distribution des durées de rumination quotidiennes de tous les individus de l'étude du 14/06 au 30/09.....	68
Figure 21 : Flowchart des données concernant la durée quotidienne d'ingestion.....	69
Figure 22 : Distribution des données de durée quotidienne d'ingestion.....	70
Figure 23 : Disposition des caméras dans le bâtiment.....	71
Figure 24 : Définition des zones dans le bâtiment et tableur issu de l'algorithmme.....	71
Figure 25 : Flowchat concernant les données de comportement	72
Figure 26 : Nombre de vaches détectées le 21/07/2021 chaque seconde.....	73
Figure 27 : Corrélation entre le pourcentage d'individus couchés et à l'auge à la seconde et à l'heure	73
Figure 28 : Exemple de vache "perchée" sur une logette	75
Figure 29 : Caractéristiques des vaches au début de l'étude concernant les jours en lait et la parité. 78	
Figure 30 : Répartition des effectifs dans les deux lots durant l'étude.....	78
Figure 31 : THI moyen quotidien dans les deux lots et identification des périodes avec un THI supérieur à 70 sur l'ensemble de l'étude	79
Figure 32 : Violinplot représentant la température ruminale moyenne corrigée quotidienne dans les deux lots tout au long de l'étude	80
Figure 33 : Température ruminale corrigée moyenne quotidienne et THI moyen quotidien par lot sur l'ensemble de l'étude	81

Figure 34 : Température ruminale corrigée moyenne quotidienne et THI moyen quotidien dans les deux lots et sur les deux périodes chaudes	81
Figure 35 : Comparaison des températures ruminales corrigées individuelles dans les deux lots et sur différentes périodes	82
Figure 36 : Variations quotidiennes de température ruminale corrigée sur une journée où le THI<70 et sur une journée où le THI>70.....	83
Figure 37 : Température ruminale corrigée moyenne quotidienne en fonction du THI moyen quotidien	84
Figure 38 : Violinplot représentant la durée de rumination quotidienne en fonction de la localisation des vaches sur l'ensemble de l'étude	86
Figure 39 : Durée de rumination moyenne quotidienne et THI moyen quotidien selon la localisation sur l'ensemble de l'étude	86
Figure 40 : Durée de rumination moyenne quotidienne et THI moyen quotidien sur la période chaude de juillet.....	87
Figure 41 : Comparaison de la durée de rumination quotidienne individuelle sur la période chaude de juillet et sur une période en absence de stress thermique.....	88
Figure 42 : Durée de rumination quotidienne en fonction du THI moyen quotidien	89
Figure 43 : Violinplot représentant la durée d'ingestion en fonction du lot sur l'ensemble de l'étude.....	91
Figure 44 : Durée d'ingestion moyenne quotidienne en fonction du THI moyen quotidien et du lot sur l'ensemble de l'étude	92
Figure 45 : Durée d'ingestion moyenne quotidienne en fonction du THI moyen quotidien et du lot sur la période chaude de juillet.....	92
Figure 46 : Dispersion de la durée d'ingestion des vaches sur la période chaude de juillet et sur une période sans stress thermique	93
Figure 47 : Durée d'ingestion quotidienne en fonction du THI moyen quotidien	94
Figure 48 : Boxplot du budget-temps des différentes activités dans les deux lots.....	97
Figure 49 : Cumul des budget-temps des différentes activités selon le lot sur l'ensemble de l'étude et sur les deux périodes chaudes	98
Figure 50 : Boxplot des indices par type de matelas utilisé sur l'ensemble de l'étude	105
Figure 51 : Représentation des différents indices par type de matelas sur une journée où le THI est supérieur à 70 et une journée où le THI est inférieur à 65	106
Figure 52 : Résumé des analyses estimant les effets d'un matelas de logettes à eau réfrigérée sur la température corporelle et le comportement de vaches laitières en période chaude	111
Figure 53 : Logettes du bâtiment de l'étude, les grattoirs pour l'encolure sont entourés en jaune ..	116
Figure 54 : Hypothèses formulées au début de l'étude et résultats effectivement obtenus	118
Figure 55 : Vitesse des courants d'air du bâtiment mesurées lors de l'audit bâtiment du 10/01/2022	118
Figure 56 : Mesure des vaches selon le CIGR (2015).....	120
Figure 57 : Paramètres utilisé pour mesurer les logettes selon le CIGR (2015).....	120
Figure 58 : Résultats obtenus par Gebremedhin et al. (2015) entre la température de l'eau circulant dans le matelas et leur température de surface	122

Table des tableaux

Tableau 1 : Détermination des seuils de THI à partir desquels le bovin adulte est en stress thermique	23
Tableau 2 : Modalité de récolte des données de température corporelle, avantages et inconvénients	28
Tableau 3 : Récapitulatif des facteurs autres que le THI influençant la température ruminale, l'ingestion, la rumination et le comportement des vaches laitières	39
Tableau 4 : Effets de ventilateurs la physiologie et le comportement des vaches	41
Tableau 5 : Effets de système utilisant l'aspersion d'eau sur la physiologie et le comportement des vaches	42
Tableau 6 : Effets de matelas de logettes à eau réfrigérée sur la physiologie et le comportement des vaches	44
Tableau 7 : Effets conjoints de ventilateurs et de brumisateurs sur la physiologie et le comportement des vaches laitières	45
Tableau 8 : Comparaison et effets des différents moyens de rafraîchissement des vaches laitières ..	49
Tableau 9 : Récapitulatif des études évaluant l'efficacité de matelas à eau réfrigérée	51
Tableau 10 : Description des variables à expliquer	58
Tableau 11 : Description des variables explicatives	59
Tableau 12 : Températures ruminales obtenues avec utilisation de dispositif de mesure de la température intra-ruminale	65
Tableau 13 : Comparaison des intervalles de durées quotidiennes de rumination obtenus dans différentes études	68
Tableau 14 : Etendue et moyennes de durées quotidiennes d'ingestion sur deux études	70
Tableau 15 : Méthode de calcul du pourcentage de budget-temps par activité	74
Tableau 16 : Indices de confort et d'utilisation des logettes et du bâtiment selon la littérature	76
Tableau 17 : Méthode de calcul des indices sélectionnés	76
Tableau 18 : Résumé des données concernant le THI sur l'ensemble de l'étude	79
Tableau 19 : Résumé des données concernant la température ruminale moyenne quotidienne	80
Tableau 20 : Comparaison des moyennes des températures ruminales corrigées des deux lots	83
Tableau 21 : Modèle linéaire mixte expliquant la température ruminale	85
Tableau 22 : Résumé des données concernant la durée de rumination quotidienne moyenne	86
Tableau 23 : Comparaison de moyenne entre les deux lots sur l'ensemble de l'étude, semaine par semaine et sur la période chaude de juillet	88
Tableau 24 : Différence de durée de rumination en faveur du lot Aquaclim	89
Tableau 25 : Modèle linéaire mixte explicatif de la durée de rumination	90
Tableau 26 : Moyennes marginales de l'interaction matelas*THI du modèle linéaire mixte expliquant la durée de rumination	90
Tableau 27 : Résumé des données concernant la durée d'ingestion sur l'ensemble de l'étude	91
Tableau 28 : Comparaison de moyennes de la durée d'ingestion quotidienne sur l'ensemble de l'étude, semaine par semaine et sur la période chaude de juillet	93
Tableau 29 : Modèle linéaire mixte explicatif de la durée d'ingestion	95
Tableau 30 : Moyennes marginales de l'interaction entre le THI et les matelas dans le modèle linéaire mixte explicatif de la durée d'ingestion	95
Tableau 31 : Récapitulatif des données concernant le budget-temps	96
Tableau 32 : Comparaison de moyennes du temps alloué à chaque activité sur l'ensemble de l'étude et sur les deux périodes chaudes	99

Tableau 33 : Moyennes marginales de l'interaction THI et type de matelas pour le modèle du paramètre durée de traite	99
Tableau 34 : Récapitulatif des modèles concernant les différents paramètres des budget-temps ...	100
Tableau 35 : Récapitulatif des données concernant les indices de confort des vaches	104
Tableau 36 : Interprétation des données concernant les indices de confort	104
Tableau 37 : Tests de comparaison de moyennes des indices sur l'ensemble de l'étude et les deux périodes chaudes	107
Tableau 38 : Coefficient de corrélation entre l'indice et le THI et résultats du modèle	108
Tableau 39 : Dimensions moyennes des dix plus grandes vaches du bâtiment	120
Tableau 40 : Formules de calcul, mesures théoriques et mesures réelles des logettes de l'exploitation de l'étude.....	121
Tableau 41 : Calcul des CCI et SUI moyens entre minuit et 4 h dans les deux lots sur l'ensemble de l'étude.....	121

Liste des abréviations

° C : degré Celsius

CCI : Cow Comfort Index

CLI : Cow Lying Index

CSI : Cow Standing Index

ETI : Equivalent Temperature Index

NDF : Neutral Detergent Fiber

PH : Prim'Holstein

RH : Relative Humidity

SPI : Stall Perching Index

SUI : Stall Use Index

TCI : Température Critique Inférieure

TCS : Température Critique Supérieure

THI : Temperature-Humidity Index

TLI : Température Létale Inférieure

TLS : Température Létale Supérieure

Introduction

Le réchauffement climatique s'accroît depuis plusieurs décennies selon le GIEC (Groupe d'Expert Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) qui vise une augmentation maximale d'ici à 2030 d'un degré Celsius et demi. Cela s'accompagne de canicules estivales plus intenses et de phénomènes violents. Cependant, les vaches laitières et notamment les Prim'Holstein hautes productrices sont très sensibles au stress thermique induit par une vague de chaleur. Un tel état modifie la physiologie et le comportement des vaches laitières et a, en partie, pour conséquences une diminution de la production et une baisse d'immunité favorisant l'apparition de maladies. De plus, le bien-être et le comportement des animaux de production est de plus en plus un sujet sociétal avec un réel engouement du grand public pour cette thématique. Ainsi, le confort et le bien-être des vaches deviennent prépondérants en élevage laitier avec de nouvelles mesures promulguées par le gouvernement le 28 janvier 2020 visant à améliorer les conditions de vie des animaux en élevage.

C'est dans ce contexte global que sont recherchées des solutions à la fois rafraichissantes pour lutter contre le stress thermique et les baisses de performances et confortables pour les vaches laitières. De nombreuses solutions rafraichissantes existent mais sont souvent coûteuses en énergie et en eau. Ainsi, les matelas de loquettes à eau réfrigérée représentent un moyen moins énergivore de rafraichir les vaches. Deux études (Bastian et al., 2003; Gebremedhin et al., 2016) se sont penchées sur des aspects thermodynamiques concernant la conduction d'énergie thermique entre le matelas et les animaux et trois études, à ma connaissance, évaluent l'efficacité des matelas sur la physiologie et le comportement des vaches lors de stress thermique (Drwencke et al., 2020; Ortiz et al., 2015; Perano et al., 2015). Ces matelas semblent permettre de diminuer la température corporelle et la fréquence respiratoire des vaches mais il ne semble pas y avoir de consensus concernant l'efficacité de ces matelas sur les aspects comportementaux – couchage, ingestion, rumination etc. -. De plus, toutes ces études sont menées dans des conditions environnementales contrôlées avec un faible nombre d'individus.

Par conséquent, cette étude pilote dans une ferme commerciale vise à évaluer l'impact de tels matelas sur la physiologie et le comportement de vaches laitières hautes productrices. Une autre étude menée par Lucas Bouglé (2022) s'intéresse aux effets des matelas à eau réfrigérée sur l'incidence des boiteries et la production laitière dans ce même élevage.

Partie 1- Bibliographie :

Comportement et physiologie des bovins laitiers lors de stress thermique

I- Thermorégulation, stress thermique et physiologie chez les bovins

A- Mécanismes de thermorégulation chez les bovins

La thermorégulation est définie comme les mécanismes à l'origine du maintien de la température corporelle dans d'étroites limites de variation (Raven et al., 2020). Les bovins sont des animaux endothermes, c'est-à-dire qu'ils utilisent leur métabolisme afin de produire la chaleur corporelle et maintenir leur température au-dessus de celle ambiante. C'est le cas de tous les mammifères. Parmi les endothermes, les bovins sont homéothermes : ils maintiennent leur température corporelle stable entre 38 °C et 39,3 °C (Charles, 2010; Raven, 2020).

1- Thermogénèse des bovins

La thermogénèse correspond à la production de chaleur par l'animal. Cette chaleur provient majoritairement du métabolisme d'entretien du bovin. Par son fonctionnement, le métabolisme produit de l'énergie : toute cellule pour fonctionner réalise des transformations chimiques productrices d'énergie sous forme de chaleur. De plus, le travail musculaire ainsi que la digestion – via la rupture des liaisons des nutriments - provoque la formation de chaleur. Ces trois éléments composent la thermogénèse obligatoire (Charles, 2010; Kadzere et al., 2002).

Chez les vaches laitières en lactation, la production de chaleur provient du métabolisme d'entretien, de celui lié à l'exercice physique, à la croissance – pour les primipares -, à la lactation, la gestation et la nourriture ingérée – et les processus fermentaires dans le rumen qui l'accompagne (Becker et al., 2020).

Les frissons font partis de la thermogénèse facultative et sont à l'origine de production de chaleur via le travail des muscles érecteurs des poils lorsque les animaux ont froid (Charles, 2010; Kadzere et al., 2002).

2- Thermolyse des bovins

La thermolyse est le phénomène par lequel les bovins vont perdre de la chaleur lorsqu'ils ressentent une sensation de chaleur. C'est le phénomène qui va être prépondérant dans le cadre du stress thermique.

Il existe quatre modes de pertes thermiques (Becker et al., 2020; Charles, 2010; Kadzere et al., 2002; Reece et al., 2015) :

- La conduction : les pertes par conduction sont présentes lorsque la vache est en contact avec un environnement plus froid que sa surface corporelle – air, eau, surface de couchage. Les pertes d'énergie thermique par conduction sont négligeables. En effet, l'air est un très mauvais conducteur thermique. De plus, l'eau étant un bien meilleur conducteur thermique, une surface corporelle humide perdra plus d'énergie thermique : humidifier la peau d'un animal permet donc d'augmenter ses pertes de chaleur.
- La convection : elle est présente lorsque l'air chaud au contact de la peau de l'animal est remplacé par un air plus frais. C'est notamment le cas avec l'utilisation de ventilateurs. Ces pertes sont plus importantes que celles liées à la conduction.
- Le rayonnement : les pertes de chaleur par rayonnement apparaissent lorsque la température extérieure est plus faible que la température corporelle. Elles sont peu efficaces pour refroidir l'animal. Ces trois moyens –conduction, convection et rayonnement- ne sont pas coûteux en énergie pour l'animal.
- L'évaporation : elle correspond à l'évaporation de sueur à la surface de la peau et d'humidité au niveau des muqueuses oropharyngiennes et pulmonaires chez les bovins. Elle représente les pertes d'énergie thermique les plus importantes chez les animaux : environ 15 % de la production de chaleur endogène est perdue *via* le tractus respiratoire. Les glandes sudoripares sont peu nombreuses chez les ruminants, la sudation par la peau n'est pas très efficace. L'évaporation est un mécanisme efficace par temps chaud et sec. C'est cependant un moyen coûteux en énergie pour l'animal.

3- Notion de confort thermique chez les bovins

La zone de survie est définie comme la gamme de température dans laquelle l'animal peut vivre. Elle est délimitée par la température létale inférieure (TLI) à partir de laquelle l'animal meurt d'hypothermie et la température létale supérieure (TLS) à partir de laquelle il meurt d'hyperthermie (Becker et al., 2020; Charles, 2010; Kadzere et al., 2002).

La zone d'homéothermie correspond à l'intervalle de températures extérieures pour lequel la température centrale du bovin ne varie pas. Au sein de la zone d'homéothermie se trouve la zone de neutralité thermique. Elle est définie comme la gamme de températures extérieures pour laquelle le bovin dépense peu d'énergie pour la thermorégulation. Elle est limitée par deux températures critiques : la température critique inférieure (TCI) en-dessous de laquelle l'animal est en hypothermie et la température critique supérieure (TCS) au-dessus de laquelle l'animal souffre d'hyperthermie (Becker et al., 2020; Charles, 2010; Kadzere et al., 2002).

La zone de confort thermique se situe au sein de la zone d'homéothermie et correspond aux températures extérieures pour lesquelles l'animal ne dépense pas d'énergie pour maintenir sa température corporelle stable (Kerr, 2015).

Lorsque la température extérieure est inférieure à la TCI, le bovin augmente sa thermogénèse afin de maintenir la température corporelle constante. De la même manière, si la température extérieure est supérieure à la TCS, la thermolyse augmente (Charles, 2010).

La TCI est très variable chez le bovin en fonction de son âge, de sa race et de son statut physiologique. Par exemple, la TCI d'un veau se situe à 13°C, celle d'une vache tarie à 5°C et celle d'une vache laitière en lactation (30 L/j) à -34°C. La TCS est estimée autour de 25-26 °C chez la vache laitière (Charles, 2010; Kadzere et al., 2002).

En résumé, les mécanismes de thermorégulation et de zone de confort thermique sont présentés dans la *Figure 1* :

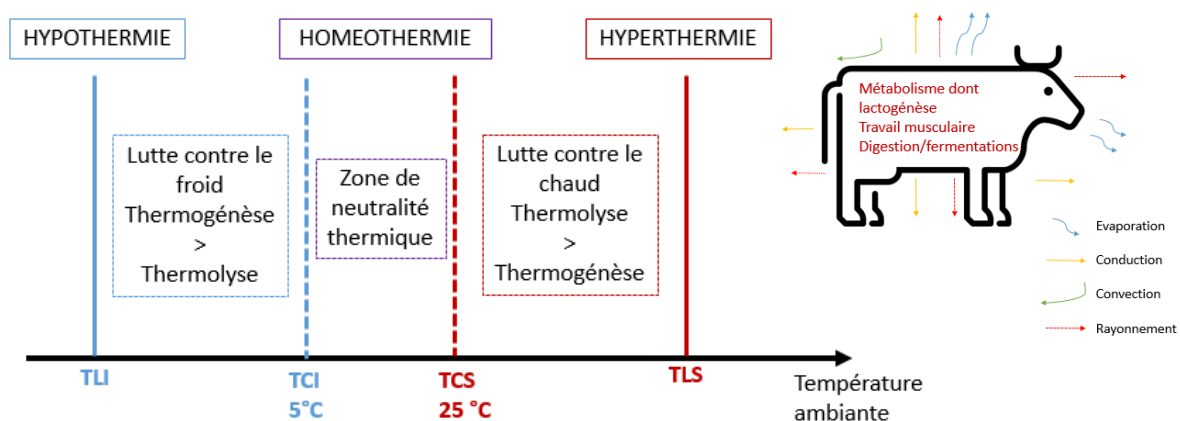


Figure 1 : Thermorégulation et confort thermique des bovins adultes

B- Conditions de stress thermique et réponses physiologiques des vaches laitières (hors production laitière et reproduction)

1- Les conditions de stress thermique chez les bovins

a- Un indice de mesure des conditions environnementales : le THI (Temperature-Humidity Index)

Le THI (Temperature-Humidity Index) est un indice qui prend en compte la température et l'humidité. Il est utilisé aussi bien en médecine bovine qu'en médecine humaine afin d'évaluer le stress thermique auquel sont soumis les individus (Thom,1959).

La formule de l'indice a évolué depuis sa création en 1959. Actuellement, il est admis qu'il s'exprime de la façon suivante (NRC, 1971) :

Équation 1 : Formule du THI selon le NRC de 1971

$$THI = (1,8 \times T + 32) - [(0,55 - 0,0055 \times HR)(1,8 \times T - 26)]$$

où T représente la température ambiante en °C et HR l'humidité relative en %.

D'autres indices existent afin de préciser les conditions environnementales dans lesquelles vivent les animaux (Herbut et al., 2018). Par exemple, l'ETI (Equivalent Temperature Index) prend en compte – en plus de la température et de l'humidité –, la vitesse de l'air, qui n'est pas un élément négligeable dans l'environnement de l'animal car augmentant les phénomènes de convection. De plus, le THI ajusté prend également en compte les radiations solaires perçues par l'animal en plus des paramètres cités précédemment.

Le THI présente tout de même l'avantage de pouvoir être calculé aisément : une station météorologique simple peut relever les données de température et d'humidité. De plus, c'est l'indice de relevé de paramètre d'ambiance de très nombreuses publications (cf paragraphe I.B.1.b).

b- THI et stress thermique chez les bovins

Il ne sera évoqué ici, et par la suite, qu'un stress thermique provoqué par des THI élevés, l'impact du froid sur les bovins ne sera pas étudié.

Le stress thermique peut être défini comme la somme des forces extérieures qui agissent sur l'animal et à l'origine d'une augmentation de la température corporelle provoquant des réponses physiologiques de l'organisme (Herbut et al., 2018). Il a également été défini par Armstrong (1994) comme toutes combinaisons de facteurs environnementaux qui causent une augmentation effective de la température ambiante excédent la zone de neutralité thermique de l'animal.

Les conditions du stress thermique sur les bovins concernant différents paramètres physiologiques et comportementaux sont présentés dans le *Tableau 1*.

Le THI pour lequel les bovins sont en stress thermique est assez variable selon les auteurs et ne fait pas consensus. Il est globalement compris entre 65 et 75. Il semblerait cependant que depuis 2012, il soit admis que le bovin ressent un stress thermique à partir d'un THI \geq 68. Avant cela, le seuil de THI provoquant un stress thermique se situait autour de 72 selon Armstrong (1994).

Cependant, d'après le *Tableau 1*, selon du paramètre étudié, le seuil de stress thermique en fonction du THI est différent. Il semble que des modifications comportementales – temps quotidien de rumination, de couchage ou d'ingestion – des animaux ait lieu dans la zone de confort thermique.

Tableau 1 : Détermination des seuils de THI à partir desquels le bovin adulte est en stress thermique

Etude	Conditions expérimentales	Mesure du THI	Conditions de stress thermique
<i>Allen et al., 2015</i>	3 fermes commerciales en Arizona, Minesota et Californie, 150 vaches laitières (race inconnue) Etude de la température corporelle et des conditions climatiques sur le comportement des vaches laitières soumises à un stress thermique léger et modéré	Capteurs de température et d'humidité dans les bâtiments Formule de calcul : $T_{db} - \left[0,55 - \left(0,55 \times \frac{RH}{100} \right) \right] \times (T_{db} - 58)$ où T_{db} est la température sèche en °F	Temps de couchage diminue : $TH \geq 68$ Pourcentage de vaches debout maximal : $80 < THI < 89$
<i>Ammer et al., 2016a</i>	3 fermes commerciales, 28 Prim'Holstein Etude sur l'intérêt de la température ruminale comme indicateur de stress thermique	Capteurs de température et d'humidité dans le bâtiment Calcul du THI selon le NRC (1971)	Augmentation de la température ruminale : $THI > 65$ Augmentation de la température ruminale intensifiée : $THI > 70$
<i>Amstrong, 1994</i>	Revue sur le stress thermique et les méthodes de rafraichissement des bovins	Formule de calcul du THI non précisée	$THI < 72$: absence de stress thermique $72-78$: stress thermique léger $79-89$: stress thermique modéré > 90 : stress thermique sévère
<i>Anderson et al., 2013</i>	Dans une ferme commerciale en Arizona, 144 Prim'Holstein Test de l'efficacité de ventilateurs sur la température corporelle et le comportement de couchage	Capteurs de température et d'humidité dans le bâtiment Formule de calcul : $T_{db} - \left[0,55 - \left(0,55 \times \frac{RH}{100} \right) \right] \times (T_{db} - 58)$ où T_{db} est la température sèche en °F	Début de stress thermique : $THI > 68$ pour les paramètres températures corporelle et durée de couchage avec les systèmes de rafraichissement mis en place
<i>Gauly et al., 2013</i>	Revue sur les conséquences des changements climatiques en Europe Centrale vis-à-vis des vaches laitières	Formule de calcul de THI non précisée	Début de stress thermique : $THI > 68$
<i>Herbut et al., 2020</i>	Revue sur les paramètres environnementaux qui caractérisent le stress thermique chez les bovins	Formule de calcul de THI non précisée	Début du stress thermique : THI entre 68 et 74
<i>Hut et al., 2022</i>	Dans 8 fermes commerciales des Pays-Bas, 4345 Prim'Holstein Etudes du temps d'ingestion, de rumination, du temps de couchage, de marche et passé debout	Relevé des températures et de l'humidité à l'aide de station météorologiques proches des exploitations Calcul du THI selon le NRC (1971)	Temps de couchage diminue lorsque : $THI > 72$ Temps passé à marcher augmente lorsque : $THI > 64$ Temps d'ingestion diminue lorsque : $THI > 60$ Temps de rumination diminue lorsque : $THI > 68$
<i>Ji et al., 2020</i>	Revue sur les manières de mesurer, d'évaluer et de limiter le stress thermique chez les bovins laitiers	Formule de calcul de THI non précisée	Début de stress thermique : $THI > 68$
<i>Kadzere et al., 2001</i>	Revue sur le stress thermique chez les bovins laitiers	Formule de calcul du THI : $0,72 \times (W + D) + 40,6$ où W est la température humide et D la température sèche	$THI < 70$: confortable $75-78$: stress thermique > 78 : détresse

<i>Müschner-Siemens et al., 2020</i>	Ferme commerciale en Allemagne, 183 Prim'Holstein Etude du temps de rumination chez les vaches soumises à un stress thermique	Capteurs de température et d'humidité dans le bâtiment Calcul du THI selon le NRC (1971)	Diminution du temps de rumination : THI > 52
<i>Nabenishi et al., 2011</i>	170 fermes commerciales au Japon, 11 302 Prim'Holstein Etude sur l'impact du THI sur la température corporelle (entre autres)	Relevé des températures et de l'humidité à l'aide de station météorologiques proches des exploitations $0,8 \times T_{max} + \frac{RH_{min}}{100} \times (T_{max} - 14,4) + 46,4$ où T_{max} est la température maximale quotidienne et HR_{min} l'humidité relative minimale	Température vaginale augmente lorsque : THI > 69
<i>Nordlund et al., 2019</i>	Dans deux fermes commerciales du Wisconsin, 20 Prim'Holstein Etude de la température corporelle et du comportement debout dans une stabulation libre et dans un paddock	Capteurs de température et d'humidité dans le bâtiment et à l'extérieur Calcul du THI selon le NRC (1971)	Temps de couchage diminue et température corporelle augmente de façon légère lorsque que l'animal est couché : THI > 60 Augmentation plus importante de la température corporelle et diminution importante du temps de couchage : THI ≥ 85
<i>Ortiz et al., 2015</i>	Conditions contrôlées en Arizona, 6 Prim'Holstein Effet de systèmes de refroidissement conducteurs	Logement avec atmosphère contrôlée Formule de calcul de THI non précisée	Apparition de signes de stress thermiques (augmentation de fréquence respiratoire) : THI > 68
<i>Soriani et al., 2013</i>	Ferme expérimentale italienne, 21 Prim'Holstein Etude du temps de rumination durant l'été	Capteurs de température et d'humidité dans le bâtiment Calcul du THI selon le NRC (1971)	Pour l'ensemble des paramètres étudiés : Stress thermique léger : THI > 72 Stress thermique élevé : THI > 78 Stress thermique sévère : THI > 88

c- Facteurs de variation du stress thermique chez les vaches laitières

Les paramètres qui influencent la zone de neutralité thermique chez les vaches incluent l'âge, la race, le type de production, la condition corporelle, le stade de lactation, la composition de la ration alimentaire, la gestation, le type de logement, le type et la couleur des poils ainsi que la pigmentation de la peau (Becker et al., 2020; Bonnefoy J.M. & Noordhuizen J., 2011).

Les modalités concernant le type de logement seront abordées ultérieurement.

1- La race et la génétique

La race Jersiaise est plus adaptée aux situations de stress thermique que la race Prim'Holstein : lorsque le THI ≥ 72 la production laitière des Prim'Holstein diminue, alors que celle des Jersiaises augmente (Smith et al., 2013). La température rectale de vaches croisées –Prim'Holstein avec Jersiaises, Brune Suisse, Scandinaves- et significativement inférieure à celles de vaches Prim'Holstein lorsque la température ambiante augmente (Liang et al., 2013).

Les Prim'Holstein ont, pour certaines, un pelage noir qui recouvre une majeure partie de leur surface corporelle. Cette caractéristique inhérente à la race lui confère un désavantage : le pelage et la peau noire absorbe plus de radiations solaires que d'autres robes et donc sont plus sensibles au stress thermiques que des vaches blanches (Becker et al., 2020).

Le gène « *slick hair* » -poils lisses, en français-, identifié chez plusieurs races espagnoles et d'Amérique du Sud, est intégré, à l'aide de croisements au génome de Prim'Holstein. Ce gène confère une meilleure thermotolérance des bovins qui le possèdent via une diminution de la température corporelle (Olson et al., 2003).

Il existe une corrélation négative entre niveau de production laitière et la résistance au stress thermique, il est donc difficile d'obtenir des vaches laitières hautes productrices résistantes au stress thermique (Bernabucci et al., 2014).

2- L'âge

Les vaches primipares sont moins sensibles au stress thermique que les multipares (Becker et al., 2020; Bernabucci et al., 2014). En effet, elles génèrent moins de chaleur liée au métabolisme car elles produisent moins de lait. De plus, elles auraient une surface corporelle supérieure par rapport à leur masse corporelle comparée aux multipares : elles perdraient donc plus facilement de la chaleur (Bernabucci et al., 2014).

3- La production laitière et le stade de lactation

Plus le niveau de production laitière est élevé, plus l'activité métabolique associée est importante –augmentation de la quantité de matière ingérée et augmentation de la lactogénèse- et donc plus la production d'énergie thermique qui l'accompagne l'est également. En effet, 31 % de l'énergie ingérée est transformée en énergie thermique et jusqu'à 50 % de l'énergie thermique produite provient de la lactogénèse (Gauly et al., 2013). Les vaches laitières hautes productrices subissent ainsi un stress thermique plus précoce car elles sont adaptées à de tels niveaux de production seulement dans la zone de neutralité thermique (Becker et al., 2020; Kadzere et al., 2002; West, 2003). En effet, augmenter le niveau de production de 35 à 45 kg de lait/j diminue la température critique supérieure de 5 °C (Berman, 2005).

Le stade de lactation est également à prendre en compte. En effet, jusqu'à 60 jours en lait, la balance énergétique de la vache est négative. Elle a donc recours à la lipomobilisation afin de palier à ce déficit énergétique, ce qui produit de la chaleur (Becker et al., 2020).

4- La ration alimentaire

Une ration riche en fibres provoque une augmentation de la production d'énergie thermique. En revanche, une ration riche en concentrés augmente la densité énergétique de la ration et diminue la production de chaleur associée par rapport à une ration riche en fibres. Cependant, le risque de développer une acidose du rumen augmente (Becker et al., 2020; West, 1999).

Un ajout de 3 à 5 % de matière grasse à la ration permet de réduire la production de chaleur lors de la digestion et est très bien toléré par la flore du rumen. En effet, lorsque la ration est plus riche en matières grasses la température corporelle de génisses de races croisées est inférieure de 0,3 à 0,4 °C (Becker et al., 2020; West, 1999).

5- Durée du stress thermique et acclimatation

Les bovins sont des animaux diurnes, la majorité de leur activité et donc de la production de chaleur par leur organisme s'effectue la journée. Un enchaînement de journée avec un THI élevé la journée et la nuit entraîne un stress thermique permanent : les animaux ne peuvent pas évacuer la chaleur la nuit comme c'est le cas avec un THI plus faible (Becker et al., 2020).

L'acclimatation –*acclimatization* en anglais- est définie comme la coordination de réponses phénotypiques d'un animal à plusieurs facteurs de stress, comme par exemple, la température, l'humidité, les radiations solaires, etc. ... Elle prend plusieurs jours à plusieurs semaines pour se développer après l'apparition du stress. Elle repose sur des mécanismes hormonaux qui font le lien entre le système nerveux central et le cellules cibles, ces phénomènes seront développés par la suite. L'acclimatation permet donc à l'animal d'établir un nouvel équilibre de thermorégulation. Ce phénomène explique en partie pourquoi les THI au-delà duquel la vache est en état de stress thermique entre les milieux tempérés, arides et tropicaux ne sont pas les mêmes pour une race donnée (Collier et al., 2019).

2- Réponses physiologiques des vaches laitières au stress thermique

a- Augmentation de la fréquence respiratoire et halètement

L'augmentation de la fréquence respiratoire et l'halètement sont les indicateurs physiologiques les plus sensibles de stress thermique (Becker et al., 2020) et sont plus précoces qu'une augmentation de température rectale (Berman, 2005). En effet, ils sont à l'origine d'une dissipation de chaleur par évaporation de l'humidité présente dans le tractus respiratoire. Ces phénomènes sont contrôlés par l'hypothalamus en réponse à l'augmentation de la température sanguine. Chez les bovins, l'halètement s'accompagne d'une importante salivation qui permet également un refroidissement de l'animal par évaporation (Kerr, 2015; Reece et al., 2015; Tresoldi et al., 2016).

Il est admis qu'une fréquence respiratoire au-delà de 60 mouvements par minute est considérée comme un indicateur de stress thermique. Une fréquence respiratoire au-delà de 120 mouvements par minutes est associée à un stress thermique sévère (Becker et al., 2020; Kadzere et al., 2002). Lorsque la température ambiante est comprise entre 24 et 39 °C, la fréquence respiratoire augmenterait de 2,8 à 3,3 mouvements par minutes pour chaque degré de température gagné (Gaughan, 2000). Ces modifications permettent la dissipation de 30 % de l'énergie thermique accumulée par la vache mais mettent entre 1 à 2h à se mettre en place (Idris et al., 2021).

La vitesse de l'air ambiant augmente les pertes thermiques respiratoires tandis que l'humidité relative diminue ces pertes. De plus, lorsque la vitesse de l'air augmente, l'humidité relative ambiante diminue (Berman, 2005).

La fréquence respiratoire est particulièrement élevée lorsque les animaux sont couchés et a tendance à diminuer lorsque les animaux se lèvent : la surface corporelle en contact avec l'air ambiant augmente, la proportion d'énergie thermique perdue par la respiration diminue (Atkins et al., 2018).

b- Augmentation de la température corporelle

La température corporelle est un paramètre prépondérant de santé et de productivité des bovins et résulte des événements liés à la thermorégulation. Elle est normalement comprise entre 38,6 et 39,2 °C (Ammer et al., 2016b). Elle subit des variations circadiennes entre 0,2 et 0,9 °C et atteint un minimum le matin et un maximum en fin d'après-midi hors période de stress thermique (Ammer et al., 2016b; Becker et al., 2020).

Une augmentation de la température corporelle en réponse à un stress thermique est la résultante du dépassement du système de thermorégulation. Ainsi, lorsqu'elle augmente, il se produit une redistribution des flux sanguins dans l'organisme. Une vasoconstriction est observée au niveau des muscles et des organes de la cavité abdominale alors qu'une vasodilatation des anastomoses artério-veineuses cutanées est présente. Le flux sanguin « chaud » est évacué vers la périphérie afin d'être éliminé vers le milieu extérieur au niveau de la peau. La vasoconstriction est un effet de redistribution secondaire du flux sanguin (Charles, 2010; Reece et al., 2015).

De nombreux dispositifs sont disponibles afin de mesurer la température corporelle et présentés dans le *Tableau 2* (liste non exhaustive).

Tableau 2 : Modalité de récolte des données de température corporelle, avantages et inconvénients

Paramètre	Récolte des données	Avantages	Inconvénients	Etude
<i>Température ruminale</i>	Bolus équipé de capteur de température	Relevé automatique et en continu Peu invasif et faible probabilité de perte Peut permettre de détecter les maladies, l'œstrus, un état de stress physiologique	Forte diminution de température ruminale en cas de prise de boisson (jusqu'à -9,2 °C et 3 h avant retour à la valeur initiale) Coûteux Problèmes de transmission des données	Idris et al., 2021 Becker et al., 2020 Ammer et al., 2016a Ammer et al., 2016b AlZahal et al., 2011 Bewley et al., 2008
<i>Température tympanique</i>	Capteur de température placé dans le canal tympanique	Très proche des thermorécepteurs hypothalamiques Peu de temps de décalage entre le début de l'état de stress thermique et son objectivation Relevé automatique et en continu	Difficulté de mise en place Gêne pour l'animal Risque d'infection locale	Becker et al., 2020 Turle, 2017
<i>Température rectale</i>	Thermomètre digital	Peu onéreux Facile à mettre en place	Mesure manuelle uniquement (résultat lié aux compétences de l'utilisateur), chronophage et absence de suivi continu Stressant pour l'animal, nécessite des manipulations qui peuvent fausser les données Nécessite des moyens de contention	Idris et al., 2021 Becker et al., 2020 Ji et al., 2020 Ammer et al., 2016a Ammer et al., 2016b Bewley et al., 2008
<i>Température vaginale</i>	Appareil d'enregistrement de la température associé à un dispositif intra-vaginal de libération de molécules thérapeutiques Thermomètre digital (pour les avantages et inconvénients cf supra)	Pour les appareils : automatisation des données	Inconfort pour l'animal Coûteux Problèmes de transmission des données	Idris et al., 2021 Becker et al., 2020 Ji et al., 2020 Ammer et al., 2016b
<i>Température à la surface de la peau</i>	Caméra infrarouge thermographique	Identification dans échanges thermiques avec le milieu extérieur Modélisation des variations de température corporelle	Détection manuelle Coûteux Analyse des données	Idris et al., 2021 Ji et al., 2020

Les températures rectales et vaginales sont fortement corrélées. Les températures rectales, vaginales et ruminales sont moins fortement corrélées. Enfin, il y a une moins bonne corrélation entre la température ruminale et la température extérieure qu'entre les températures vaginales et rectales avec la température extérieure (Ammer et al., 2016b; Bewley et al., 2008).

La température ruminale est 0,5 et 1 °C plus élevée que la température rectale. Ceci est lié aux fermentations du microbiote du rumen qui produisent de la chaleur (AlZahal et al., 2011; Bewley, Einstein, et al., 2008; Idris et al., 2021).

Une augmentation de la température corporelle lors de stress thermique est objectivable seulement 1 à 5h après une augmentation de la température ambiante. C'est donc un critère assez tardif de stress thermique (Becker et al., 2020). Une augmentation du THI au-dessus du seuil de 70 provoquerait une augmentation de la température ruminale de 0,2 °C (Ammer et al., 2016a). De plus, une augmentation de la température rectale de 0,2 °C par degré de température ambiante gagné est observée durant les périodes chaudes (Berman et al., 1985).

c- Sudation et perte d'énergie thermique

La sudation représente 40 à 60 % des pertes thermiques par évaporation lorsque la température ambiante atteint 27 °C et jusqu'à 80 % lorsqu'elle atteint 38 °C (Aggarwal et al., 2013; Becker et al., 2020). Son efficacité est fortement influencée par la vitesse de l'air et l'humidité ambiante (Berman, 2011). Elle représente des pertes en eau et en électrolytes importantes et repose sur le flux sanguin et la quantité de glandes sudoripares par unité de surface de la peau (Ji, Banhazi, Perano, et al., 2020).

Certaines espèces adaptées aux climats chauds, comme le zébu, possèdent plus de glandes sudoripares et ont un volume plus important par rapport aux races européennes. De ce fait, le taux de transpiration est plus élevé chez les races adaptées aux conditions de températures extrêmes (Kadzere et al., 2002). Le taux de transpiration varie beaucoup en fonction des races au sein de l'espèce bovine (Berman, 2011).

d- Réponses métaboliques

Comme explicité précédemment, lorsque le THI augmente, la fréquence respiratoire des vaches augmente également. Ainsi, la quantité de CO₂ expiré augmente provoquant un appauvrissement du sang en gaz carbonique. Il se produit alors le phénomène d'alcalose respiratoire : le sang est appauvri en composé acide du fait de la perte de CO₂ par l'augmentation de la fréquence respiratoire. Afin de lutter contre ce phénomène, les reins éliminent du bicarbonate : le pH urinaire augmente (Kadzere et al., 2002; West, 2003).

En plus des troubles acido-basiques, des modifications hormonales se mettent en place (Aggarwal et al., 2013; Bernabucci et al., 2010; Idris et al., 2021; West, 2003). Ces modifications sont présentées dans la *Figure 2*.

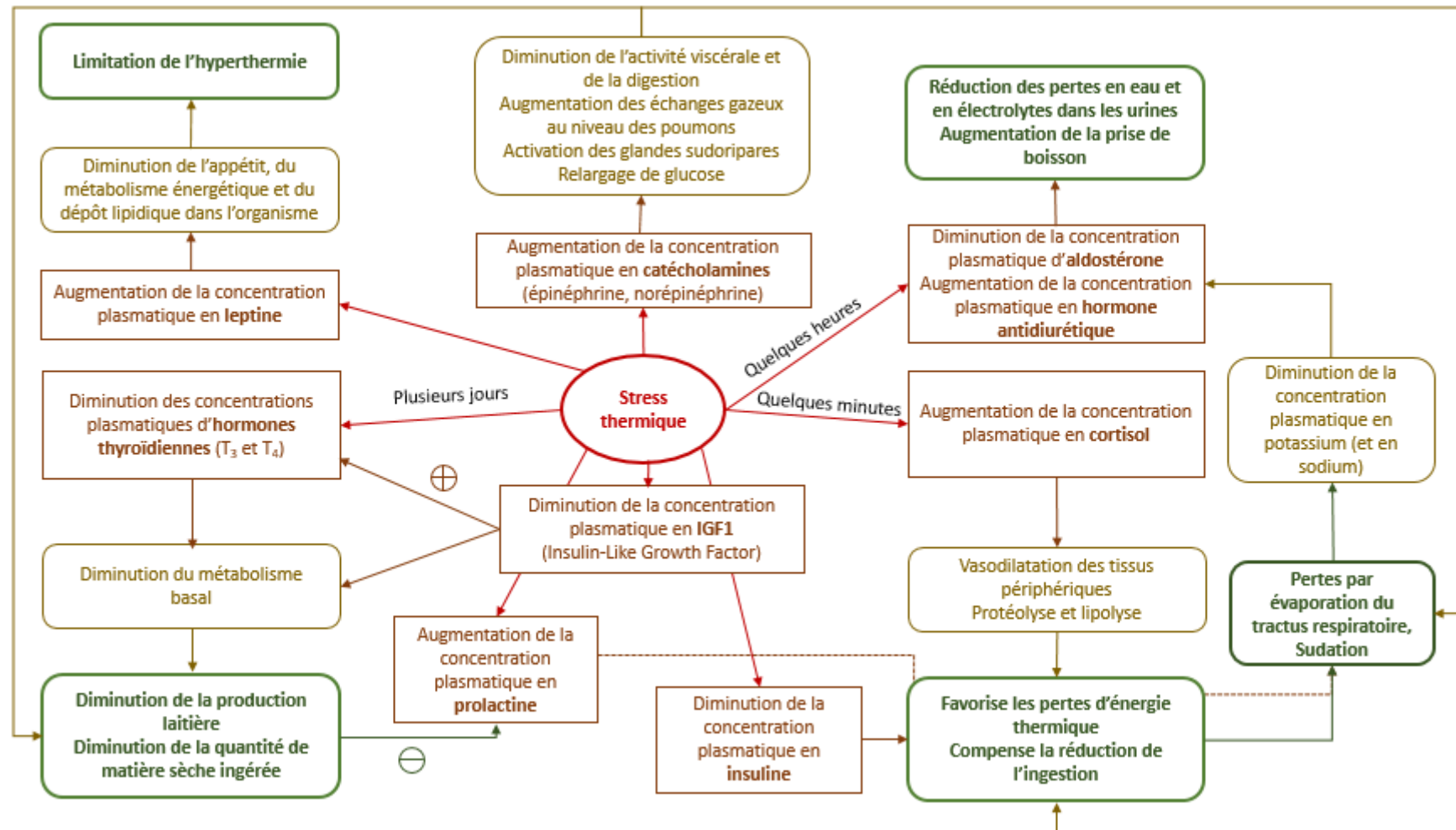


Figure 2: Modifications hormonales présentes lors de stress thermique chez les bovins

En conclusion de cette première partie, il n'existe pas de consensus concernant les conditions de stress thermique chez les bovins, un THI compris entre 68 et 74 apparaît comme seuil de stress. Ce seuil semble varié en fonction du paramètre étudié. L'intensité du stress pour un THI donné varie en fonction de la race, le niveau de production laitière, la parité, l'âge, la ration alimentaire et l'acclimatation des animaux entre autres.

Les bovins possèdent comme mécanismes principaux de lutte contre le stress thermique l'élimination de chaleur par une augmentation de la fréquence respiratoire et la sudation qui sont régies par des modifications métaboliques et des informations neuronales. Une augmentation de la température corporelle est également observée.

II- Réponses comportementales des vaches laitières au stress thermique

Après s'être penché sur les réponses physiologiques des bovins au stress thermique, les comportements à l'origine d'une compensation des pertes hydriques, ceux pour faciliter l'évapotranspiration et ceux pour diminuer la production de chaleur sont abordés dans cette partie.

A- Pour compenser les pertes hydriques

L'augmentation de la prise de boisson représente une des principales composantes des adaptations comportementales au stress thermique afin de compenser les pertes liées à l'évapotranspiration et la sudation (Becker et al., 2020). En effet, lorsque la température ambiante dépasse la température critique supérieure, la consommation d'eau augmente de 1,2 à 2 kg par degré Celsius gagné (West, 2003). Les vaches passent ainsi plus de temps à boire, 18 minutes hors période de stress thermique contre 30 minutes lorsque le THI est supérieur à 72 (Cook et al., 2007). Elles vont également plus de fois à l'abreuvoir lorsque le THI augmente (McDonald et al., 2020). La consommation d'eau a principalement lieu aux périodes les plus chaudes de la journée (Golher et al., 2021).

De plus, une eau de boisson à 10 °C comparée à une eau de boisson à 30°C entraînerait une diminution de la fréquence respiratoire, de la température à la surface de la peau et de la température rectale en période de stress thermique. La consommation d'une eau de boisson à 10 °C par rapport à une eau à 28 °C augmenterait la quantité de matière sèche ingérée et la production laitière en période de stress thermique. La consommation d'eau fraîche a ainsi un pouvoir rafraichissant sur les vaches et d'autant plus lorsque le stress thermique est élevé puisque les animaux en consomment davantage (Gauly et al., 2013). Cependant, il semblerait que les vaches préfèrent boire de l'eau à une température proche de leur température corporelle (Golher et al., 2021).

Lorsque le THI est élevé et que l'accès à l'eau est restreint, des comportements agressifs autour des points d'eau sont observés de façon plus importante sur les heures les plus chaudes de la journée (Becker et al., 2020; McDonald et al., 2020).

B- Pour faciliter l'évapotranspiration

1- Recherche d'ombre dans leur milieu de vie afin de réduire l'effet des radiations

Lorsqu'elles sont en extérieur, les vaches cherchent activement de l'ombre durant les heures les plus chaudes de la journée (Anderson et al., 2013; Becker et al., 2020). Elles préfèrent se mettre à l'ombre plutôt qu'utiliser des brumisateurs, et ce d'autant plus que la température ambiante est élevée, que les radiations solaires sont importantes et qu'il y a peu de courants d'air (Schütz et al., 2011).

2- Favoriser la position debout

Les vaches passent en conditions de THI normales, 11 à 14 heures couchées par jours. Lorsque les vaches sont soumises à des conditions de stress thermique, le temps de couchage diminue d'environ 30 % (Becker et al., 2020), il est ainsi réduit à 8 heures dans les conditions les plus défavorables (Bonnefoy J.M. & Noordhuizen J., 2011; Cook et al., 2007) voire 6 heures lorsque le THI dépasse 79 (Nordlund et al., 2019). En outre, au-delà d'un THI à 68 et d'une température corporelle supérieure à 38,8 °C, la position debout des bovins est favorisée par rapport à la position couchée (Allen et al., 2015; Anderson et al., 2013). En effet, la position debout maximise la surface corporelle accessible pour les échanges thermiques et diminue la surface de contact avec une surface chaude (Anderson et al., 2013). Cette position permet d'augmenter la surface corporelle pour les pertes thermiques par sudation, par radiation et par convection grâce aux mouvements d'air (Becker et al., 2020).

Cependant, il semblerait que le nombre de périodes sur lesquelles les vaches sont couchées ne soient pas affectées par le THI : 12 périodes en moyenne par jour (Nordlund et al., 2019).

Il est observé que lorsqu'elles sont couchées, la température rectale et la fréquence respiratoire des vaches augmentent tandis que ces paramètres diminuent quand elles se mettent debout (Atkins et al., 2018; Nordlund et al., 2019). Selon Nordlund, la température corporelle augmenterait de 0,5 °C/heure passée couchée et diminuerait de 0,25 °C/heure passée debout dans le bâtiment.

Les animaux ayant accès à des systèmes de rafraîchissement passent plus de temps couchés que ceux qui n'en ont pas, ce point sera développé dans la partie IV. En absence de compétition pour une zone de couchage à l'ombre, le temps de couchage ne varie pas en période de stress thermique (Anderson et al., 2013).

C- Pour diminuer la production de chaleur

1- Diminution de l'activité

Afin de limiter la production de chaleur par les muscles squelettiques et les tissus, les vaches diminuent leur activité physique lorsqu'il fait chaud (Becker et al., 2020; West, 2003). En effet, le temps quotidien alloué à la marche diminue lorsque le THI est supérieur à 64 (Hut et al., 2022).

2- Diminution de la quantité d'aliment ingéré

Lors de stress thermique, le premier levier sur lequel les bovins agissent afin de limiter la production de chaleur est de diminuer la consommation de matière sèche (Becker et al., 2020). Une diminution de l'ingestion est observée de l'ordre de 0,85 kg par degré Celsius au-delà d'un seuil de THI à 72 (Bonnefoy J.M. & Noordhuizen J., 2011; West, 2003). D'autres auteurs estiment que cette réduction d'ingestion peut aller jusqu'à 9,6 % par rapport à une vache en conditions thermales neutres (Becker et al., 2020). De plus, lorsque le THI est supérieur à 72, une diminution de la durée d'ingestion est observée : jusqu'à moins 92 minutes par jour (Hut et al., 2022).

La quantité de matière sèche ingérée serait corrélée à la température moyenne quotidienne qu'il faisait deux jours avant (West, 2003).

Une production de chaleur est observée pendant et après la prise alimentaire. De ce fait, lors de stress thermique, une grande partie de la prise alimentaire est décalée durant la nuit, aux heures où les pertes thermiques qui n'impliquent pas l'évaporation sont plus efficaces. Ainsi, la production de chaleur liée au métabolisme n'est pas produite durant les heures les plus chaudes de la journée (Soriani et al., 2013).

Cette diminution d'ingestion serait à l'origine d'une diminution de la production laitière et de la baisse d'activité (Bonnefoy J.M. & Noordhuizen J., 2011). La baisse d'ingestion ne serait à l'origine que de 35 % de la diminution de la production laitière (Bernabucci et al., 2010). La balance énergétique des bovins devient négative lors de stress thermique du fait de la diminution d'ingestion et des besoins énergétiques liés à la thermorégulation qui peuvent s'élever à 25 % des besoins énergétiques – en plus des besoins ordinaires (Becker et al., 2020; Ji, Banhazi, Perano, et al., 2020). La diminution d'ingestion s'explique par les phénomènes métaboliques et hormonaux explicités dans la partie I.B.2.d ainsi que par une inhibition des centres nerveux de l'appétit dans l'hypothalamus (Becker et al., 2020).

Parallèlement à la diminution de durée d'ingestion, la durée de rumination durant une période de stress thermique diminue également. Une diminution de 2,2 minutes de rumination par unité de THI gagnée au-delà de 76 est observée et, sur ces périodes, 63 % de l'activité de rumination se produisait la nuit. La diminution de durée de rumination serait, entre autres, à l'origine de la diminution de l'ingestion (Moretti et al., 2017; Soriani et al., 2013). La durée de rumination commencerait à chuter dès lors que le THI dépasserait 52 (Müschnner-Siemens et al., 2020).

En conclusion, lors de période de stress thermique, les bovins boivent plus en terme de quantité et passent plus de temps à boire - une dizaine de minutes de plus-. La consommation d'eau fraîche – à 10 °C - permet de limiter le stress thermique.

Les vaches réduisent leur temps d'activité et cherchent activement de l'ombre et de la fraîcheur. De plus, afin de favoriser les mécanismes de thermorégulation, elles passent plus de temps debout avec une réduction de 30 % du temps passé couché lorsque le THI est élevé.

Enfin, la quantité de matière sèche ingérée et le temps quotidien passé à l'ingestion diminue de l'ordre de 0,85 kg par degré Celsius au-delà d'un seuil de THI à 72. Le budget-temps alloué à la rumination diminue de 2,2 minutes par unité de THI gagnée au-delà de 76.

III- Paramètres autres que le stress thermique pouvant influencer la physiologie et le comportement des vaches laitières

A- Parité, stade de lactation et niveau de production laitière

1- Parité

Les vaches multipares ont tendance à passer plus de temps à ingérer la ration, une quinzaine de minutes en moyenne, que les primipares et elles consomment également plus en terme de quantité, environ 4 kg de matière sèche ingérée (Bach et al., 2017). De plus, les vaches multipares ont une capacité d'ingestion supérieure aux primipares : en cas de compétition ou d'accès restreint à l'aliment, elles peuvent consommer plus de matière sèche en moins de temps (Beauchemin, 2018).

Les multipares ont également tendance à passer environ cinquante minutes de plus à ruminer que les primipares (Beauchemin, 2018; Cocco et al., 2021).

En outre, tous les auteurs ne s'accordent pas sur les différences de durée de couchage en fonction de la parité des animaux. Cependant, il semblerait que les vaches multipares passent plus de temps couchées, tout du moins au début de la lactation mais que les vaches avec 3 lactations et plus passeraient 12 minutes de moins couchées (Tucker et al., 2021).

Enfin, la quantité d'eau ingérée serait positivement corrélée à la parité des bovins (Cardot et al., 2008).

2- Niveau de production laitière

Il existe une corrélation positive entre le niveau de production laitière et la durée de rumination quotidienne (Beauchemin, 2018). Il existe également une corrélation positive entre quantité de matière sèche ingérée et niveau de production laitière (Llonch et al., 2018).

Les vaches laitières hautes productrices consomment plus d'eau, environ 6-7 L de plus par litre de lait. Cela représente entre 68 L et 150 L d'eau par jour pour une vache haute productrice contre 34 L à 49 L pour une vache tarie (Golher et al., 2021).

De plus, la température ruminale des vaches hautes productrices est supérieure à celle des vaches ayant une production moindre de quelques centièmes de degrés Celsius (Liang et al., 2013).

Enfin, les vaches hautes productrices passent moins de temps couchées que les vaches avec une plus faible production laitière. Cela peut s'expliquer par la douleur liée à la pression exercée par la mamelle sur le sol ou encore par le fait qu'elles passent plus de temps à l'ingestion des aliments et donc moins de temps couchées (Tucker et al., 2021).

3- Stade de lactation

La durée d'ingestion augmente avec les jours en lait jusqu'à environ 9 semaines de lactation (Llonch et al., 2018). En effet, elle passe de 352 minutes par jour le jour du vêlage à 439 minutes par jour 30 jours post-partum selon Braun et al. (2017). Cette tendance est également observée par Braun et al. (2017) concernant la durée de rumination : elle passe de 416 minutes par jour un jour postpartum à 489 minutes par jour à 30 jours en lait.

Il existe une corrélation positive entre le temps alloué au couchage par jour et le nombre de jours en lait (Deming et al., 2013).

B- Race

Les vaches de race Prim'Holstein passent plus de temps à ruminer par jour que les vaches de race Jersiaise. Elles ingèrent plus en terme de quantité de matière sèche mais n'ont pas une meilleure capacité d'ingestion : lorsqu'est rapportée la quantité de matière sèche ingérée au poids de l'animal, il n'existe pas de différences. De même, la durée d'ingestion est identique dans ces deux races (Aikman et al., 2011).

Les races laitières boivent plus en terme de quantité que les races allaitantes. Ceci est lié au fait qu'elles produisent plus de chaleur liée au métabolisme et notamment à la production laitière (Golher et al., 2021).

Il existerait de légères différences en terme de température corporelle entre les races, les Prim'Holstein auraient une température corporelle supérieure aux Jersiaises (Kendall & Webster, 2009). La température ruminale des vaches Prim'Holstein serait supérieure de quelques centièmes de degrés à celle de vaches croisées Prim'Holstein (Liang et al., 2013).

C- Place hiérarchique

S'il existe une compétition entre les animaux ou si la nourriture n'est pas accessible à volonté, la durée quotidienne d'ingestion diminue. En effet, lors de compétition pour l'aliment, les vaches développent une capacité d'ingestion supérieure donc la quantité d'aliment ingérée par minute augmente, ce qui permet de diminuer le temps passé à ingérer l'aliment (Beauchemin, 2018; Haskell et al., 2019). Les vaches les plus âgées et les plus lourdes, qui sont souvent les dominantes, consomment plus d'aliment et passent plus de temps à manger que les dominées (Llonch et al., 2018).

De la même façon, lorsqu'il n'y pas assez de logettes par vaches dans le bâtiment, une compétition s'installe et les vaches passent moins de temps couchées (Leliveld et al., 2022).

Enfin, il existe également des comportements agressifs autour des points d'eau lorsque les animaux n'y ont pas accès à volonté et les relations hiérarchiques sont également observées au niveau de l'abreuvoir (Cardot et al., 2008; Foris et al., 2019).

D- Logement et ration alimentaire

1- Logement

Le confort du bâtiment influe sur le comportement de couchage des vaches. En effet, le CCI (Cow Comfort Index) – qui évalue la proportion de vaches en contact avec une logette qui y sont couchées – est plus élevée lorsque le substrat est du sable que sur un matelas (Cook et al., 2005). De plus, si le nettoyage du logement est insuffisant, les vaches passent moins de temps couchées (Leliveld et al., 2022). En effet, lorsque le lieu de couchage est humide, la durée de couchage peut être réduite de 5 h (Mattachini et al., 2011). Globalement, le temps de couchage est fortement influencé par la conformation du bâtiment, c'est-à-dire la localisation des logettes, leur taille et leur configuration ainsi que leur revêtement (Mattachini et al., 2011; Tucker et al., 2021).

Les vaches passent entre 10 h et 12 h par jour couchées en stabulation libre et à l'attache, tandis que les vaches au pâturage ou sur aire paillées passent 9 h par jour couchées (Tucker et al., 2021). En effet, lorsque les vaches sont au pâturage, elles passent globalement plus de temps à ingérer de l'herbe, entre 6 h et 11 h par jour, ceci limite le temps alloué à être couchées par jour (Dulphy et al., 1987; Riaboff et al., 2020).

2- Ration alimentaire

La composition de la ration alimentaire influe de façon importante sur la durée d'ingestion. En effet, une ration à base de concentrés sera consommée plus rapidement qu'une ration riche en fourrages, le foin est consommé moins rapidement que l'ensilage etc. De plus, plus les fibres contenues dans la ration sont longues, plus la durée d'ingestion augmente (Beauchemin, 2018).

De même, la durée de rumination est influencée par la taille des particules ingérées, le NDF (Neutral Detergent Fiber) ingéré, la résistance de la ration à la mastication et la digestibilité des fibres (Beauchemin, 2018).

En outre, le nombre de repas influence le budget-temps alloué au couchage : une distribution de la ration en deux fois augmente la durée de couchage par rapport à une seule distribution quotidienne d'aliment (Deming et al., 2013). Cependant, une distribution d'aliment ou une repousse de la ration fréquente diminuent le temps de couchage et de rumination (Leliveld et al., 2022). Lors de distribution d'aliment frais, les vaches ont tendance à se lever pour aller manger (Overton et al., 2002).

Enfin, la quantité de matière sèche ingérée, la composition de la ration et le moment de sa distribution influent sur la prise de boisson (Cardot et al., 2008).

E- Maladies intercurrentes et œstrus

1- Maladies intercurrentes

Lors de maladies hyperthermisantes, la température ruminale augmente en même temps que la température corporelle, c'est notamment le cas pour les mammites et les pneumonies qui peuvent être détectées lorsque la température ruminale dépasse de 0,8 °C la température ruminale basale de l'animal (Adams et al., 2013; Kim et al., 2019). De plus, une acidose subaiguë du rumen provoque une augmentation plus importante de la température ruminale au-delà de 39,2 °C (Alzahal et al., 2008).

Lorsque les vaches ont des boiteries sévères, la quantité de matière sèche ingérée et le budget-temps consacré à la consommation d'aliment diminuent d'environ 20 minutes (Bach et al., 2017; Braun et al., 2017; González et al., 2008). La durée d'ingestion diminuerait également lors de métrites et d'hypocalcémie (Braun et al., 2017; Cocco et al., 2021). Lors d'atteinte par une cétose ou une mammite, la quantité de matière sèche ingérée diminue également, -45 minutes d'ingestion lors de cétose (Bareille et al., 2003 ; González et al., 2008).

La durée de rumination diminue de 45 minutes 8 jours avant un déplacement de caillette à gauche, 25 minutes 6 jours avant une cétose subclinique, 50 minutes 5 jours avant une pneumonie et 90 minutes un jour avant une mammite clinique (Beauchemin, 2018; Braun et al., 2017; Stangaferro et al., 2016). L'hypocalcémie et la métrite réduisent également la durée de rumination (Braun et al., 2017; Cocco et al., 2021). En revanche, les vaches atteintes de boiterie ont une durée de rumination plus longue que les vaches saines (Braun et al., 2017).

Les vaches avec des boiteries sévères passeraient plus de temps debout que des vaches saines – 4 h à 4,4 h pour des vaches boiteuses contre 2,9 h – au détriment du temps passé couché (Cook et al., 2007). En revanche, certains auteurs trouvent que les vaches boiteuses passeraient plus de temps couchées que les vaches saines (Deming et al., 2013; Leliveld et al., 2022; Walker et al., 2008). De plus, les vaches malades passeraient plus de temps couchées sauf celles qui ont des mammites (Leliveld et al., 2022).

2- Œstrus

Lors de l'œstrus, la température ruminale augmenterait mais diminuerait au moment de l'ovulation (Burnett et al., 2020).

De plus, la durée de rumination chute de 17 % à 82 % lors de l'œstrus. Parallèlement à cela, l'activité quotidienne augmente, ce qui se caractérise par une augmentation du temps de marche avec le nombre de pas qui augmenterait de près de 300 % (Paudyal, 2021; Reith et al., 2014) et la durée de couchage se trouve ainsi diminuée à 40 % du budget-temps total le jour de l'ovulation (Tucker et al., 2021).

Les quantités de matière sèche ingérée et d'eau ingérée diminueraient respectivement de 14,6 % et de 15,3 % le jour de l'ovulation (Reith et al., 2014).

L'ensemble des observations de cette partie est récapitulée dans le *Tableau 3*.

Tableau 3 : Récapitulatif des facteurs autres que le THI influençant la température ruminale, l'ingestion, la rumination et le comportement des vaches laitières

Paramètre	Lactation	Race	Place hiérarchique	Logement/ration alimentaire	Maladies / Œstrus
<i>Température ruminale</i>	Augmentation de la température ruminale : hautes productrices	Température corporelle : PH > Jersiaises PH > Croisées PH		Augmentation de la température ruminale : ration acidogène	Augmentation de la température ruminale : acidose subaiguë du rumen, maladies hyperthermisantes, œstrus
<i>Ingestion</i>	Durée d'ingestion : Multipares > Primipares Augmente avec les jours en lait en début de lactation	Quantité de matière sèche ingérée : Supérieure chez les PH par rapport aux jersiaises	Durée d'ingestion : diminue avec la compétition	Durée d'ingestion : concentrés < ensilage < foin, taille des fibres Pâturage > Bâtiment	Diminution de la durée d'ingestion : boiterie, métrite, cétose, mammite, hypocalcémie, œstrus
<i>Rumination</i>	Durée de rumination : Multipares > Primipares Fortes productrices > Productrices plus faibles Augmente avec les jours en lait en début de lactation	Durée de rumination : supérieure chez les PH par rapport aux jersiaises		Durée de rumination : quantité de NDF, résistance mécanique de la ration, taille et digestibilité des fibres, distribution fréquente d'aliment	Diminution de la durée de rumination : cétose subclinique, pneumonie, déplacement de caille à droite, hypocalcémie, métrite, mammite, œstrus Augmentation de la durée de rumination : boiterie
<i>Comportement</i>	Augmentation de la durée de couchage : augmentation des jours en lait Diminution de la durée de couchage : hautes productrices		Diminution de la durée de couchage : compétition entre animaux	Durée de couchage : confort du couchage du bâtiment, distribution de l'aliment, propreté du logement, localisation et configuration de la zone de couchage	Modification de la durée de couchage : boiterie Diminution de la durée de couchage : mammites, œstrus Augmentation de l'activité : œstrus
<i>Consommation d'eau</i>	Augmentation de la quantité d'eau ingérée : vaches laitières hautes productrices	Quantité d'eau ingérée : Races laitières > Races allaitantes	Relations de dominance	Variable en fonction de la ration alimentaire	Diminution de la prise de boisson : œstrus

IV- Moyens et méthodes existants pour limiter le stress thermique chez les bovins laitiers

A- Concernant les conditions d'hébergement

1- Bâtiment et ombre : limitation du rayonnement solaire

Lorsque les animaux sont au pâturage pendant les heures de la journée où le THI est maximal, de l'ombre est nécessaire. Les arbres sont les moyens les plus efficaces pour produire de l'ombre : ils protègent des radiations solaires et créent un environnement frais et humide grâce à l'évaporation des feuilles (Armstrong, 1994). Des solutions portative – comme de grands parasols – existent pour les pâtures n'ayant pas d'ombrage naturel (Kerr, 2015). De plus, lors de fortes chaleurs, les vaches préfèrent avoir accès au bâtiment la journée mais au pâturage la nuit (Gauly et al., 2013). Paradoxalement, bien que l'ombre soit moins efficace que des brumisateurs, les vaches ont une attirance pour cette dernière lorsqu'elles ont chaud (Schütz et al., 2011).

Pour les animaux en bâtiment, les tôles d'acier peintes en blanc et agrémentés de 2,5 cm d'isolation limitent les radiations solaires (Armstrong, 1994).

De plus, l'idéal serait d'avoir entre 3,5 et 4,5 m² d'ombre/vache pour des climats chauds et secs. Une surface plus petite ne limite pas les effets négatifs du stress thermique et une surface plus importante n'est pas efficace voire délétère parce que les vaches ont tendance à se regrouper (Armstrong, 1994). L'orientation de la stabulation doit être définie de telle sorte qu'elle limite les radiations solaires l'après-midi. Pour toute autre orientation du bâtiment, il est possible de poser des rideaux ou des filets aux heures les plus chaudes pour limiter l'exposition des vaches aux radiations (Bonney J.M. & Noordhuizen J., 2011 ; Laumonnier, 2021).

Enfin, lors de stress thermique, une vache à l'ombre réduirait sa quantité de chaleur accumulée de 30 à 50 % par rapport à une vache au soleil (West, 2003). De plus, par rapport à des animaux qui n'y ont pas accès, les vaches à l'ombre ont une température rectale 0,9 °C plus faible et une fréquence respiratoire plus faible de 36 mouvements par minutes (Collier et al., 1981) ou d'environ 30 % (Gauly et al., 2013). Cependant, l'impact de l'ombre sur le comportement ne fait pas consensus. L'ombre n'aurait pas d'impact sur le comportement de couchage des vaches et aurait un effet sur la température corporelle beaucoup plus limitée avec une réduction de seulement 0,2 °C pour les animaux à l'ombre (Ji, Banhazi, Perano, et al., 2020). En revanche, selon Palacio et al. (2015), les vaches avec accès à l'ombre passeraient 6,42 fois moins de temps à l'abreuvoir, 1,75 fois plus de temps allongées et pâturent 1,5 fois plus longtemps lorsque le THI est supérieur ou égal à 72. De même, les vaches ayant accès à l'ombre au pâturage passeraient 36 minutes de plus à pâturer et seraient couchées 73 minutes de plus que des vaches n'ayant pas accès à l'ombre (Skonieski et al., 2021).

2- Rafraîchissement par convection : la ventilation

L'objectif de la ventilation, qu'elle soit naturelle ou mécanique, est de favoriser les pertes de chaleur par convection.

Tout d'abord, il est possible d'avoir une ventilation naturelle grâce à la conformation du bâtiment. Cela passe par la hauteur du toit qui doit être au minimum à 4,5 m au-dessus des vaches avec un faîtage qui permet une meilleure circulation d'air (Armstrong, 1994). De plus, des écailles peuvent être rajoutées sur le toit pour augmenter les échanges avec l'extérieur (Lomaunnier, 2021). Afin de favoriser l'évacuation de l'air chaud, la pente du toit ne doit pas dépasser 33 % (Bonnefoy J.M. & Noordhuizen J., 2011). Enfin, sur les longs pans du bâtiment, des filets brise-vent avec ouverture peuvent être installés face aux vents dominants afin d'assurer une meilleure ventilation (Lomaunnier, 2021).

De plus, la ventilation peut passer par la mise en place de ventilateurs ou de brasseurs d'air – identiques à des pales d'hélicoptère - dans le bâtiment à raison d'un ventilateur pour 10 vaches ou 13 m² de surface au sol. La vitesse idéale est de 20 km/h lorsque la température ambiante dépasse 22 °C (Bonnefoy J.M. & Noordhuizen J., 2011) ou une vitesse de 2 m/s à hauteur de vache (Ji, Banhazi, Perano, et al., 2020; Mondaca, 2019).

Les effets des ventilateurs sur les animaux lors de stress thermique sont présentés dans le *Tableau 4*.

Tableau 4 : Effets de ventilateurs la physiologie et le comportement des vaches

Etude	Conditions expérimentales	Effets observés
<i>Berman et al., 1985 Israël</i>	170 PH d'une ferme commerciale Bâtiment ouvert avec des ventilateurs sur les poteaux (2,5 m) en marche de 5 h à 22 h avec une vitesse variant de 1,5 à 3 m/s lorsque la température > 12 °C Groupe témoin avec ventilation naturelle à 0,5 m/s	Température rectale : de 10 °C à 24 °C, augmentation de 0,02 °C/kg de lait produit au-dessus de 24 kg/j Entre 26 °C et 36 °C, augmentation de la température rectale deux fois moins importante avec la ventilation forcée Température rectale influencée par le niveau de production mais pas par la parité ou le poids de la vache Fréquence respiratoire : réduction avec ventilation forcée 59 ± 1 contre 73 ± 2 avec la ventilation naturelle
<i>Calegari et al., 2014 Italie</i>	30 PH d'une ferme expérimentale Les deux lots ont des ventilateurs associés à des brumisateurs au niveau de l'auge Un lot témoin Un lot test avec une aire de repos équipée de ventilateurs Conditions climatiques : 52 jours avec un THI >72	Fréquence respiratoire : absence de différences significatives entre les lots Température rectale : absence de différences significatives entre les lots Durée de couchage : 9,5 h/j de couchage pour le lot avec ventilateur sur la zone de couchage contre 8,6 h/j pour le lot témoin

Les effets des ventilateurs ne semblent pas faire consensus.

3- Rafraîchissement par évaporation par aspersion d'eau sur l'animal

Le rafraîchissement par aspersion d'eau sur la peau de l'animal passe par différents moyens comme des brumisateurs ou des systèmes d'arrosage. Lorsque sont utilisés ces moyens de rafraîchissement, c'est l'évaporation que l'on cherche à obtenir, de la même manière que l'animal par sudation. L'évaporation des gouttelettes d'eau sur la surface de la vache dépend de la taille des gouttelettes et des conditions ambiantes – notamment de la température et de l'humidité relative - (Berman, 2008). Il est conseillé d'avoir un débit de projection de 1,25 litres par m² et une fréquence de déclenchement entre 5 et 15 minutes en fonction du THI (Bonney J.M. & Noordhuizen J., 2011).

Cependant, un des côtés néfastes de ces systèmes relève d'une augmentation de l'humidité relative dans le bâtiment en absence de ventilation correcte provoquant une augmentation du THI ambiant et donc une augmentation des conditions de stress thermique pour l'animal. De plus, cela diminue les possibilités de d'évaporation par l'animal (Berman, 2008). Elle peut également être à l'origine de maladies telles que des mammites, des boiteries ou encore des troubles respiratoires (Ji, Banhazi, Perano, et al., 2020). Cette méthode sera donc plus efficace dans les milieux chauds et secs (Gauly et al., 2013). Les effets de tels systèmes sont récapitulés dans le *Tableau 5*.

Tableau 5 : Effets de système utilisant l'aspersion d'eau sur la physiologie et le comportement des vaches

Etude	Conditions expérimentales	Effets observés
<i>Chen et al., 2015 Californie, Etats-Unis</i>	19 PH hautes productrices de ferme expérimentale Utilisation de buses de pulvérisation qui délivrent pendant 4 cessions de 3 minutes 0,4, 1,3 ou 4,5 L/min d'eau ou pas d'eau (lot témoin) à l'auge Température ambiante : 31,2 ± 3,8 °C	Fréquence respiratoire : la plus basse observée pour 1,3 L/min d'eau pulvérisée (-13 mouvements/minutes par rapport au lot témoin) Température vaginale : reste 30 minutes après traitement en-dessous de la valeur de base (39,2 ± 0,6 °C) pour des débits au-delà de 0,4 L/min
<i>Chen et al., 2016 Californie, Etats-Unis</i>	18 PH hautes productrices en ferme expérimentale Utilisation de buses de pulvérisation au niveau de l'auge à 0 L/min (témoin), 1,3 ou 4,9 L/min pendant 24 h à raison de cession de 3 minutes coupées par des arrêts du système pendant 9 minutes Température ambiante : 33 ± 3 °C	Durée d'ingestion : 5,8 ± 0,9 h/j quel que soit le traitement mais les repas sont 23 à 27 % plus longs, 13 à 16 % moins fréquents lorsque les buses fonctionnent et la durée des repas augmente 19 à 21 min/j pour chaque 1 °C de température gagné par rapport au lot témoin Température vaginale : 0,3 à 0,7 °C plus basses avec les buses en marche entre 13 h et 15 h et 17 h et 20 h
<i>Legrand et al., 2011 Californie, Etats-Unis</i>	24 PH en ferme expérimentale 12 vaches témoins et 12 vaches avec accès libre à une « douche » qui se déclenche lorsqu'une vache est dessous Température ambiante : 25,3 ± 3,3 °C	Temps passé sous la douche : très variable 3 ± 2,1 h/j, utilisation la journée entre 10 h et 19 h (89 %) Fréquence respiratoire : pas de différence avec le lot témoin Température vaginale : -0,2 °C pour les vaches ayant accès à la douche Budget-temps : temps passé couché, debout et à manger identiques

<p><i>Tresoldi et al., 2019 Californie, Etats-Unis</i></p>	<p>24 PH en ferme expérimentale</p> <p>Pas de témoins négatifs</p> <p>Lots avec différentes conditions : buses qui arrosent à un débit de 3,3 ou 4,9 L/minute avec rythme de 5 ou 10 cycles/45 minutes</p>	<p>Temps couché : 12,6 ± 0,4 h/j quel que soit le traitement</p> <p>Temps à l'auge : 5,8 ± 0,3 h/j quel que soit le traitement</p> <p>Fréquence respiratoire : 57 à 59 mouvements/minutes quel que soit le traitement</p> <p>Température vaginale : différence de 0,1 °C avec un débit de 4,9 L/minute</p>
--	--	--

Les systèmes de refroidissement par aspersion ne semblent pas avoir d'effets sur le comportement des animaux – budget-temps identiques aux lots témoins - mais ont un effet sur la physiologie en diminuant la température corporelle et la fréquence respiratoire.

4- Refroidissement par conduction grâce aux matelas de logettes à eau réfrigérée

Bastian et al. (2003), ont développé un modèle de matelas de logettes à eau avec un circuit de réfrigération et ont estimé leurs effets grâce à des modèles mathématiques.

En théorie, l'objectif de ces matelas est de favoriser les pertes thermiques par conduction majoritairement, mais également pas radiation et convection. L'eau du matelas récupère l'énergie thermique de l'animal lorsqu'il est couché, lui permettant de se rafraîchir (Bastian et al., 2003).

La température de l'eau augmente significativement de 25 % lorsque les vaches sont couchées et diminuent lorsqu'elles se lèvent. Il existe ainsi un transfert d'énergie thermique de la vache vers l'eau contenue dans le matelas. De plus, une diminution de la température de l'eau de 27,1 °C à 10 °C permet une augmentation de l'énergie thermique transférée par conduction de 174 % à 226 % (Bastian et al., 2003).

Les observations décrites précédemment sont complétées par Gebremedhin et al. (2016). Ils démontrent que la température à la surface du matelas est différente de celle de l'eau qui y circule. Par exemple, pour une eau circulante à 10,8 °C, la température à la surface du matelas est de 20,98 °C. Cela s'explique par les propriétés isolantes dans matériaux qui constituent le matelas. Ils prouvent également que plus la température autour de l'animal est élevée, plus l'humidité relative est faible dans ce microenvironnement. Ainsi, lorsque la surface du matelas est trop fraîche, de la condensation peut se former.

Les effets de tels matelas sont présentés dans le *Tableau 6*.

Tableau 6 : Effets de matelas de logettes à eau réfrigérée sur la physiologie et le comportement des vaches

Etude	Conditions expérimentales	Effets observés
<i>Ortiz et al., 2015 Arizona, Etats-Unis</i>	6 PH en conditions contrôlées (chaud et sec, tempéré, chaud et humide) Systèmes à eau refroidie à 7 °C avec soit 25 cm de sable soit 25 cm de fumier sec par-dessus Présence d'un groupe témoin avec matelas éteint	Température vaginale : 0,4 °C de différence entre les deux dispositifs par temps chaud et sec et 0,7 °C de différence par temps chaud et humide Durée de couchage : supérieure avec le sable même matelas éteint, réduction de 2 h lors de stress thermique Quantité de matière sèche ingérée : supérieure avec les matelas et le sable, inférieure pour les vaches sur les matelas et le fumier
<i>Perano et al., 2015 Etat de New York, Etats-Unis</i>	8 vaches Prim'Holstein primipares soumises à un stress thermique de 9h à 17h (THI entre 78 et 81) Matelas à eau refroidie pour 4 vaches (à 4,5 °C et 10 °C) recouvert d'un cm de sciure Groupe témoin de 4 vaches sans eau refroidie Une période de 7 semaines	Quantité de matière sèche ingérée : augmentation de 14 % pour les matelas à 4,5 °C par rapport aux témoins Température rectale : diminution de 1 °C pour les matelas à 4,5 °C par rapport aux témoins et 0,3 °C par rapport aux matelas à 10 °C Fréquence respiratoire : diminution de 18 mouvements/minute pour les matelas à 4,5 °C par rapport aux témoins
<i>Drwencke et al., 2020 Californie, Etats Unis</i>	32 vaches Prim'Holstein et Jersiaises dans une ferme expérimentale 4 traitements : matelas à eau refroidie sous 10,2 cm de sable, buses à air refroidi au niveau de l'auge et des zones de couchage, des brumisateurs au niveau de l'auge associés à des ventilateurs dans tout le bâtiment (témoin), des brumisateurs au niveau de l'auge de la quantité d'eau pulvérisée précédemment et les ventilateurs déplacés au niveau de l'auge Conditions de température : 33,3 ± 4 °C	Température vaginale : 38,7 ± 0,05 °C quel que soit le traitement mais température supérieure de 0,2 à 0,3 °C de plus à 10 h, 11 h, 20 h, 21 h et 22 h pour les vaches sur les matelas Durée de couchage : 51 ± 2 %/j quel que soit le traitement Durée de rumination : 38,6 ± 0,9 % quel que soit le traitement Fréquence respiratoire : sur l'ensemble de la journée, absence de différence mais entre 10 h et 11 h, les vaches avec matelas ont une fréquence respiratoire supérieure (70 contre 58-59 mouvements/minute)

Les matelas à eau réfrigérés semblent efficaces mais ne semblent pas suffisants à eux seuls pour limiter les effets du stress thermique chez les vaches laitières en conditions expérimentales (Ortiz et al., 2015; Perano et al., 2015). Ils semblent avoir un effet sur la physiologie – température corporelle et fréquence respiratoire – mais pas sur le comportement des vaches à part, peut-être, sur la quantité de matière sèche ingérée.

5- Association de moyens physiques de rafraîchissement

Il est conseillé d'associer la ventilation et l'humidification du pelage afin d'additionner les effets de la convection et de l'évaporation. La ventilation permet de remplacer l'air autour de l'animal et donc de limiter l'augmentation d'humidité relative ce qui crée un microenvironnement favorable à l'évaporation. Ce procédé est donc particulièrement utilisé dans les climats humides (Berman, 2008). Pour l'utilisation d'un tel dispositif, les buses d'aspersion sont placées au niveau de l'auge et de l'aire d'exercice - et non du lieu de couchage, pour ne pas l'humidifier -. De plus, dans les climats pour lesquels un fort taux d'humidité relative est observé – comme c'est le cas en Europe -, il est possible d'utiliser des brumisateurs ou des gicleurs directement couplés à des ventilateurs qui refroidissent non pas les animaux mais l'air ambiant (Bonnefoy J.M. & Noordhuizen J., 2011).

Certains auteurs ont étudié les effets conjoints de ces deux moyens de rafraîchissement, ils sont récapitulés dans le *Tableau 7* :

Tableau 7 : Effets conjoints de ventilateurs et de brumisateurs sur la physiologie et le comportement des vaches laitières

Etude	Conditions expérimentales et moyens de rafraîchissement	Effets obtenus
<i>Anderson et al., 2013</i> <i>Arizona, Etats-Unis</i>	144 vaches PH multipares dans une ferme commerciale Lot témoin Lot test : association de ventilateurs et brumisateurs rotatifs qui suivent l'ombre en fonctionnement 16,5 h par jour (8h30 à 1 h) THI moyen de l'étude : 80,2	Température vaginale : 38,9 °C avec les ventilateurs et brumisateurs contre 39,1 °C ± 0,4 °C sans Interaction rafraîchissement x heure de la journée : 0,4 °C de moins avec traitement entre 6 h et 8 h et 15 h et 16 h Durée de couchage (capteurs d'activité au niveau des membres postérieurs) : 9,5 h avec rafraîchissement vs 8,6 h sans Périodes de couchage : 12,8 périodes/jour avec solution de rafraîchissement contre 10,7 sans Effets sur le THI : THI plus faible de 5,9 % le matin, 0,8 % l'après-midi et 1,7 % le soir
<i>Berman, 2008</i> <i>Israël</i>	6 vaches PH d'une ferme expérimentale Zone de 15x15 cm mouillée sur laquelle est appliquée de l'air de 0,5 à 3 m/s Témoin : vache elle-même mouillée avec une vitesse d'air à moins de 0,1 m/s	Température des poils et de la peau de la surface mouillée : pas de différence entre 0,5 m/s et l'absence de ventilation. A 1 et 2 m/s, les valeurs minimales de température des poils restent 6 à 7 minutes sur la zone mouillée et 8 à 11 minutes sur la zone sèche. La peau mouillée permet de diminuer de 10 à 11 °C la température de la peau sèche.
<i>Calegari et al., 2016</i> <i>Italie</i>	30 PH d'une ferme expérimentale 2 conditions : l'aire de repos équipée de ventilateurs et brumisateurs (SW) et l'aire de repos équipée seulement de ventilateurs (SV) THI maximum quotidien compris entre 65 et 86	Fréquence respiratoire : 60,2 mouvements/minutes en moyenne pour le lot SV contre 55,8 pour le lot SW Température rectale : 38,7 °C pour SV contre 38,8 °C pour SW Durée de couchage : 11,8 h/jour pour SW contre 10,7 h/jour pour SV

<p><i>Levit et al., 2021 Israël</i></p>	<p>30 PH en ferme expérimentale</p> <p>Groupe témoin avec 3 cessions de rafraichissement de 45 minutes avec brumisateurs et ventilateurs</p> <p>Groupe test avec 8 cessions de 45 minutes de rafraichissement avec brumisateurs et ventilateurs</p>	<p>Température ruminale : en-dessous de 39 °C avec 8 cessions de rafraichissement</p> <p>Durée d'ingestion : identique</p> <p>Durée de couchage : identique</p> <p>Durée de rumination : 90 minutes de plus avec 8 cessions de rafraichissement</p>
<p><i>Ortiz et al., 2010 Arabie-Saoudite</i></p>	<p>Ferme commerciale</p> <p>Expérience 1 : 63 PH multipares exposées à une ventilation avec brumisateur intégré 18 h, 21 h ou 24 h par jour</p> <p>Expérience 2 : 21 PH primipares et 21 PH multipares avec même système 21 h ou 24 h par jour</p> <p>Température ambiante : 37 ± 1,6 °C et 35 ± 1,1 °C</p>	<p>Expérience 1 : Température vaginale : température en-dessous de 39 °C (38,88 °C) avec les ventilateurs allumés 24h/j</p> <p>Expérience 2 : Température vaginale : pas d'effets du traitement sur les primipares</p>

Il semble que l'association entre un ventilateur et un brumisateur aient des effets positifs à la fois sur la physiologie – diminution de la température corporelle et diminution de la fréquence respiratoire – et sur le comportement des vaches – augmentation de la durée de couchage et de rumination -.

B- Concernant la gestion d'eau et d'aliment

1- Distribution et composition de l'aliment

Etant donné que la quantité de matière sèche ingérée diminue lors de stress thermique, une des stratégies nutritionnelles qui vise à limiter ce phénomène consiste en une augmentation de la densité énergétique et nutritive de la ration. Cela se traduit par une diminution des fibres contenues dans la ration, une augmentation de la quantité de concentrés distribués et une supplémentation en matière grasse (Baumgard et al., 2014). Il est ainsi conseillé de favoriser les apports énergétiques sous forme d'amidon lent tels que le maïs ou le sorgho et d'apporter des fibres digestibles grâce à de la pulpe de betterave ou du son (Bonnetoy J.M. & Noordhuizen J., 2011).

En effet, comme explicité précédemment (partie II.C.2), les fibres sont à l'origine d'une importante production de chaleur dans le rumen, une ration autour de 23 % de NDF serait suffisante pour l'équilibre du rumen et limiterait la production d'énergie thermique (Baumgard et al., 2014).

De plus, il est important d'augmenter la densité en protéines dans la ration afin d'en compenser le manque lié à la diminution de l'ingestion induite par le stress thermique. Cependant, des effets indésirables sont observés lors d'augmentation de la quantité de protéines hautement dégradables contenues dans la ration. En effet, avec le ralentissement de la motricité ruminale et donc l'augmentation du temps de résidence dans le rumen, les protéines y sont très fortement dégradées, ce qui pourrait être à l'origine d'une augmentation la quantité d'urée et d'ammoniac dans le sang lors de stress thermique (Baumgard et al., 2014; Conte et al., 2018). Ainsi, la quantité de protéines ne doit pas dépasser 14 à 16 % de la ration avec une dégradabilité maximale de 60 % dans le rumen (Bonnefoy J.M. & Noordhuizen J., 2011).

En outre, l'augmentation de la quantité d'acides gras contenus dans la ration permettrait une réduction de la production de chaleur de près de 50 % par rapport à un fourrage tout en conservant la quantité de matière sèche ingérée. Cependant, cet ajout de matières grasses dans la ration ne serait pas associé à des manifestations de stress thermique moins intenses : les animaux nourris avec plus de matières grasses ont la même température rectale et la même fréquence respiratoire (Baumgard et al., 2014). Ainsi, les effets néfastes de l'ajout de matière grasses dépendrait de la quantité intégrée dans la ration (Conte et al., 2018). L'incorporation maximale d'acides gras se situe à 4 % de la matière sèche ingérée pour ne pas perdre l'activité des bactéries cellulolytiques et limiter les effets néfastes (Bonnefoy J.M. & Noordhuizen J., 2011).

Par ailleurs, l'utilisation de ionophores - tels que le monensin -, permettent une augmentation de la production de propionate, un précurseur du glucose chez les ruminants. Cela permet de maintenir la glycémie chez les vaches laitières en période de stress thermique (Baumgard et al., 2014).

Enfin, il est préférable d'étaler la distribution de l'aliment tout au long de la journée et d'augmenter le nombre de distribution de 4 à 6 fois par jours afin de limiter l'augmentation de température corporelle postprandiale. Le moment de la journée où les distributions ont lieu est également important. Il est conseillé de distribuer la majeure partie de la ration le soir, c'est-à-dire lorsque les conditions ambiantes sont plus propices (Bonnefoy J.M. & Noordhuizen J., 2011).

2- Distribution de l'eau et d'électrolytes

Tout d'abord, il existe différents moyens afin de compenser les pertes hydriques des vaches. Ainsi, il est possible d'incorporer 1 à 2 litres d'eau par vache à la ration. Cela passe également par une augmentation de la disponibilité de l'eau. En effet, lors de stress thermique, il est nécessaire d'augmenter la longueur des abreuvoirs – jusqu'à 9 m pour 100 vaches- ou de placer plus d'abreuvoirs et de favoriser de l'eau à basse température – environ 10 °C – pour rafraîchir les vaches (Bonnefoy J.M. & Noordhuizen J., 2011). La distribution d'eau à 10 °C permet de diminuer la température corporelle de 0,75 °C plus longtemps que de l'eau à 28 °C (Stermer et al., 1986).

Il est important de maintenir les abreuvoirs propres lors de stress thermique. En effet, comme nous l'avons vu précédemment, la consommation d'eau permet à elle seule de réduire la température ruminale (Baumgard et al., 2014).

La sueur des vaches étant composée majoritairement de potassium, une complémentation en potassium est nécessaire lors de stress thermique. Il est très important de la compléter avec un apport en sodium et en magnésium du fait des compétitions pour leur absorption qui existent dans l'intestin (Baumgard et al., 2014).

C- Génétique

Comme explicité dans les parties précédentes, les vaches de races Prim'Holstein sont particulièrement sensibles au stress thermique. Tout l'enjeu de la sélection génétique repose dans une meilleure résistance au stress thermique en limitant la perte de productivité.

Tout d'abord, il est possible d'augmenter la productivité ou la résistance thermique en réalisant un croisement simple entre deux races avec ces caractéristiques. Par exemple, un croisement entre un zébu et une Prim'Holstein augmente la productivité du zébu et diminue la sensibilité au stress thermique de la Prim'Holstein (Berman, 2011).

L'amélioration génétique peut passer par l'apport dans la race productive de modifications phénotypiques de résistance au stress thermique. Ainsi, le gène « silk hair » apporté par introgression – c'est-à-dire par identification et croisements successifs – entre des vaches Prim'Holstein avec des vaches de race Carora leur confère des poils beaucoup plus courts (Olson et al., 2003). L'hybridation entre des races productrices et des races thermorésistantes permet également d'augmenter la capacité de sudation des animaux. Par exemple, un croisement entre une Prim'Holstein et une Senepol augmente le taux de transpiration de $100 \text{ g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ (Berman, 2011).

Enfin, il est possible au sein d'une race productive de sélectionner des individus tolérants au stress thermique en se basant sur des critères tels que la température corporelle, la production laitière ou la quantité de matière sèche ingérée en cas de stress thermique (Garner et al., 2016).

Les stratégies génétiques explicitées précédemment sont récapitulées dans la *Figure 3*.

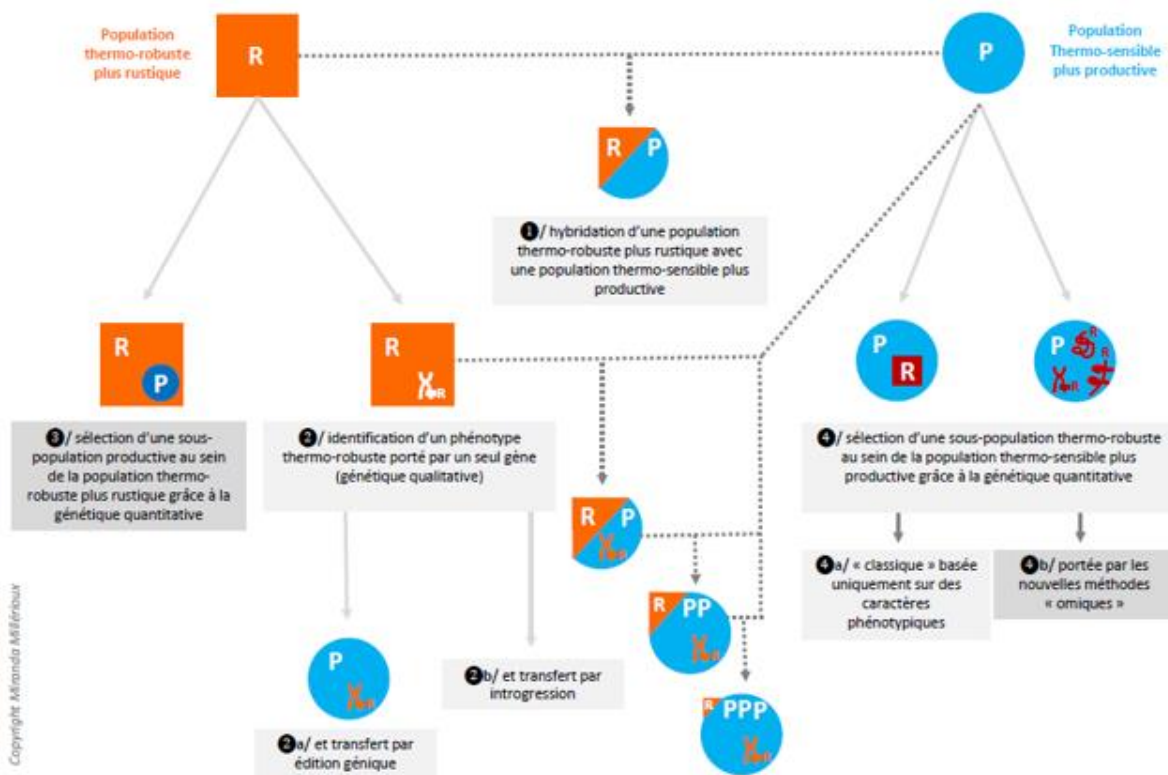


Figure 3 : Stratégies génétiques afin de limiter le stress thermique chez des races productives (d'après Miranda Millérioux, JNGTV 2022)

Tableau 8 : Comparaison et effets des différents moyens de rafraîchissement des vaches laitières

Moyen ou méthode de rafraîchissement	Avantages	Inconvénients	Effets sur les paramètres physiologiques ou comportementaux
<i>Ombre/bâtiment</i>	Peu coûteux/déjà présent Aménagements du bâtiment possibles Réduit le rayonnement Préférence des vaches pour l'ombre par rapport à un système par aspersion	L'ombre pas aussi efficace que des brumisateurs Si mal conçu peut faire effet de serre	Diminution de la température rectale et de la température corporelle Diminution de la fréquence respiratoire Absence de consensus sur le budget-temps alloué aux différentes activités des vaches
<i>Ventilation mécanique</i>	Efficace au niveau de l'aire de couchage Diminue l'humidité ambiante	Consommation d'électricité Coût d'entretien	Absence de consensus concernant les effets sur la physiologie et le comportement
<i>Aspersion d'eau</i>	Efficace au niveau de la table d'alimentation	Augmentation de l'humidité ambiante Consommation d'eau accrue Coût d'entretien	Diminution de la fréquence respiratoire Diminution de la température corporelle Absence d'effet sur les budget-temps alloué aux différentes activités des vaches
<i>Combinaison ventilateurs et aspersion d'eau</i>	Méthode la plus efficace Limite l'augmentation de l'humidité ambiante	Consommation d'eau et d'électricité Coût/entretien	Diminution de la température corporelle Diminution de la fréquence respiratoire Augmentation de la durée de couchage Augmentation de la durée de rumination
<i>Matelas à eau réfrigérée</i>	Réduction de la consommation d'eau par rapport à un système par aspersion Réduction de l'humidité ambiante par rapport à un système par aspersion Récupération de l'énergie thermique produite	Humidité à la surface du matelas lorsque le point de rosée est dépassé Moins efficace que l'aspersion associée à la ventilation	Augmentation de la quantité de matière sèche ingérée Diminution de la température rectale Diminution de la fréquence respiratoire
<i>Génétique</i>	Faible coût Durable dans le temps	Longue à mettre en place	

Partie 2- Etude expérimentale :

Effet d'un matelas de logettes à eau refroidie sur le bien-être et la physiologie des bovins laitiers en période chaude

I- Contexte et objectifs du projet BOVICLIM

A- Contexte du projet BOVICLIM

Comme explicité dans la partie précédente, il existe de nombreuses conséquences néfastes au stress thermique sur les bovins laitiers. Dans un contexte où les étés sont de plus en plus chauds et les animaux soumis à un stress thermique plus important à cette période, les moyens développés afin de limiter celui-ci chez les bovins sont nombreux -ventilateurs, brumisateurs, etc.- mais la plupart consomment beaucoup d'eau et/ou d'énergie (Ferreira et al., 2016; Harner et al., 2013).

Peu d'études existent sur l'évaluation des matelas à eau thermo-régulée (Drwencke et al., 2020; Ortiz et al., 2015; Perano et al., 2015).

Tableau 9 : Récapitulatif des études évaluant l'efficacité de matelas à eau réfrigérée

Etude	Conditions expérimentales	Paramètres étudiés sur les vaches
<i>Ortiz</i> 2015 Université d'Arizona (Etats-Unis)	6 vaches PH multipares en conditions contrôlées (chaud et sec, tempéré, chaud et humide) Systèmes à eau refroidie à 7°C avec soit 25 cm de sable soit 25 cm de fumier sec par-dessus Présence d'un groupe témoin sans refroidissement 2 périodes de 40 jours	Quantité de nourriture distribuée et refus Composition du lait et CMT (California Mastitis Test) Température vaginale (dispositif intra-vaginal) Température rectale Température à la surface de la peau Fréquence respiratoire (mesure visuelle) Position de la vache (capteur de position)
<i>Perano</i> 2015 Université de Cornell (Etats-Unis)	8 PH primipares soumises à un stress thermique de 9h à 17h (THI entre 78 et 81) Matelas à eau refroidie pour 4 vaches (à 4,5 °C et 10 °C) recouvert d'un cm de sciure Groupe témoin de 4 vaches sans eau refroidie Une période de 7 semaines	Production laitière Quantité de matière sèche ingérée Température rectale Fréquence respiratoire (mesure visuelle)

<i>Drwencke</i> 2020	32 vaches PH et Jersiaises	Température vaginale (dispositif intra-vaginal)
Université de Californie (Etats Unis)	Matelas à eau refroidie dans un des quatre groupes (tests d'autres moyens de rafraîchissement des vaches) sous 10,2 cm de sable	Position et la localisation (caméras et dispositif d'analyse vidéo)
		Rumination (capteur sur un collier)
		Fréquence respiratoire (mesure visuelle)

Il n'existe pas de publications dans lesquelles l'effet des matelas est évalué en condition de terrain et sans atmosphère contrôlée. Il apparaît également que l'efficacité des matelas à eau réfrigérée soit controversée : il semble que ces derniers soient efficaces mais pas autant que d'autres systèmes de refroidissement selon les études présentées plus haut (*Tableau 9*).

C'est dans ce cadre que l'entreprise BIORET AGRI®, ayant de bons retours sur leurs matelas à eau réfrigérée – meilleur confort lors d'épisodes de stress thermique, production laitière augmentée – souhaite réaliser un essai pilote (*L'Avenir Agricole*, 2020). De plus, aucune publication ne fait part d'utilisation de matelas avec une fine couche de paille broyée dessus comme le conseille le fabricant de matelas.

B- Objectifs et hypothèses du projet BOVICLIM

Le projet BOVICLIM a pour objectifs d'estimer les effets du refroidissement de l'eau dans les matelas de logettes Aquaclim® (Bioret-Agri, France) en période chaude sur la physiologie, le comportement, la production laitière et l'incidence et/ou la persistance de certaines maladies endémiques (boiteries, mammites) chez des vaches laitières hautes productrices, en condition de terrain. Cette thèse s'intéresse aux effets du matelas sur la physiologie et le comportement des vaches, celle de Lucas Bouglé aux effets sur la production laitière et les boiteries.

Les hypothèses du projet sont présentées dans la *Figure 4*.

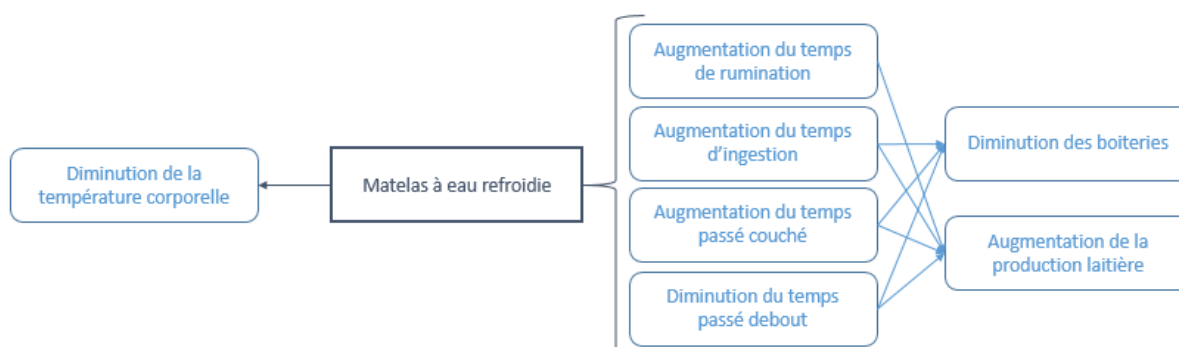


Figure 4 : Hypothèses du projet BOVICLIM

II- Matériel et méthode

A- Type d'étude

Cette étude est un essai clinique randomisé, de supériorité en conditions de terrain.

L'étude est contrôlée puisque que l'on compare un lot de vaches dont la case contient des matelas à eau réfrigérée avec un lot de vaches dont la case est équipée de matelas de logettes "classiques".

Cet essai est randomisé, c'est-à-dire que les vaches sont aléatoirement réparties dans un des deux lots.

C'est une étude de supériorité : il est supposé que les matelas de logettes à eau réfrigérée sont supérieurs aux matelas de logettes classiques en ce qui concerne les paramètres étudiés.

De plus, il est possible de qualifier l'étude de "pilote" car réalisée sur un seul élevage.

Enfin, l'étude est réalisée partiellement en double aveugle. En effet, l'animal n'a pas conscience du traitement administré, ici le matelas auquel elle est affectée. Les variables sont mesurées en double aveugle : ni l'animal ni l'observateur n'ont connaissance du traitement administré dans le cas de mesure de la température ruminale, les durées d'ingestion et de rumination et la prise d'images par les caméras.

B- Critères d'efficacité

Les critères d'efficacité principaux du projet BOVICLIM sont la température corporelle, le temps passé debout et la production laitière.

Les critères d'efficacité secondaires sont la fréquence respiratoire, le temps passé à s'alimenter, s'abreuver, ruminer et se coucher, la prévalence des tarsites, l'incidence et la persistance des boiteries, la fréquentation du robot de traite, l'intervalle entre traite et les taux butyreux et protéiques.

Les données concernant la production laitière et les boiteries ne sont pas évaluées dans cette thèse (Lucas Bouglé, ONIRIS).

Les fréquences respiratoires des animaux n'ont pas pu être relevées pour le moment du fait du manque de précision des caméras.

C- Participants

1- Lieu de l'essai : critères de sélection

Pour la réussite des objectifs de l'étude, il est nécessaire de sélectionner une exploitation de vaches laitières de race Prim'Holstein avec une production moyenne supérieure à 9 000 L de lait par vache et par an (vaches laitières hautes productrices), équipée de robots de traite afin de faciliter la récupération des données, où les vaches sont logées en stabulation libre composée de logette -au moins en été- avec la possibilité de séparer la stabulation en deux lots distincts. Cette exploitation doit être capable de fournir au moins 90 vaches entre 0 et 150 jours en lait entre juin et septembre -durée de l'étude-, afin d'avoir une puissance suffisante pour les tests statistiques ultérieurs (cf II.C.3). En ce qui concerne la localisation de l'exploitation, il est nécessaire de se situer dans une région avec au moins 20 jours d'été dont le THI est supérieur ou égal à 68.

L'élevage ainsi sélectionné est une exploitation commerciale zéro pâturage du Morbihan avec en moyenne 200 vaches à la traite par an, produisant en moyenne 10 811 L de lait par vache et par an. Les vêlages ont lieu toute l'année. Les animaux sont logés dans un bâtiment équipé de logettes toute l'année. Il est composé de quatre cases distinctes, chacune dotée d'un robot de traite LELY Astronaut® (Figure 5).

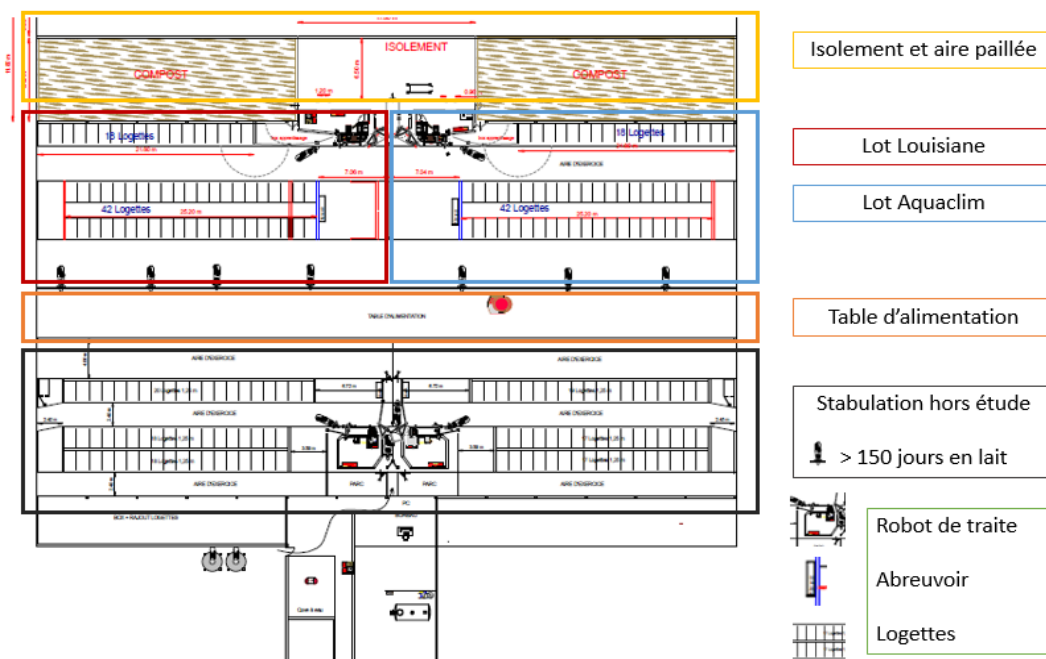


Figure 5 : Plan du bâtiment de l'exploitation sélectionnée réalisé par l'entreprise LELY®

L'alimentation est distribuée quatre fois par jour à l'aide d'un robot d'alimentation automatisé (LUCAS G Ron Mix®). Des repousses sont faites tout au long de la journée. La ration est à base d'ensilage de maïs équilibrée à 25 kg de lait.

2- Dates de l'essai

L'essai a lieu de juin à septembre afin de s'assurer d'avoir au moins 20 jours durant lesquels le THI est supérieur ou égal à 68, c'est-à-dire pour lesquels les animaux peuvent être soumis à un stress thermique.

Ci-dessous se trouvent les relevés de THI de la station météorologique Météo France de Naizin (56), la plus proche de l'exploitation choisie (Figure 6).

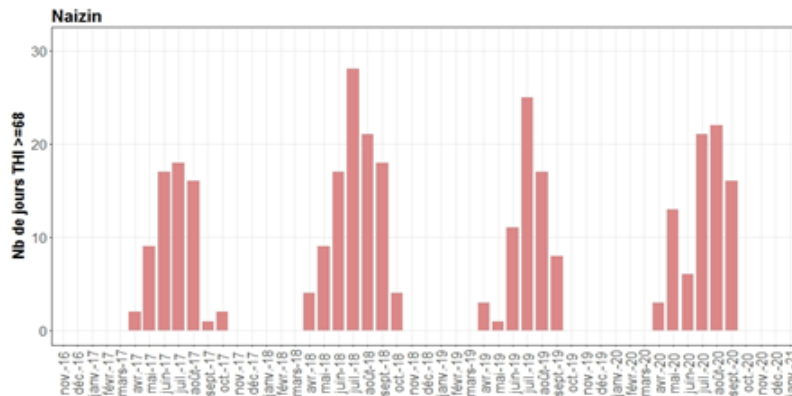


Figure 6 : Relevé du nombre de jour où le THI ≥ 68 sur les 4 quatre dernières années à la station météorologique de Naizin

Lors des quatre dernières années, entre les mois de juin et septembre, le THI est aisément supérieur ou égal à 68 pendant plus de 20 jours durant l'été.

3- La sélection des individus de l'étude : taille de l'effectif et allocation

Afin de déterminer le nombre de sujets nécessaires dans chaque lot, un calcul de la taille d'échantillons pour un test de supériorité du produit testé par rapport au groupe contrôle est réalisé.

L'hypothèse nécessitant le plus d'animaux est la mesure de température corporelle. En effet, s'il l'on veut observer une diminution de 0,6 °C dans le lot test par rapport au lot témoin, avec un risque de première espèce de 0,05, une puissance de 0,8, une variance à 1 et une perte de sujets au cours d'étude de 10 % (changements de lots, données manquantes, etc.), il faut au moins 45 sujets dans chaque lot.

Étant donné le nombre de vêlages et la structure de l'élevage, 60 vaches sont intégrées dans chaque lot. Parmi ces 60 vaches se trouvent 1/3 de primipares et 2/3 de multipares.

La constitution des lots est randomisée et stratifiée sur la parité (primipares, 2^{ème} lactation et 3^{ème} lactation et plus). La liste de randomisation est générée grâce au site *icostatistics* selon un code de Inge Christoffer Olsen sur le logiciel R. La randomisation est effectuée avec un effectif de départ de 152 vaches par groupe, stratifiée sur la parité (primipares vs multipares), par blocs de 4 avec une graine aléatoire à 42. Au départ de l'étude et à chaque nouveau vêlage, les vaches de moins de 150 jours en lait sont réparties aléatoirement dans une des deux cases. Les animaux de plus de 150 jours en lait sont sortis de l'étude et sont logés dans une des deux autres cases de l'exploitation.

L'entrée dans une case se fait 24h après vêlage tant qu'il y a moins de 60 vaches par case. Les sorties se font par groupe de 5 vaches afin de limiter les manipulations par l'éleveur.

D- Les interventions : les matelas de logettes à eau refroidie AQUACLIM® et matelas de logettes LOUISIANE®

L'ensemble du matériel pour le couchage des vaches est produit par l'entreprise BIORET AGRIC® (Nort-sur-Erdre, France). Cette entreprise valorise le caoutchouc recyclé afin de produire des solutions de couchage pour les vaches laitières.

Les logettes du lot témoin sont équipées de matelas LOUISIANE®. Ils possèdent une épaisseur de 40 mm, une largeur de 1800 mm et font 1,70 m de long. Ils sont composés d'une sous-couche de granulats de caoutchouc de 35 mm d'épaisseur, d'un film PVC responsable de l'étanchéité et d'un revêtement en caoutchouc. Chaque matelas est doté de sillons qui facilitent l'évacuation des liquides (Figure 7).



Figure 7 : Matelas de logettes LOUISIANE® (source : <https://agric.bioret-corp.com/produits/matelas/louisiane>)

Les matelas de logette AQUACLIM® sont ceux présents dans le lot de vaches intervention. Ces matelas contiennent des poches d'eau climatisées par un système rafraîchissant qui peut provenir de la géothermie ou d'une pompe à chaleur. L'énergie thermique produite par la vache est récupérée par l'eau contenue dans le matelas et transférée dans un circuit et peut être utilisée pour chauffer l'eau de nettoyage, l'eau de buvée des veaux ou encore être utilisée lors des cycles de nettoyage du robot ou des manchons trayeurs (Figure 8).

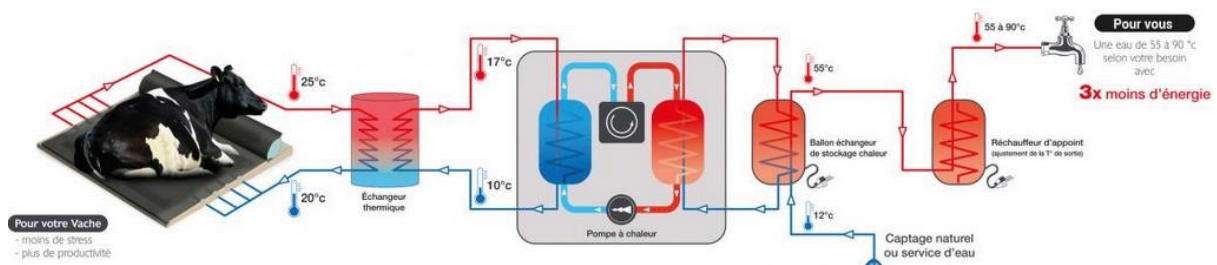


Figure 8 : Transferts thermiques du dispositif AQUACLIM® (source : <https://agric.bioret-corp.com/produits/matelas-et-genouilleres-eau/aquaclim-thermodynamique>)

Les caractéristiques techniques du matelas sont les suivantes : la surface est composée de caoutchouc avec une double armature et d'une sous-couche en latex de 35 mm d'épaisseur. Se trouve ensuite une poche d'eau dans laquelle sont placées des canules dans lesquelles circulent un fluide caloporteur (*Figure 9*).

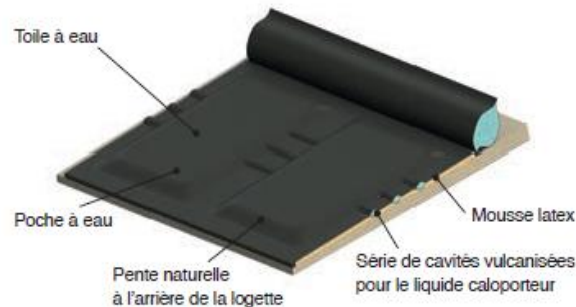


Figure 9 : Schéma d'un matelas de logette AQUACLIM® (source : <https://agri.bioret-corp.com/produits/matelas-et-genouilleres-eau/aquaclim-thermodynamique>)

Le fabricant conseille de disposer 300 g de substrat par jour et par vache sur ces deux types de matelas. Dans l'exploitation de l'étude, l'éleveur renouvelle la farine de paille broyée deux fois par jour à raison de 500 g par logette.

La pompe à chaleur est réglée de telle sorte que la température de l'eau réfrigérée ne dépasse pas le point de rosée. En effet, au-dessous de cette température, l'eau condense et de l'humidité se dépose sur le matelas, ce qui représente un effet délétère. La pompe à chaleur des matelas de logettes AQUACLIM® a cessé de fonctionner entre le 26/07/2021 et le 02/08/2021.

Enfin, huit ventilateurs horizontaux CYCLONE 360°/72'' sont installés dans la stabulation à raison de deux par case. Pour des raisons éthiques, il est prévu que -si plus de 20% des vaches ont une fréquence respiratoire trop élevée (supérieure à 75 mouvements par minute), ces ventilateurs seront mis en marche.

Chaque ventilateur possède une hélice avec 6 pales qui permettent une diffusion de l'air à 360° sur 18 mètres, à une vitesse allant de 0,5 à 1,5 m/s. La vitesse de l'hélice dépend de la température ambiante mesurée par une sonde présente au sein de l'appareil (*Figure 10*).



Figure 10 : ventilateur CYCLONE 360°/72'' (source : <https://agri.bioret-corp.com/produits/ventilation/cyclone-360>)

Le ventilateur est allumé le 19/08/2021 par l'éleveur et ce jusqu'à la fin de l'étude, sans que le critère d'alerte n'ait été observé. De plus, les allées de chaque lot sont raclées 12 fois par jour à l'aide d'un racleur automatisé.

En résumé, voici le logement des vaches durant l'étude (*Figure 11*).

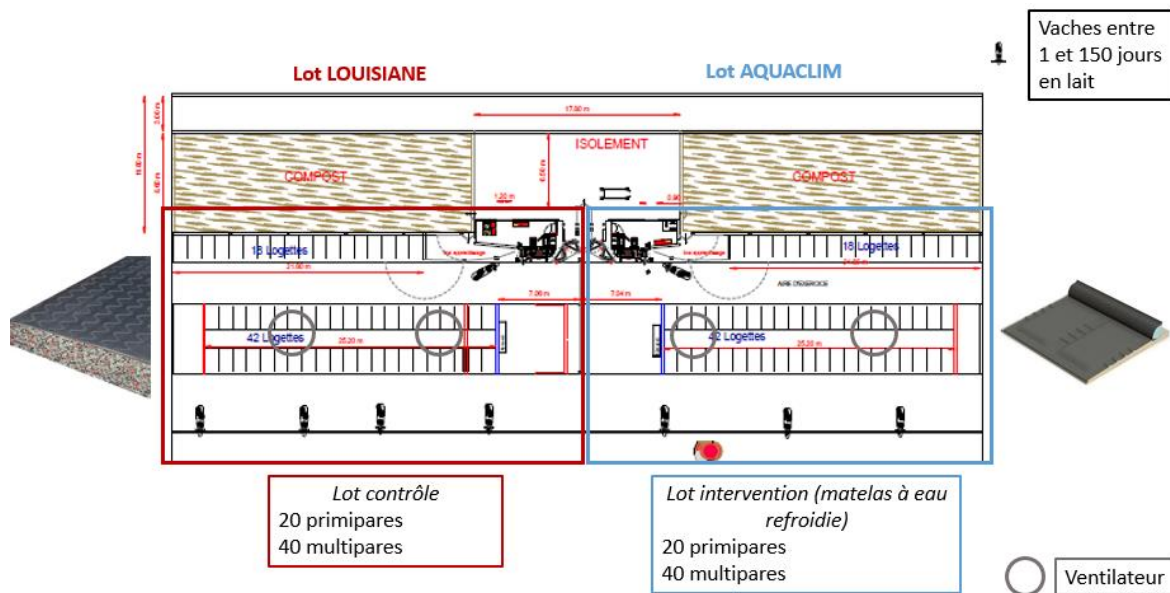


Figure 11 : Constitution et logement des vaches dans chaque lot

E- Récolte des données et analyses statistiques

1- Choix des variables explicatives et à expliquer

Les variables à expliquer sont les variables d'intérêt, aussi appelées variables dépendantes que l'on cherche à décrire, expliquer et modéliser. Elles sont les suivantes (Tableau 10) :

Tableau 10 : Description des variables à expliquer

Nom Variable	Signification	Type	Unité/modalité
<i>Température ruminale</i>	Température mesurée à l'aide de dispositifs intra-ruminaux	Variable continue comprise entre 37,8 et 42 °C	En °C
<i>Temps d'ingestion</i>	Durée d'ingestion des animaux mesurée à l'aide de capteurs angulaires	Variable continue comprise entre 140 et 510 minutes	En minutes
<i>Temps de rumination</i>	Durée de rumination des animaux mesurée à l'aide d'un accéléromètre	Variable continue comprise entre 250 et 750 minutes	En minutes
<i>Budget-temps par activité</i>	Durée passée debout dans le couloir, à marcher dans le couloir, debout dans les logettes, couchée dans les logettes, à manger, à boire et à la traite	Variable continue calculée	En minutes
<i>Indices de confort et d'occupation du bâtiment</i>	CLI, CSI, CCI, SUI et SPI (cf paragraphe II-E-6-c-2)	Variable comprise entre 0 et 1 calculée	Sans unité

Les variables dépendantes sont expliquées à l'aide de variables explicatives. Elles permettent de décrire, d'expliquer et de modéliser la variable à expliquer. Elles sont présentées dans le (*Tableau 11*) :

Tableau 11 : Description des variables explicatives

Nom Variable	Signification	Type	Unité/modalité
<i>THI</i>	Temperature-Humidity Index, mesuré à l'aide de capteurs dans le bâtiment	Variable continue calculée	Sans unité Formule de calcul présentée ultérieurement
<i>Localisation</i>	Lot dans lequel les animaux sont présents : Louisiane ou Aquaclim	Variable qualitative binaire	Sans unité
<i>Parité</i>	Nombre le lactation de la vache	Variable qualitative en 3 modalités : 1, 2 et 3 ou plus	Sans unité
<i>JEL</i>	Jour En Lait : stade dans la lactation de l'animal. Ils se décomptent à partir du vêlage de l'animal.	Variable continue comprise entre 0 et 150	Jours
<i>Ventilateur</i>	Modélise l'allumage des ventilateurs	Variable qualitative binaire : oui ou non	Sans unité

La préparation des données de l'étude et leur analyse sont réalisées sur le logiciel R® version 4.1.2.

Pour chaque variable, des tests de comparaison de moyennes entre les deux lots sont appliqués avec la fonction *t.test* afin de décrire le jeu de données :

- un test de Student si les données suivent une distribution normale et ont des variances homogènes,
- un test de Welch si les données suivent une distribution normale et ont des variances non homogènes.

Un modèle linéaire mixte avec une structure d'autocorrélation auto-régressive d'ordre 1 sur les résidus est mis en place sur chaque variable quantitative à expliquer à l'aide de la fonction *lme* (package *nlme*). Un effet aléatoire est ajouté de tel sorte qu'il soit lié à l'individu. Toutes les variables explicatives sont testées.

Un tel modèle s'écrit de la façon suivante (*Équation 2*) –sauf pour les indices de confort et d'occupation du bâtiment qui sera présenté ultérieurement- :

Équation 2 : Modèle linéaire mixte avec structure autorégressive d'ordre 1

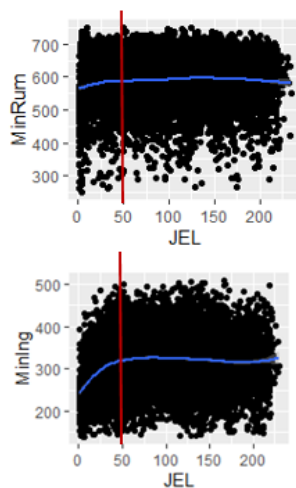
$$VD_{t,i} = \mu + \beta X_{t,i} + \varepsilon_{t,i} \quad \text{où} \quad \varepsilon_{t,i} = \phi \varepsilon_{(t-1)i} + \eta_{t,i} \quad \text{et} \quad \eta_{t,i} \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$$

Où $VD_{t,i}$ correspond à la variable dépendante au temps t pour l'individu i , μ la moyenne estimée de la variable dépendante, $X_{t,i}$ à a matrice des variables explicatives et β à leurs coefficients estimés, $\varepsilon_{t,i}$ les résidus associés à l'estimation du paramètre au temps t pour un individu i qui se décomposent en $\phi\varepsilon_{(t-1)i}$ le paramètre d'autocorrélation entre deux dates successives et $\eta_{t,i}$ l'erreur résiduelle.

Pour chaque modèle, les variables explicatives choisies pour le modèle sont sélectionnées de la façon suivante :

- Réalisation d'une analyse bivariée variable par variable :
 - Sélection des variables unes à unes et conservation si la p-value < 0,2.
 - Vérification de la linéarité des variables continues.

Les variables explicatives continues JEL et THI ne peuvent pas être utilisées en tant que variables continues, une transformation par classe est donc nécessaire.



La variable jour en lait est scindée en deux catégories avant et après 50 jours car il semble y avoir un comportement différent concernant la durée de rumination et d'ingestion avant et après cette limite (Figure 12).

Figure 12 : Répartition de la durée de rumination et d'ingestion en fonction des jours en lait

Pour la scission de la variable THI, deux seuils sont possibles au vu de la gamme de THI présente dans cette étude : 68 ou 70. En effet, le choix des seuils est variable selon les modèles (Herbut et al., 2018; Ji, Banhazi, Ghahramani, et al., 2020; Kadzere et al., 2002).

- La colinéarité des variables explicatives sélectionnées est vérifiée.
- Des interactions sont testées notamment entre le THI et la localisation afin de déterminer l'impact différentiel du THI en fonction du lot dans lequel se situe l'animal.
- Réalisation d'une analyse multivariée avec sélection des variables explicatives pas à pas descendante et conservation de ces dernières avec une p-value < 0,05.

- Afin de valider le modèle final, les hypothèses de normalité et d'homoscédasticité des résidus sont vérifiées.
- Les modèles avec les AIC (Critère d'Information d'Akaike) et BIC (Critère d'Information Bayésien) les plus faibles sont conservés.
- Les moyennes marginales pour chaque modalité sont estimées à l'aide de la fonction *emmeans*.

2- Collecte et analyse des données d'ambiance du bâtiment : le THI

a- Collecte des données d'ambiance du bâtiment

Les données de température et d'humidité sont collectées par des capteurs Tinytag® Plus 2 TGP 4500 commercialisés par l'entreprise Gemini (Chichester, UK) (Figure 13).



Figure 13 : Capteur Tinytag® Plus 2 TGP 4500

Quatre capteurs sont placés dans le bâtiment à environ 2 mètres du sol le 10/06/2021. Cette hauteur permet d'obtenir le THI auquel les vaches sont soumises sans que celles-ci n'y aient accès. Chacune des cases dispose de 2 capteurs : un se situe à l'extrémité du bâtiment, l'autre au niveau des robots (Figure 14).

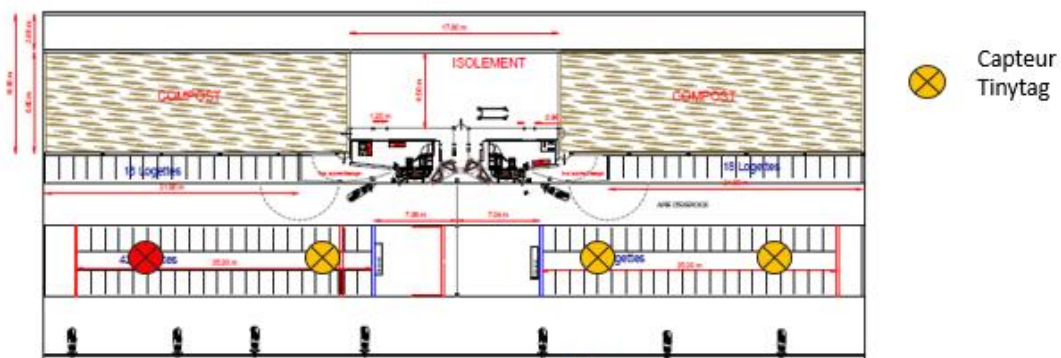


Figure 14 : Emplacement des capteurs Tinytag dans le bâtiment

Le capteur représenté en rouge sur la *Figure 14* a été perdu durant l'été, il n'y pas de données disponibles après le 01/07/2021.

Les capteurs relèvent la température et l'humidité relative toutes les 15 minutes. La récolte des données présente l'inconvénient d'être manuelle : il faut collecter les informations directement au boîtier. Cependant, ce matériel est fiable et utilisé dans de nombreux domaines d'activité et de très nombreuses publications (Ji et al., 2020).

b- Analyse des données d'ambiance du bâtiment

A partir de la température et l'humidité relative collectée, le THI est calculé à l'aide de la formule suivante (NRC, 1971) :

Équation 3 : Equation du THI selon NRC (1971)

$$THI = (1,8 \times T + 32) - [(0,55 - 0,0055 \times HR)(1,8 \times T - 26)]$$

où T représente la température ambiante en °C et HR l'humidité relative en %.

Toutes les données sont compilées dans un tableur. Le tri des données est réalisé de la façon suivante (*Figure 15*) :

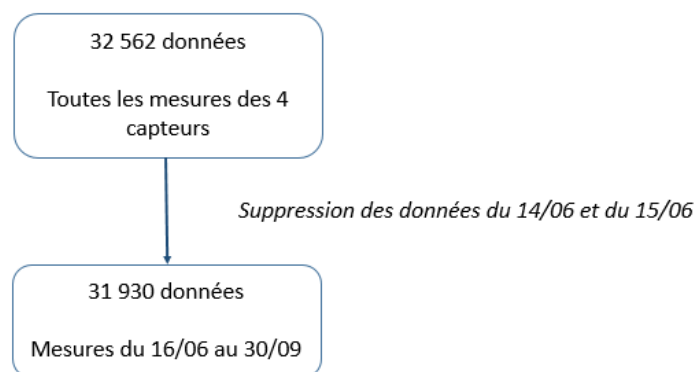


Figure 15 : Flowchart des données des capteurs de température et d'humidité

Les données des deux premiers jours sont retirées car elles sont incohérentes. Ceci peut être lié à la mise en service des capteurs.

L'objectif des analyses statistiques liées aux capteurs d'ambiance est de :

- Vérifier l'intérêt de deux jeux de données par salle lié à la présence de deux capteurs par salle,
- Etablir s'il existe des différences de température et d'humidité relative entre les différents endroits où sont placés les capteurs dans le bâtiment,

- Vérifier la concordance des données des deux capteurs pour chaque lot.

Pour cela, des comparaisons de moyennes sont faites entre les 2 capteurs d'une même case afin de vérifier leur concordance. Le même travail est effectué entre 2 capteurs de cases différentes.

Des tests de comparaisons de moyennes sont alors appliqués :

- un test des rangs signés Wilcoxon si les données ne suivent pas de distribution normale,
- un test de Student pour données appariées si les données suivent une distribution normale et ont des variances homogènes,
- un test de Welch pour données appariées si les données suivent une distribution normale et ont des variances non homogènes.

En complément, des tests de corrélation et de concordance de Lin's sont effectués.

3- Collecte et analyse des données de température ruminale

a- Collecte des données de température ruminale

Les données de température ruminale sont collectées grâce à un thermomètre intra-ruminal : le ThermoBolus® (MEDRIA, Chateaubourg, France).

Le ThermoBolus® est administré à l'aide d'un lance-bolus à l'animal. Il réside à vie dans le rumen ou le réseau de la vache et mesure sa température toutes les 5 minutes avec une précision de $\pm 0,1$ °C. La récolte des données se fait par voie radio bas débit de longue durée (technologie « LoRa ») entre le bolus et la FarmBox® toutes les 2 heures dans un rayon de 150 mètres. La Farmbox, située dans la stabulation entre les deux robots, est connectée au réseau internet de l'exploitation. Le bolus en lui-même possède une mémoire de 7 jours, les données de la FarmBox® sont cependant récupérables sur les 3 derniers mois *via* le site de Medria. La durée de vie du bolus est de 5 ans (Source : Medria).

Le bolus utilisé renvoie les données de température ruminale brutes mais calcule également la température corrigée des buvées. En effet, la prise de boisson est le principal élément faisant varier la température ruminale. La consommation d'eau froide ou tempérée fait diminuer la température ruminale de 5 à 9 °C, le rumen récupère sa température initiale en 3h30 en moyenne (Bewley, Grott, et al., 2008).

Ce sont donc les données de température ruminale corrigée des buvées qui sont prises en compte dans le reste de l'étude.

Au total, 40 vaches de l'exploitation ont été équipées de ThermoBolus®. Les modalités de la répartition des bolus sont présentées dans la *Figure 16*.

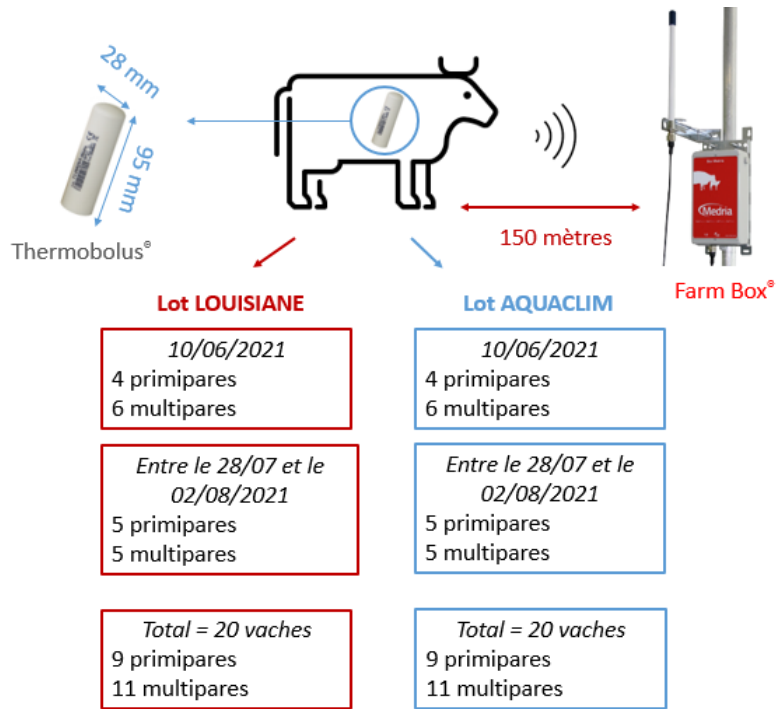


Figure 16 : Répartition des Thermobolus®

L'utilisation de tels dispositifs de mesure de température intra-ruminale ou de ThermoBolus® est décrit dans plusieurs études (AlZahal et al., 2011; Ammer et al., 2016; Bareille et al., 2014; Bewley, Einstein, et al., 2008; Ipema et al., 2008) et semble fiable.

b- Analyse des données de température ruminale

Les données récupérées via le site de Medria® sont sous la forme d'un tableur. La mise en forme du tableur est présentée dans la Figure 17.

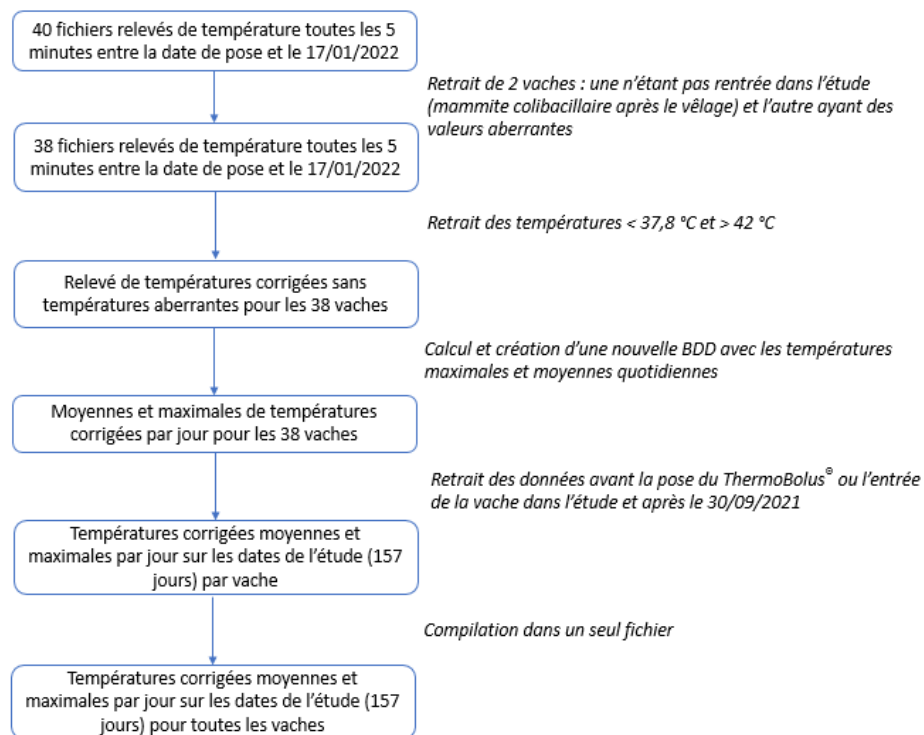


Figure 17 : Flowchart des données de température ruminale

En ce qui concerne les retraits de températures aberrantes, il semblerait que des températures ruminales corrigées inférieures 37,8 °C et supérieures à 42 °C soient peu probables d'un point de vue biologique (Tableau 12).

Tableau 12 : Températures ruminales obtenues avec utilisation de dispositif de mesure de la température intra-ruminale

Etude	Conditions expérimentales	Résultats observés
Liang 2013 Lexington (Kentucky, US)	93 vaches de races Prim'Holstein, croisées et Jersiaises équipées de bolus ruminiaux avec capteurs de température En stabulation libre avec 1h d'accès à l'extérieur 20 mois d'étude en continu (novembre 2009 à juillet 2011)	Température ruminale moyenne : 40,14°C [38,62 ; 41,89°C]
Ammer 2016a Basse saxe (Allemagne)	28 vaches Prim'Holstein logées en bâtiment équipées de bolus ruminiaux avec capteurs de température de 3 exploitations différentes 9 mois en continu (mars à décembre 2013)	Température ruminale moyenne : 39,1°C±0,4°C
Bewley 2008 West Lafayette (Indiana, US)	280 vaches Prim'Holstein équipées de bolus ruminiaux avec capteurs de température 2 jours chaque saison en 2006-2007	Températures ruminales moyennes : 39,28 °C Etendue : 38 à 41 °C Retrait des températures < 37,81 °C
Ammer 2016b Basse saxe (Allemagne)	12 vaches Prim'Holstein en ferme expérimentale équipées de bolus ruminiaux avec capteurs de température (sans correction des buvées) 4 jours en juin 2013 et 4 jours en octobre 2013	Températures ruminales moyennes en juin : 38,9 ± 1 °C [33,9 ; 41,2 °C] (sans correction des buvées)

Des tests de comparaisons de moyennes des températures ruminales corrigées entre les lots Louisiane et Aquaclim sont effectués sur toute la durée de l'étude, sur les périodes où le THI est le plus élevé et semaine par semaine afin de mieux décrire et comprendre la tendance qui ressort entre les deux lots.

Pour aller plus loin dans l'analyse et pouvoir expliquer la variabilité de la température ruminale avec d'autres facteurs (variables explicatives), un modèle linéaire mixte avec structure d'autocorrélation tel que présenté dans le paragraphe II.E.1 est mis en place.

4- Collecte et analyse des données de durée de rumination

a- Collecte des données de durée de rumination

Les données de durée de rumination sont collectées à l'aide d'un collier QWES HR® (Lely, Maassluis, Pays-Bas). Toutes les vaches de l'exploitation en sont équipées, soit les 169 individus faisant partis de l'étude.

Le boîtier du collier Lely Qwes-HR est doté d'un accéléromètre, d'un microphone spécialement conçu pour la rumination, d'un microprocesseur et d'une mémoire lui permettant d'enregistrer un index d'activité et d'analyser les sons afin de calculer une durée de rumination (Source : Lely) (Figure 18).

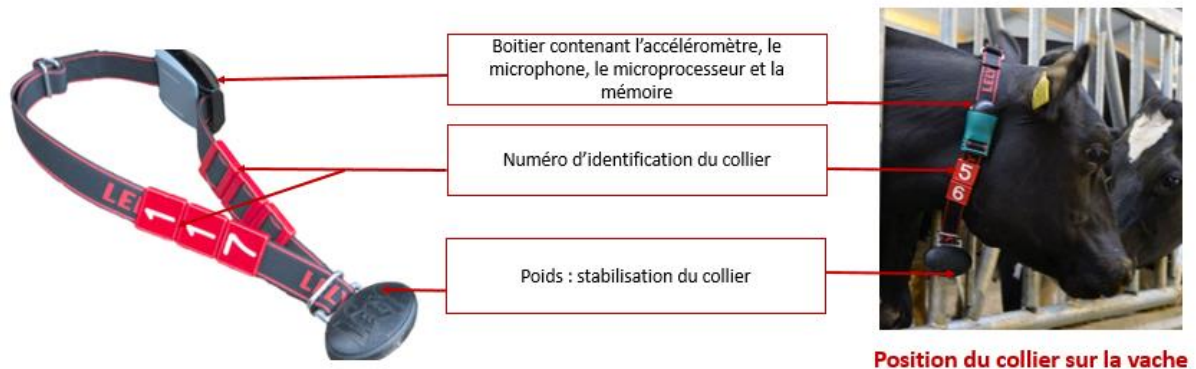


Figure 18 : Composition et position du collier LELY QWES HR (source : <https://used.lely.com/fr>)

Chaque collier est identifié à l'aide d'un numéro et est associé à une vache. L'activité et la rumination de chaque vache sont enregistrées dans le boîtier pendant une période de deux heures. Après ce bloc de deux heures, les informations associées sont envoyées tous les quarts d'heure jusqu'à la fin d'un nouveau bloc de deux heures.

Les données sont envoyées au programme de gestion Lely Horizon® sans que la vache ne passe par le robot de traite Lely Astronaut®. Les données individuelles sont transmises à des antennes situées à proximité des robots. Elles sont ensuite facilement récupérables *via* l'interface du logiciel d'exploitation T4C, sous la forme de durées quotidiennes de rumination en minutes.

Ces données sont exportées du logiciel T4C par l'éleveur à chaque fin de mois puis à la fin de l'étude dans un tableur Excel qui contient également les données de production laitière (Allflex, 2021; Chambre d'Agriculture de Bretagne, 2017).

Une erreur de transmission s'est produite du 08/09 au 12/09, les données concernant les durées de rumination ne sont pas disponibles sur ces dates.

Un tel dispositif a déjà été utilisé dans différentes études (Ambriz-Vilchis et al., 2015; Beauchemin, 2018; Lee et Seo, 2021). Ce moyen de mesurer la durée de rumination est fiable, il existe une très bonne corrélation entre le temps mesuré par l'appareil et une observation directe du comportement de rumination lorsque les vaches sont en bâtiment (Ambriz-Vilchis et al., 2015).

b- Analyse des données de durée de rumination

La mise en forme des données est effectuée de la façon suivante (Figure 19) :

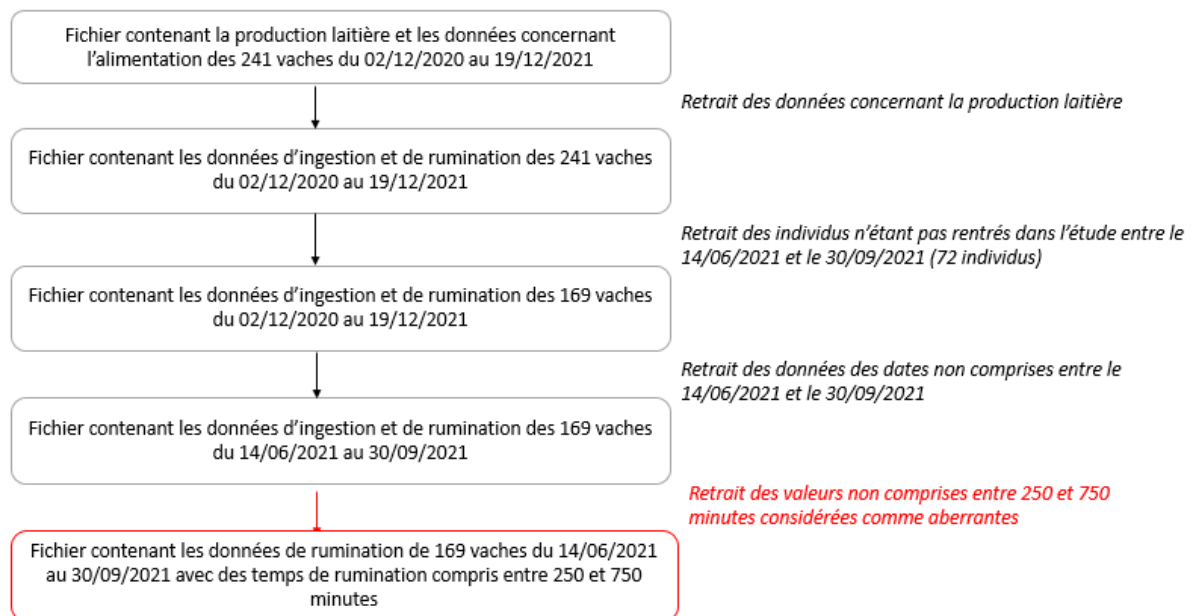


Figure 19 : Flowchart des données de durée quotidienne de rumination

Les données obtenues s'étendant de 0 à 808 minutes par jour, il est nécessaire de retirer les valeurs aberrantes. Peu de données sont disponibles dans la littérature concernant l'étendue des valeurs obtenues lors de récolte de données de durée de rumination (Ji, Banhazi, Perano, et al., 2020; Müschner-Siemens et al., 2020).

Tableau 13 : Comparaison des intervalles de durées quotidiennes de rumination obtenus dans différentes études

Etude	Conditions expérimentales	Résultats observés
Müschner-Siemens 2020 Groß Kreuz (Brandenburg, Allemagne)	183 vaches Prim'Holstein équipées de systèmes d'enregistrement de la durée de rumination entre de juin 2015 à mai 2017	En condition de neutralité thermique, durée de rumination moyenne : 276-624 minutes par jour Réduction du temps de rumination de 50 minutes quand le THI>52
Ji 2020 Gatton (Queensland, Australie)	126 vaches Prim'Holstein équipées de QWES HR® (Lely, Maassluis, Pays-Bas) de juin 2013 à novembre 2017	Intervalle de données : 255-535 minutes par jour Moyenne de durée de rumination : 401 minutes par jour

Les étendues étant très différentes (Tableau 13) et les variations de durée de rumination inter-élevages existantes (Beauchemin, 2018), il est décidé d'adapter les seuils en fonction des données obtenues dans l'élevage. Le minimum de durée quotidienne de rumination est choisi à 250 minutes (Ji, Banhazi, Ghahramani, et al., 2020). En revanche, étant donné que la moyenne se situe autour de 587 minutes et au vue de la distribution des données (Figure 20), il n'était pas possible de choisir un seuil haut entre 535 et 634 minutes, il est donc arbitrairement choisi à 750 minutes (Ji, Banhazi, Perano, et al., 2020; Müschner-Siemens et al., 2020).

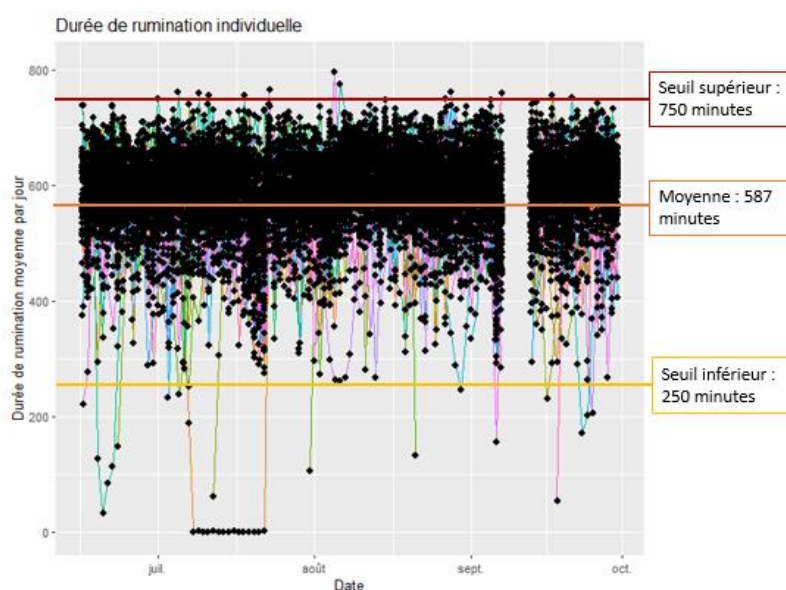


Figure 20 : Distribution des durées de rumination quotidiennes de tous les individus de l'étude du 14/06 au 30/09

Afin de réaliser une première description des données concernant la durée quotidienne de rumination, des tests de comparaisons de moyennes entre les lots Louisiane et Aquaclim sont effectués sur toute la durée de l'étude, sur les périodes où le THI est le plus élevé et semaine par semaine.

Enfin, un modèle linéaire multiple avec une structure d'autocorrélation est mis en place afin d'expliquer la durée de rumination de la même façon que celle présentée dans le paragraphe II.E.1.

5- Collecte et analyse des données concernant la durée d'ingestion

a- Collecte des données concernant la durée d'ingestion

Les données de durée d'ingestion sont collectées à l'aide des mêmes colliers QWES HR® (Lely, Maassluis, Pays-Bas) que ceux utilisés pour récolter les données de rumination. Toutes les vaches de l'exploitation en sont équipées, et dans notre cas, les 169 individus faisant partis de l'étude.

La récolte des données d'ingestion fonctionne également à l'aide d'un capteur angulaire et les modalités de transmission sont identiques à celles des données de durée de rumination (cf ci-dessus) (Source : Lely).

Une erreur de transmission s'est produite du 08/09 au 12/09, les données concernant les durées d'ingestion ne sont pas disponibles sur ces dates.

Ce dispositif est évalué par des méta-analyses, il existe une bonne corrélation entre le temps mesuré par l'appareil et une observation directe du comportement d'ingestion (Beauchemin, 2018; Lee et Seo, 2021).

b- Analyse des données concernant la durée d'ingestion

La mise en forme des données est effectuée de la façon suivante (Figure 21) :

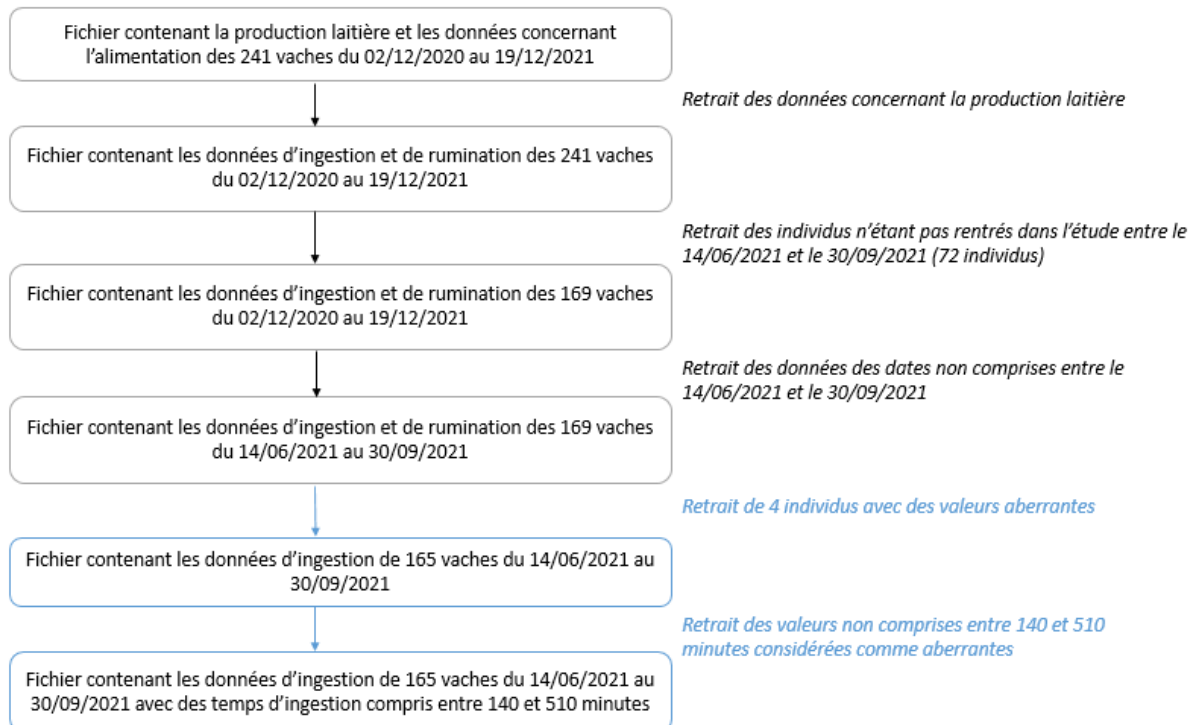


Figure 21 : Flowchart des données concernant la durée quotidienne d'ingestion

Les données obtenues s'étendent de 16 minutes à 532 minutes par jour. Les valeurs aberrantes sont retirées à l'aide des données de la littérature. Etant données les différences de durée d'ingestion en fonction du mode de vie des vaches, ne sont conservées que les publications dont les animaux vivent en bâtiment exclusivement avec une ration mélangée (*Tableau 14*).

Tableau 14 : Etendue et moyennes de durées quotidiennes d'ingestion sur deux études

Etude	Conditions expérimentales	Résultats observés
White 2017	Méta-analyse sur les rations alimentaires des vaches laitières	Durée ingestion comprise entre : 141 et 507 minutes par jour Moyenne : 284 minutes par jour
Gomez et Cook 2010	216 vaches Prim'Holstein sur 16 fermes différentes du Wisconsin à l'aide de caméra de surveillance	Durée d'ingestion comprise entre : 66 et 486 minutes par jour Moyenne : 258 minutes par jour

La distribution des données étant plus proches de celles obtenues par Gomez et Cook (2010), les seuils choisis sont donc 140 et 510 minutes par jour (*Figure 22*).

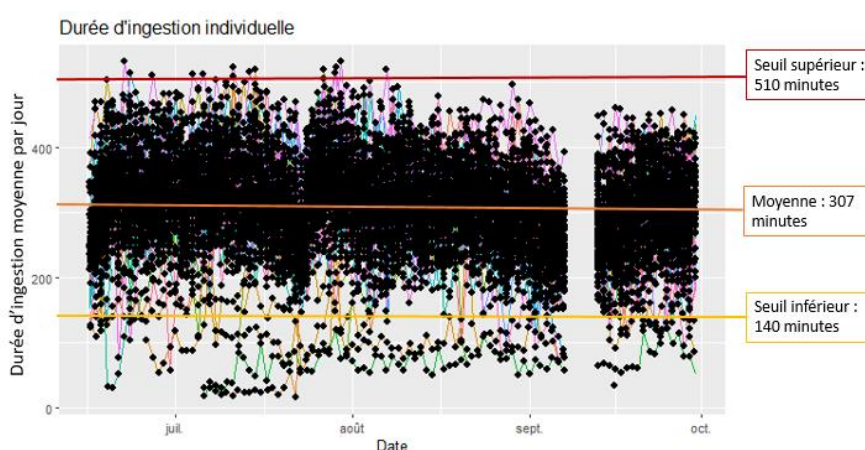


Figure 22 : Distribution des données de durée quotidienne d'ingestion

Des tests de comparaisons de moyennes concernant la durée d'ingestion quotidienne entre les lots Louisiane et Aquacim sont effectués sur toute la durée de l'étude, sur les périodes où le THI est le plus élevé et semaine par semaine.

Enfin, un modèle linéaire multiple avec effet aléatoire et autocorrélation est mis en place afin d'expliquer la durée d'ingestion de la même façon que celle dans le paragraphe II.E.1.

6- Collecte et analyse des données de comportement des vaches

a- Collecte des données de comportement

La collecte des données de comportement s'effectue par la mise en place de 5 caméras reliées au système de l'entreprise AIHerd® (Nantes, France) dans le bâtiment (*Figure 23*).

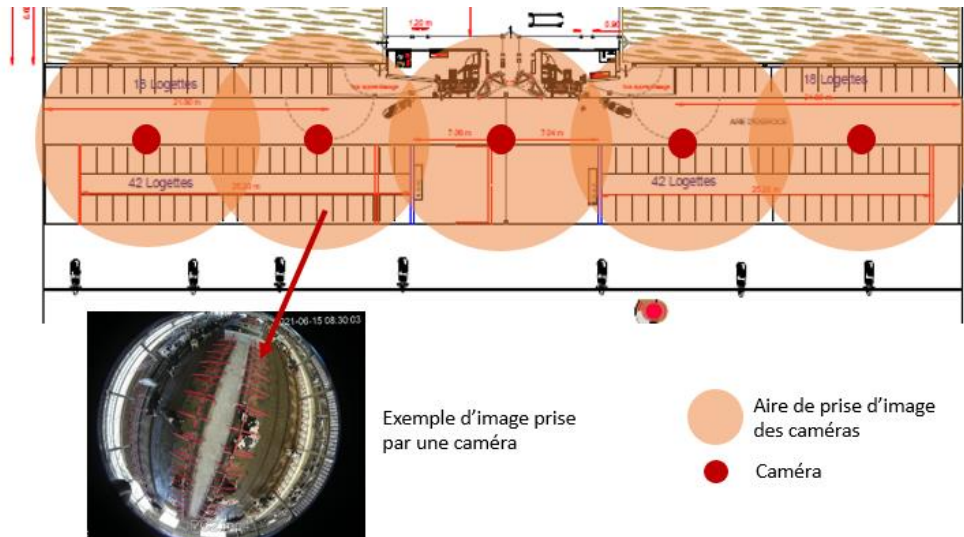
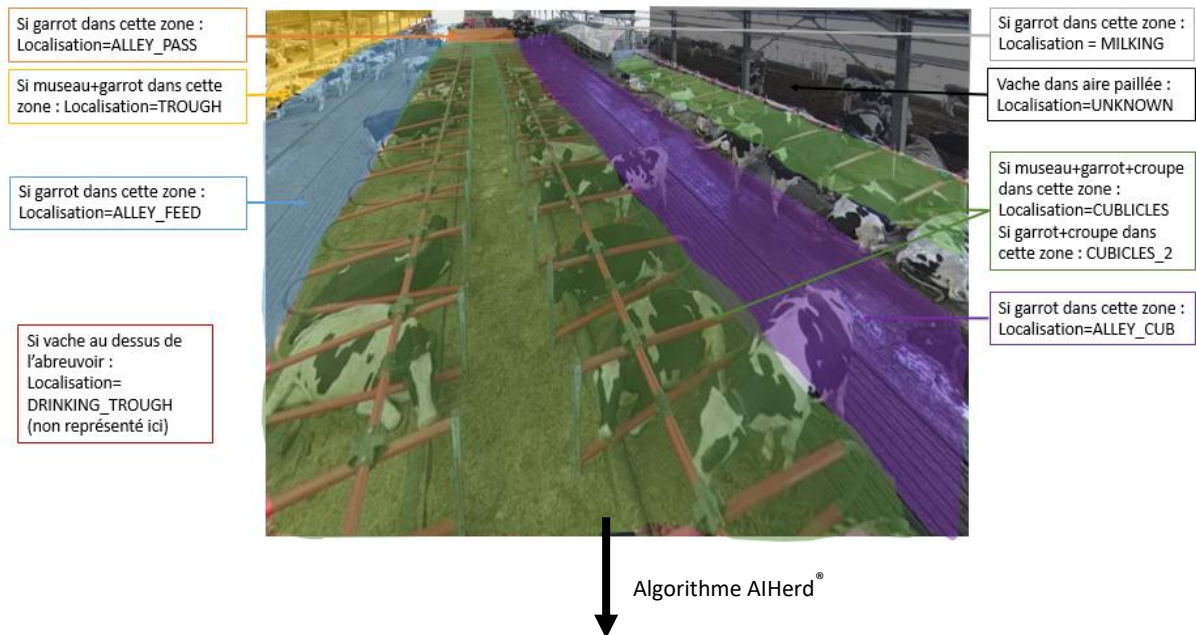


Figure 23 : Disposition des caméras dans le bâtiment

Les caméras récupèrent des images toutes les secondes qui sont transmises au serveur situé dans l'exploitation. Grâce à la mise en place d'algorithmes par l'entreprise AIHerd®, les images prises sont transformées en données chiffrées sur un tableur à l'échelle du troupeau. En effet, le bâtiment est découpé en deux lots, Louisiane et Aquaclim. Chaque vache détectée par la caméra est localisée dans un des lots. Ensuite, le bâtiment est subdivisé en plusieurs zones et chaque vache présente à l'image est localisée dans une zone. L'ensemble des zones est récapitulé dans la Figure 24.



	A	B	C	D	E
1	DATE,HOUR,BATCH,LOCALISATION,ACTIVITY,COUNT				
2	2021-08-01,00:01:04,louisiane,cubicles,lying,14				
3	2021-08-01,00:01:04,louisiane,cubicles_2,standing,5				
4	2021-08-01,00:01:04,louisiane,alley_pass,lying,1				
5	2021-08-01,00:01:04,louisiane,cubicles,standing,1				
6	2021-08-01,00:01:04,louisiane,alley_cub,standing,1				
7	2021-08-01,00:01:04,louisiane,trough,standing,3				
8	2021-08-01,00:01:04,louisiane,alley_feed,standing,1				
9	2021-08-01,00:01:04,aquaclim,alley_feed,standing,2				
10	2021-08-01,00:01:04,louisiane,drinking_trough,standing,1				
11	2021-08-01,00:01:04,aquaclim,cubicles,lying,21				
12	2021-08-01,00:01:04,aquaclim,trough,standing,3				
13	2021-08-01,00:01:04,aquaclim,alley_pass,lying,1				
14	2021-08-01,00:01:04,aquaclim,alley_pass,standing,1				

Figure 24 : Définition des zones dans le bâtiment et tableur issu de l'algorithme

De plus, l’algorithme détecte la position de la vache qui peut être debout, couchée ou en train de marcher – respectivement standing, lying ou walking-. Enfin, il compte le nombre de vaches dans chaque lot, chaque zone et chaque position toutes les secondes.

b- Sélection des données concernant le comportement des vaches

Les données issues de l’algorithme sont mises en forme de la façon suivante (Figure 25) :

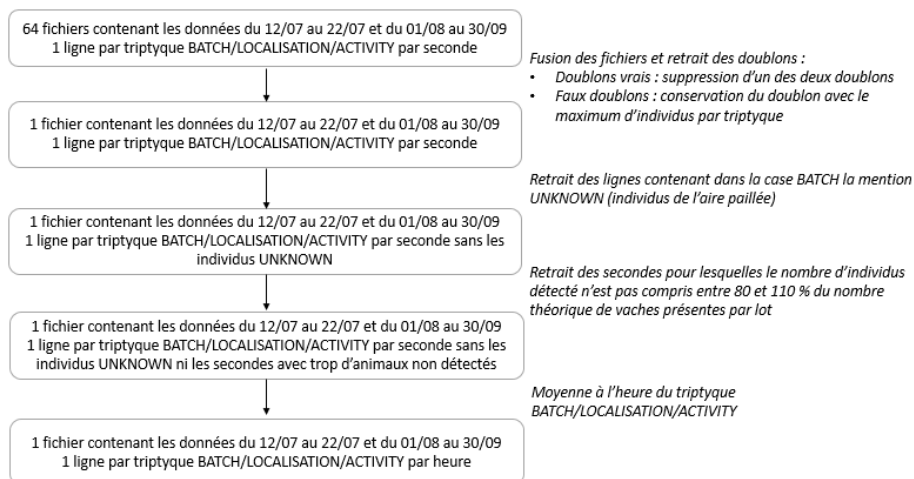


Figure 25 : Flowchat concernant les données de comportement

Chaque fichier de données de comportement contient les données de deux jours consécutifs. Lorsque sont réunis tous les fichiers, il existe des doublons sur certaines heures : le premier fichier ne s’arrétant pas à minuit, heure à la laquelle débute le deuxième. Il est décidé de conserver la donnée avec le maximum d’individus lorsque les doublons ne sont pas identiques.

Lorsque la variable BATCH contient l’information « UNKNOWN », cette ligne est retirée : le système compte les vaches présentes dans l’aire paillée et ne faisant pas parties de l’étude.

De plus, en traçant le graphique du nombre de vaches détectées chaque seconde, il est observé qu’à certaines heures de la nuit –généralement entre 23h et 1h et 3h et 5h du matin- un faible nombre de vaches sont repérées par l’algorithme (Figure 26). Il est probable que cela soit dû à un manque de luminosité dans le bâtiment durant ces périodes.

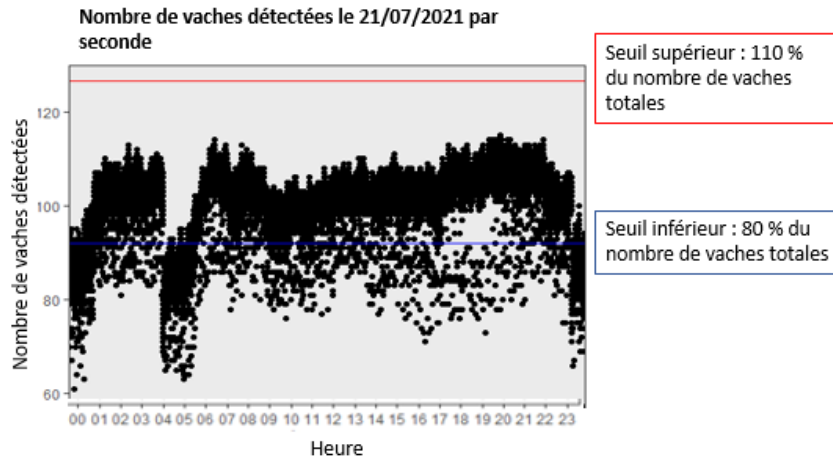


Figure 26 : Nombre de vaches détectées le 21/07/2021 chaque seconde

Afin de pallier au manque de détection des vaches par la caméra, un seuil inférieur – égal à 80 % du nombre total de vaches- est mis en place. Un seuil supérieur est également mis en place (110 %) mais n'est jamais dépassé : le retrait des doublons et des « UNKNOWN » évite cette problématique. Le nombre total de vaches est estimé en dénombrant les vaches traitées par le robot du lot Louisiane et celui du lot Aquaclim.

Enfin, la taille des fichiers étant très importante et rendant difficile la manipulation du jeu de données, les données de chaque triptyque lot/localisation/position sont moyennées à l'heure. En effet, il existe une bonne corrélation entre le nombre d'individus effectuant une activité à la seconde et de celui à l'heure (Mattachini et al., 2011). Cette tendance est également présente dans le jeu de données de l'étude en ce qui concerne le nombre d'individus couchés et ceux à l'auge *a minima*, les moyennes des triptyques à l'heure sont donc conservées (Figure 27).

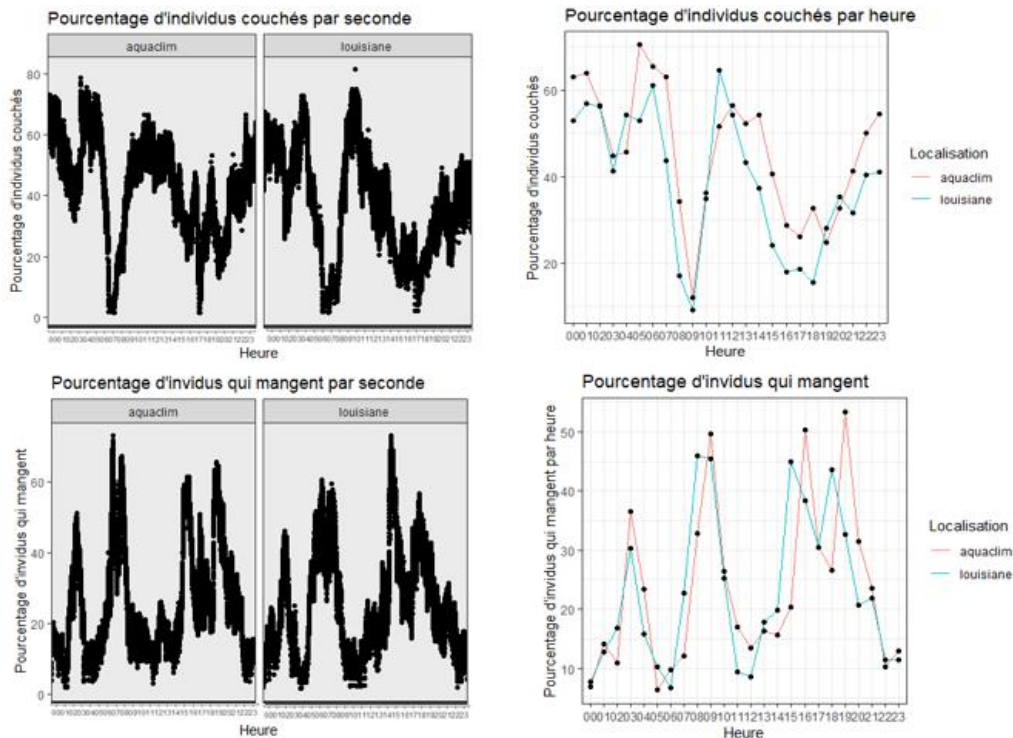


Figure 27 : Corrélation entre le pourcentage d'individus couchés et à l'auge à la seconde et à l'heure

c- Analyse des données concernant le comportement

Afin de les analyser, les données sont compilées sous forme de temps alloué par activité et d'indices basés sur les données de la littérature.

1- Définition des activités et du temps alloué à chaque activité

Sept activités différentes sont définies et les pourcentages d'animaux par activité sont calculés à l'heure en moyennant les données à la seconde sur une même heure (Tableau 15).

Tableau 15 : Méthode de calcul du pourcentage de budget-temps par activité

Activité	Formule de calcul
Debout dans les allées	$\frac{\text{Nombre vaches Position = Standing et Localisation} = ALLEY_{PASS} + ALLEY_{CUB} + ALLEY_{FEED}}{\text{Nombre vaches total par lot}}$
Marche dans les allées	$\frac{\text{Nombre vaches Position = Walking et Localisation} = ALLEY_{PASS} + ALLEY_{CUB} + ALLEY_{FEED}}{\text{Nombre vaches total par lot}}$
Debout dans les logettes	$\frac{\text{Nombre vaches Position = Standing et Localisation} = CUBICLES + CUBICLES_2}{\text{Nombre vaches total par lot}}$
Couché dans les logettes	$\frac{\text{Nombre vaches Position = Lying et Localisation} = CUBICLES + CUBICLES_2}{\text{Nombre vaches total par lot}}$
Manger	$\frac{\text{Nombre vaches Position = Standing et Localisation} = TROUGH}{\text{Nombre vaches total par lot}}$
Boire	$\frac{\text{Nombre vaches Position = Standing et Localisation} = DRINKING_THROUGH}{\text{Nombre vaches total par lot}}$
Se faire traire	$\frac{\text{Nombre vaches Position = Standing et Localisation} = MILKING}{\text{Nombre vaches total par lot}}$

Remarques :

- L'activité « marche dans les allées » n'est détectée par les caméras que quelques jours au mois de juillet – du 12/07 au 18/07. Cette activité ne sera pas représentée par la suite car intégrée dans la catégorie « debout dans l'allée ».
- Dans le calcul du pourcentage de vaches debout et couchées dans les logettes sont prises en comptes les vaches perchées dans les logettes c'est-à-dire avec les membres antérieurs sur la logette et les membres postérieurs dans l'allée (Figure 28).



Figure 28 : Exemple de vache "perchée" sur une logette

Ensuite, chaque pourcentage du budget-temps par activité est convertie en une durée moyenne par lot et par activité à l'aide de la formule de l'Équation 4:

Équation 4 : Conversion des pourcentages alloués à chaque activité par lot et par jour en durée allouée à l'activité par jour

$$\text{Temps alloué à une activité} = \text{Pourcentage du temps alloué à chaque activité} \times 1440$$

où le temps est exprimé en minutes et 1440 correspond au nombre de minutes dans une journée.

De plus, de la même manière que pour les paramètres précédents, des tests de comparaisons de moyennes concernant les durées allouées à chaque activité par jour entre les lots Louisiane et Aquaclim sont effectués sur toute la durée de l'étude ainsi que sur les périodes où le THI est le plus élevé afin de décrire les données calculées.

Enfin, un modèle linéaire multiple est mis en place afin d'expliquer les différents budgets temps de chaque activité –grâce à la fonction *lm*. La sélection des variables et l'analyse du modèle se fait de façon identique au paragraphe II.E.1.

Cependant, étant donné que les budget-temps concernent le troupeau et plus un individu, seules les variables explicatives THI, localisation et ventilateurs pourront être testées.

2- Définition et analyse des indices

Différents indices de confort et d'utilisation des logettes sont présents dans la littérature et explicité dans le *Tableau 16*.

Tableau 16 : Indices de confort et d'utilisation des logettes et du bâtiment selon la littérature

Publication	Indices utilisés	Définition
Cook 2005	CCI : Cow Comfort Index	Proportion de vaches touchant une logette qui y sont couchées
	SUI : Stall Use Index	Proportion de vaches qui ne mangent pas mais qui sont couchées dans les logettes
	SSI : Stall Standing Index SSI=1-CCI	Proportion de vaches touchant une logette qui sont debout les quatre pieds dans la logette ou perchées (avec 2 pieds dans la logette et 2 dans l'allée)
	SPI : Stall Perching Index	Proportion des vaches touchant la logette qui sont perchées
Mattachini 2011	CLI : Cow Lying Index	Nombre de vaches couchées dans les logettes sur le nombre de vaches totales
	CSI : Cow Standing Index	Nombre de vaches debout (qui ne mangent pas et ne sont pas couchées) sur le nombre de vaches totales
	SUI : Stall Use Index	Nombre de vaches couchées dans les logettes sur le nombre de vaches qui ne mangent pas
Overton 2002	SUI : Stall Use Index	Nombre de vaches couchées dans les logettes sur le nombre de vaches qui ne mangent pas
	CCI : Cow Comfort Index	Nombre de vaches couchées dans les logettes sur le nombre de vache dans les logettes (couchées ou debout)

Finalement, les indices retenus sont le CLI, CSI, SUI, CCI et SPI (Cook et al., 2005; Mattachini et al., 2011; Overton et al., 2002). Ils sont calculés de la façon suivante (Tableau 17) :

Tableau 17 : Méthode de calcul des indices sélectionnés

Indice	Formule de calcul
CCI	$\frac{\text{Nombre vaches Position = Lying et Localisation} = \text{CUBICLES}}{\text{Nombre vaches Localisation} = \text{CUBICLES} + \text{CUBICLES}_2}$
CLI	$\frac{\text{Nombre vaches Position = Lying et Localisation} = \text{CUBICLES}}{\text{Nombre vaches total par lot}}$
CSI	$\frac{\text{Nombre vaches Position = Standing mais Localisation} \neq \text{TROUGH}}{\text{Nombre vaches total par lot}}$
SPI	$\frac{\text{Nombre vaches Localisation} = \text{CUBICLES}_2}{\text{Nombre vaches Localisation} = \text{CUBICLES} + \text{CUBICLES}_2}$
SUI	$\frac{\text{Nombre vaches Position = Lying et Localisation} = \text{CUBICLES}}{\text{Nombre vaches Position} \neq \text{Standing et Localisation} \neq \text{TROUGH}}$

De plus, de la même manière que pour les paramètres précédents, des tests de comparaisons de moyennes entre les lots Louisiane et Aquacim concernant les indices calculés sont effectués sur toute la durée de l'étude ainsi que sur les périodes où le THI est le plus élevé.

Enfin, un modèle de régression Bêta est mis en place afin d'expliquer les différents indices à l'aide des variables explicatives—grâce à la fonction *betareg*. En effet, ce modèle permet de modéliser des taux ou des pourcentages, ou tout du moins des variables comprises entre 0 et 1.

De la même manière que pour les budgets-temps, les indices sont calculés pour le troupeau, seules les variables THI, localisation et ventilateur sont intégrées au modèle.

Le modèle de régression Bêta s'écrit de la façon suivante *Équation 5* :

Équation 5 : Modèle de régression Bêta explicatif des indices calculés pour les données de comportement

$$g(I_t) = \mu + \beta X_t + \varepsilon_t \quad \text{où}$$
$$g : [0 ; 1] \rightarrow \mathbb{R}$$
$$x \mapsto \log\left(\frac{x}{1-x}\right)$$

où I_t correspond à l'indice d'intérêt dans le modèle à un instant t , μ à la moyenne estimée de l'indice, β aux coefficients associés aux variables explicatives contenues dans la matrice X_t , et ε_t aux résidus à un instant t .

Les moyennes marginales de chaque variable du modèle sont également calculées grâce à la fonction *emmeans*.

F- Validation du projet par un comité éthique

Le projet BOVICLIM a reçu l'agrément du comité d'éthique vétérinaire d'Oniris (CERVO) le 08/04/2021 (dossier CERVO-2021-14).

Comme pour toute expérimentation utilisant des animaux, la règle des 3R -à savoir remplacer, réduire, raffiner- s'applique au projet BOVICLIM.

Pour l'onglet "remplacer", aucun essai *in vitro* ne peut remplacer cette étude sur un troupeau d'animaux dans ses conditions de vie usuelles.

En ce qui concerne la partie "réduire", il est nécessaire de trouver des solutions afin d'améliorer le stress thermique des vaches. Le projet propose d'étudier une solution innovante -le matelas de logette à eau réfrigérée- en condition de terrain en France contrairement aux études déjà menées en conditions contrôlées ou sous des climats plus chauds (*Tableau 9*).

Enfin, les classes de gravité des procédures de l'expérimentation sont légères. La procédure la plus invasive est la pose des Thermobolus®, dont le nombre de vaches équipées est réduit au minimum, 20 vaches dans chaque lot. La mesure des paramètres de comportement à l'aide de caméras limite l'usage d'appareils invasifs. La collecte des données par le robot de traite et les colliers ne sont pas invasifs non plus. Il n'y a aucun risque de perte d'animaux lié à l'utilisation de matelas de logettes à eau réfrigérée par rapport à l'utilisation de matelas de logettes classiques.

III- Résultats

A- Description des échantillons de l'étude

Les caractéristiques des vaches présentes au début de l'étude (*Figure 29*) et durant l'ensemble de l'étude (*Figure 30*) sont les suivantes :

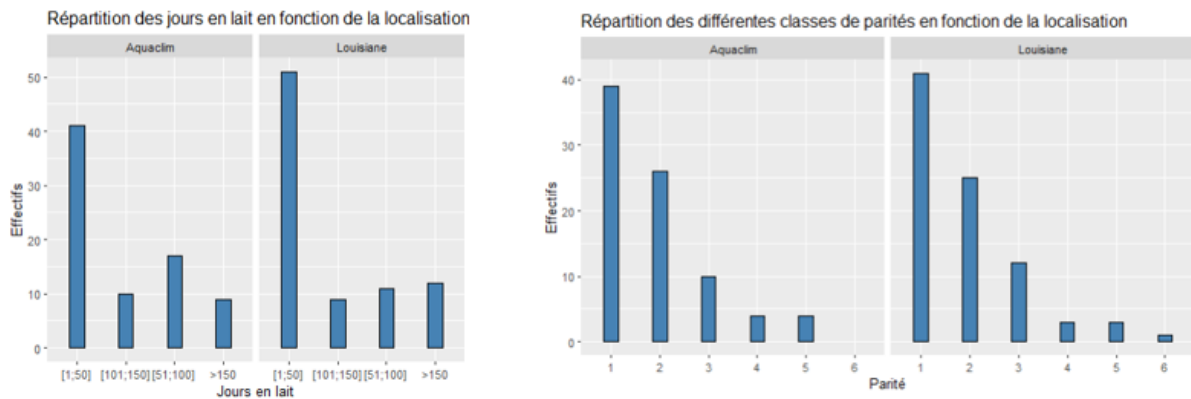


Figure 29 : Caractéristiques des vaches au début de l'étude concernant les jours en lait et la parité

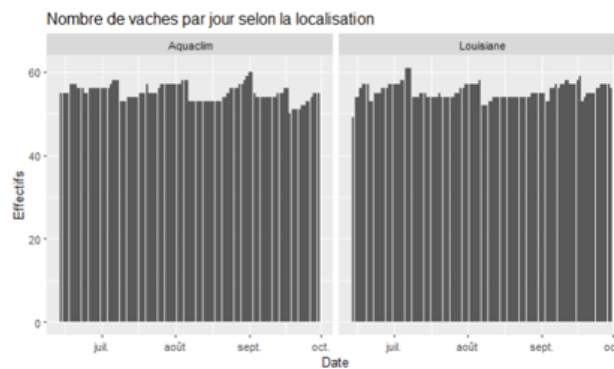


Figure 30 : Répartition des effectifs dans les deux lots durant l'étude

Il n'y a de différences significatives concernant les classes de jour en lait au début de l'étude (test de Chi-2 de conformité, p-value = 0,45). Les différentes parités sont équitablement représentées dans les deux lots (test de Chi-2 de conformité, p-value = 0,91). Enfin, le nombre de vaches est globalement semblable dans les deux lots le long de l'étude et oscille entre 50 et 60 individus par lot, bien que des différences existent sur certains jours (test de Chi-2 de conformité, p-value = 0,01). Les deux lots sont donc homogènes.

B- Description des conditions de THI durant la période de l'étude

Une concordance et une corrélation des THI de l'ensemble des quatre capteurs pris deux à deux sont mises en évidence. Les capteurs de THI pris en compte pour le reste de l'étude sont une moyenne quotidienne entre les deux capteurs présents en Aquaclim et une moyenne quotidienne pondérée du capteur présent au niveau du robot avec celui perdu près de l'ouverture en Louisiane. Les minimum et maximum quotidiens des THI sont également relevés. Les données sont présentées dans le *Tableau 18*.

Tableau 18 : Résumé des données concernant le THI sur l'ensemble de l'étude

Variable	Nombre de données	Moyenne	Ecart type	Minimum	Q1	Médiane	Q3	Maximum
THI minimum quotidien	214	61,1	3,3	49,9	59,3	60,8	62,4	69,9
THI moyen quotidien	214	66,2	3,2	58,3	64,1	65,6	67,6	75,9
THI maximum quotidien	214	71,9	3,9	63,8	69,1	71,4	74	82,4

Deux périodes où le THI est particulièrement élevé dans cette étude sont identifiées, il s'agit du 16 au 25 juillet et du 05 au 08 septembre. Elles seront appelées « périodes chaudes » par la suite.

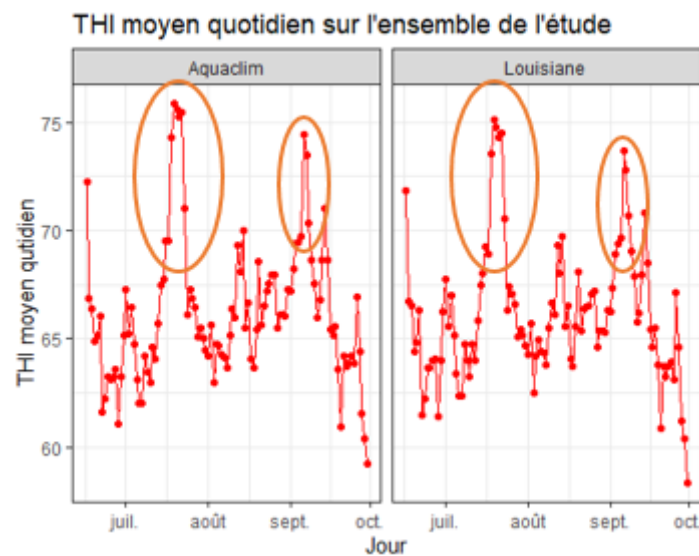


Figure 31 : THI moyen quotidien dans les deux lots et identification des périodes avec un THI supérieur à 70 sur l'ensemble de l'étude

Les périodes telles qu'identifiées précédemment seront considérées comme les conditions de stress thermique pour la suite des résultats.

C- Données concernant la température ruminale

1- Statistiques descriptives

Les données concernant la température ruminale moyenne quotidienne sont résumées dans le *Tableau 19*.

Tableau 19 : Résumé des données concernant la température ruminale moyenne quotidienne

Nombre de données	Moyenne (°C)	Ecart type (°C)	Minimum (°C)	Q1 (°C)	Médiane (°C)	Q3 (°C)	Maximum (°C)
3213	39,77	0,31	38,97	39,56	39,71	39,92	41,5

Afin de mieux comprendre la dynamique de la température ruminale au sein des deux lots, un violinplot est réalisé *Figure 32*. Plus d'individus ont globalement une température ruminale corrigée moyenne quotidienne plus basse dans le lot Aquaclim qu'en Louisiane. Cependant, les valeurs maximales atteintes sont plus étendues et plus élevées dans le lot Aquaclim.

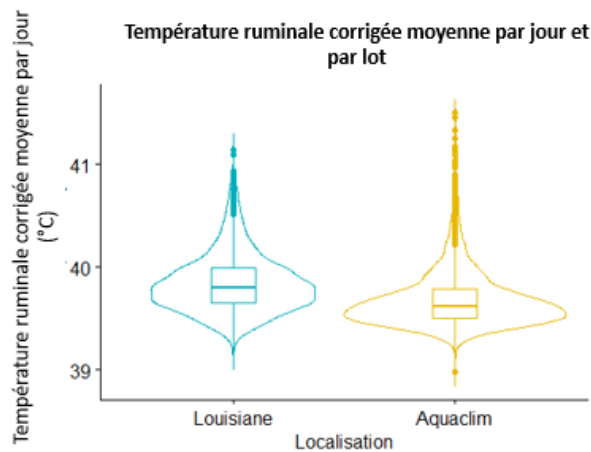


Figure 32 : Violinplot représentant la température ruminale moyenne corrigée quotidienne dans les deux lots tout au long de l'étude

Pour appréhender la dynamique de température ruminale dans le temps, le graphique ci-dessous (*Figure 33*) la représente associée au THI. Les deux périodes chaudes définies dans le paragraphe précédent sont associées dans les deux lots à une augmentation de la température ruminale, qui apparaît plus intense lors de la première période dans le lot Aquaclim. Le reste du temps, la température ruminale corrigée moyenne quotidienne reste stable.

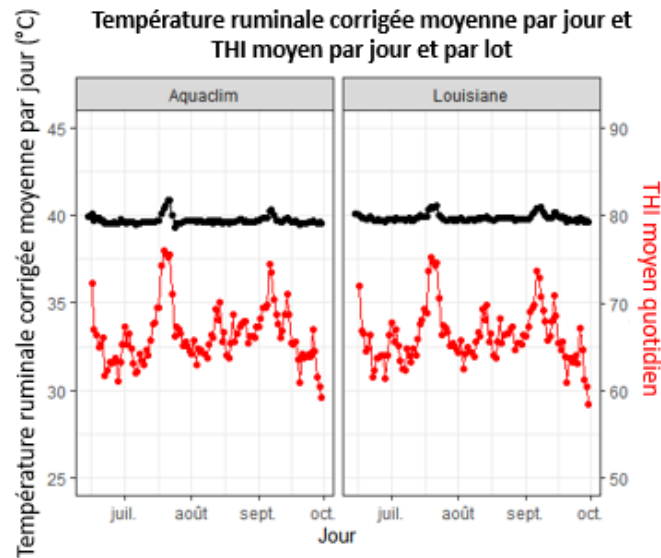


Figure 33 : Température ruminale corrigée moyenne quotidienne et THI moyen quotidien par lot sur l'ensemble de l'étude

Lorsque l'on zoome sur les périodes chaudes (Figure 34), la température ruminale semble augmenter sans décalage dans le temps lorsque le THI dépasse 70. A cette échelle, il ne semble pas y avoir de différences significatives de température ruminale entre les deux lots. De plus, la période chaude de juillet semble représenter un stress thermique plus intense pour les animaux au vu de la réponse obtenue.

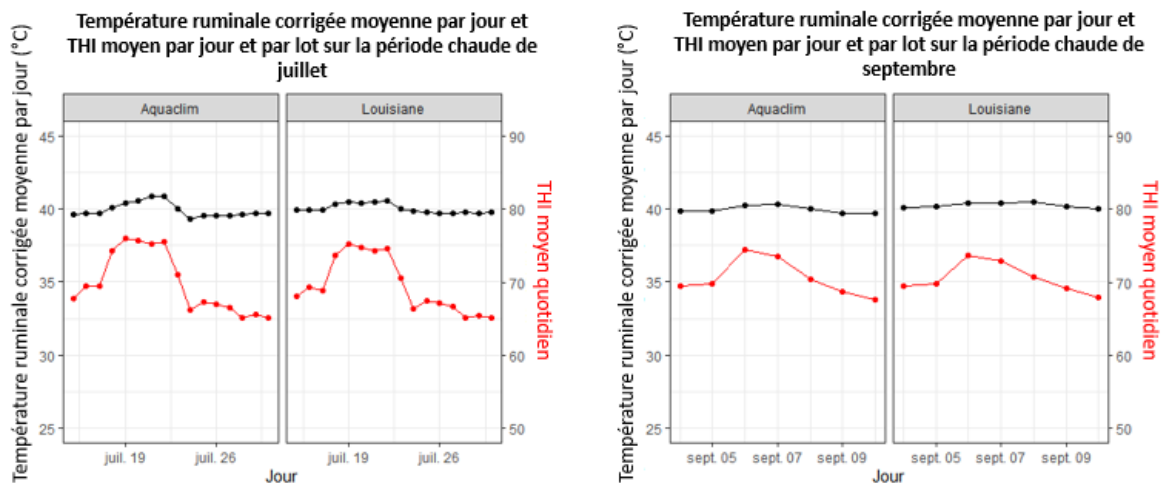


Figure 34 : Température ruminale corrigée moyenne quotidienne et THI moyen quotidien dans les deux lots et sur les deux périodes chaudes

Pour mieux comprendre la dynamique de la température corrigée en période chaude, on s'intéresse à la dispersion des individus entre les deux lots en comparaison avec une période en absence de stress thermique identifié (Figure 35). Il semble ressortir que :

- En période de stress thermique, les températures ruminales individuelles sont plus dispersées que durant des périodes plus fraîches et ce surtout dans le lot Aquaclim.

- Les températures ruminales individuelles des animaux du lot Aquaclim semblent être plus élevées que dans le lot Louisiane lors de la période chaude de juillet. Cette tendance s'inverse lors de la période chaude de septembre, qui correspond à un stress thermique moins intense.
- Les températures ruminales individuelles hors période de stress thermique paraissent plus proches et semblent moins fluctuer dans le lot Aquaclim que dans le lot Louisiane.

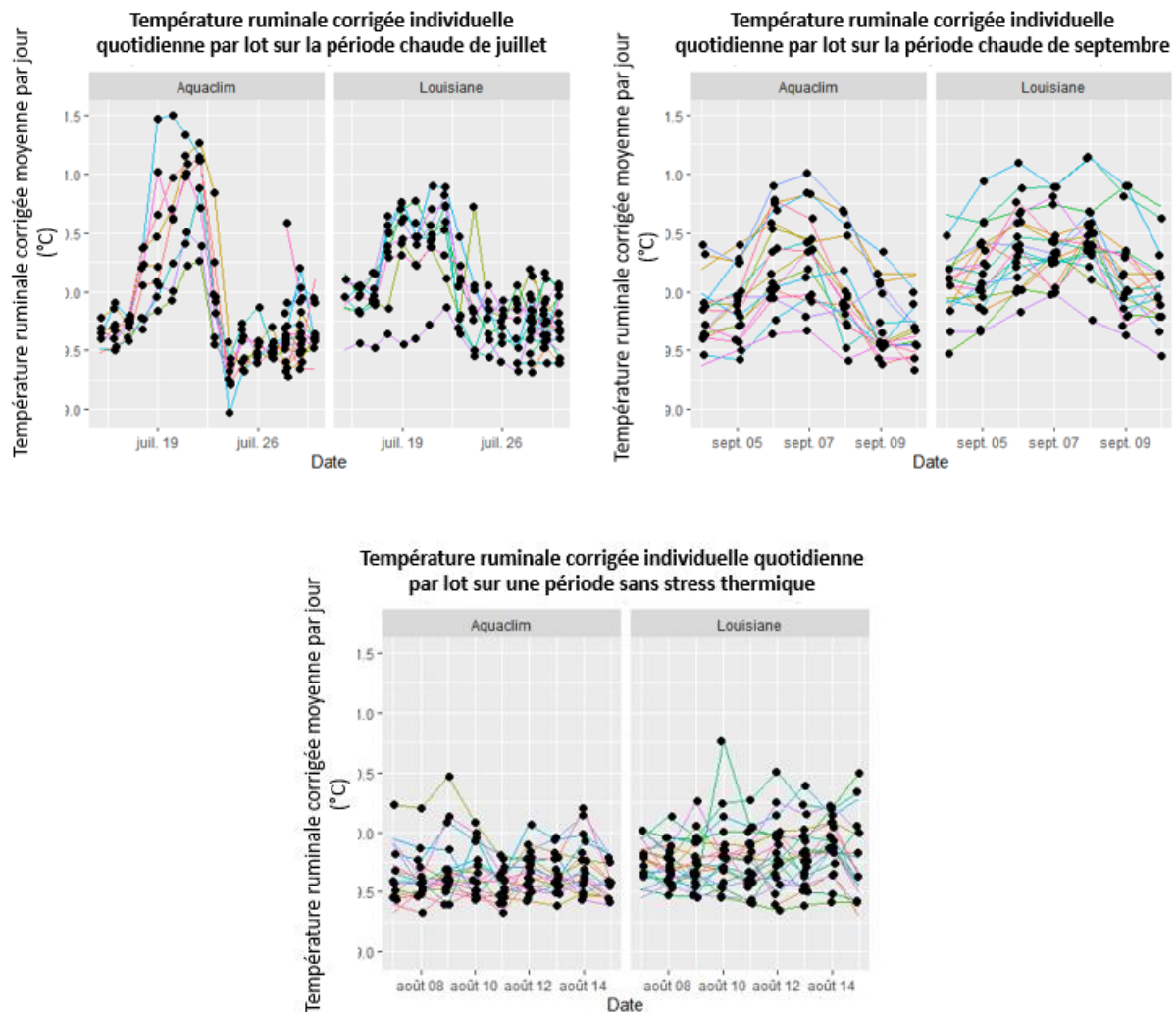


Figure 35 : Comparaison des températures ruminales corrigées individuelles dans les deux lots et sur différentes périodes

Enfin, un exemple de dynamique de température ruminale corrigée quotidienne est présenté dans la Figure 36. La température ruminale individuelle semble ne pas trop fluctuer au sein d'une journée lorsque le THI est inférieur à 70. Lorsque que le THI est supérieur à 70, la température ruminale croit du matin dès 6 h jusqu'à 14 h environ où elle atteint un plateau avant de diminuer durant la nuit entre 1 h et 6 h.

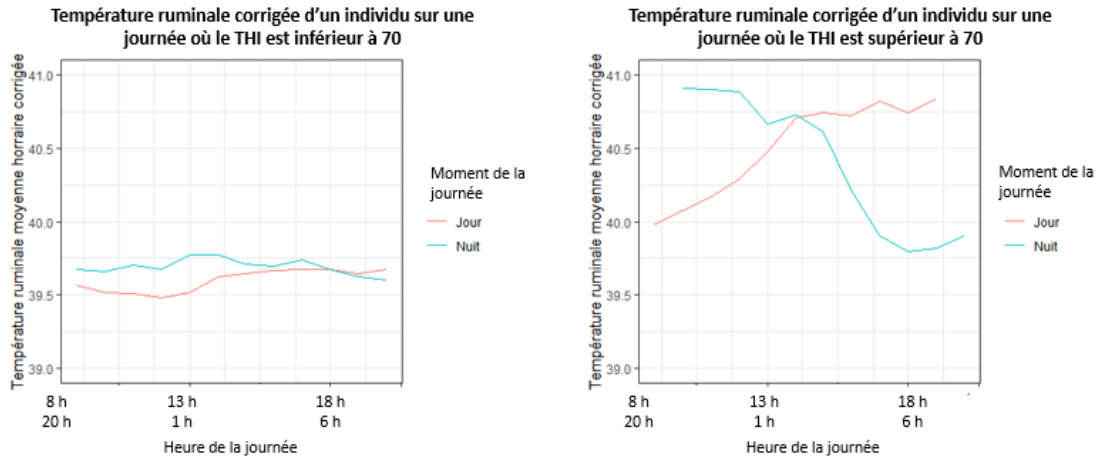


Figure 36 : Variations quotidiennes de température ruminale corrigée sur une journée où le THI < 70 et sur une journée où le THI > 70

2- Comparaisons de moyennes

Il semblait, selon la partie précédente, se dégager certaines tendances concernant la température ruminale corrigée moyenne quotidienne entre les lots et en fonction des périodes étudiées. Le *Tableau 20* présente les résultats des tests de comparaison de moyennes effectués sur l'ensemble de la période de l'étude, semaine par semaine et sur les deux périodes chaudes.

Les résultats qui suivent correspondent à une analyse bivariée et ne sont pas ajustés sur d'autres facteurs qui peuvent influencer la température ruminale. Ce sera le cas pour les autres analyses bivariées du document.

Tableau 20 : Comparaison des moyennes des températures ruminales corrigées des deux lots

Dates	Température ruminale moyenne Louisiane (°C)	Température ruminale moyenne Aquacлим (°C)	P-value
<i>Ensemble de l'étude</i>	39,84597	39,69415	< 2.2 e-16
<i>17/06/2021 au 24/06/2021</i>	39,80034	39,68672	0,007
<i>24/06/2021 au 01/07/2021</i>	39,70803	39,59547	0,0007
<i>01/07/2021 au 08/07/2021</i>	39,76147	39,56231	1,3 e-10
<i>08/07/2021 au 15/07/2021</i>	39,81974	39,59534	5 e-12
<i>15/07/2021 au 22/07/2021</i>	40,1912	40,11166	0,35
<i>22/07/2021 au 29/07/2021</i>	39,87115	39,75312	0,14
<i>29/07/2021 au 05/08/2021</i>	39,73568	39,67626	0,032
<i>05/08/2021 au 12/08/2021</i>	39,75217	39,6318	7,4 e-06
<i>12/08/2021 au 19/08/2021</i>	39,7916	39,6266	1,4 e-08
<i>19/09/2021 au 26/08/2021</i>	39,84689	39,66611	1,5 e-10
<i>26/08/2021 au 02/09/2021</i>	39,77216	39,65598	9,1 e-06
<i>02/09/2021 au 09/09/2021</i>	40,16483	39,98335	0,0001
<i>09/09/2021 au 16/09/2021</i>	40,00987	39,7168	3 e-14
<i>16/09/2021 au 23/09/2021</i>	39,79746	39,58127	2,2 e-12
<i>23/09/2021 au 30/09/2021</i>	39,72018	39,60467	7,7 e-06
<i>Période chaude de juillet</i>	39,85979	39,70789	<2,2 e-16
<i>Période chaude de septembre</i>	39,85619	39,69834	<2,2 e-16

Sur la totalité de l'étude (du 17/06/2021 au 30/09/2021), il y aurait une différence significative de la moyenne des températures ruminales corrigées entre les lots Louisiane et Aquaclim. Le lot Aquaclim aurait une température ruminale 0,2 °C inférieure à celui Aquaclim.

Lorsque l'on s'intéresse aux moyennes des températures ruminales semaine par semaine et dans chaque lot :

- Les semaines du 15/07/2021 et du 29/07/2021, il n'y a pas de différences significatives entre les lots Aquaclim et Louisiane.
- Les autres semaines, il existe une différence significative entre les deux lots allant de 0,3 °C à quelques centièmes de degrés, y compris sur la période d'arrêt de fonctionnement des matelas Aquaclim.

Enfin, si l'on compare les moyennes des températures ruminales quotidiennes chaque jour des périodes chaudes :

- Du 16/07/2021 au 26/07/2021 : il existe une différence significative entre les deux lots chaque jour. Le lot Aquaclim aurait une température ruminale d'environ 39,7 °C et le lot Louisiane 39,85°C du 16/07 au 21/07 puis elle diminue de quelques centièmes de degrés par jour du 21/07 au 26/06.
- Du 05/09/2021 au 08/09/2021 : il y a une différence significative entre les deux lots chaque jour. Le lot Aquaclim aurait une température ruminale d'environ 39,7 °C et le lot Louisiane 39,9°C.

3- Modèle linéaire mixte

Tout d'abord, il existe une corrélation moyenne (coefficient de corrélation de Pearson de 0,52, p-value < 0,0001) entre le THI moyen quotidien et la température ruminale corrigée moyenne quotidienne (Figure 37).

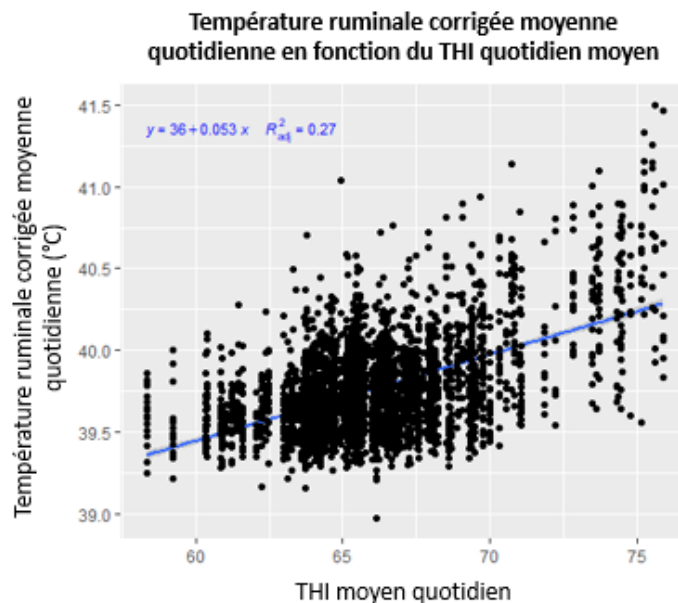


Figure 37 : Température ruminale corrigée moyenne quotidienne en fonction du THI moyen quotidien

Un modèle linéaire mixte est mis en place selon la méthodologie de la partie II-E-1 (*Tableau 21*). Les variables jour en lait et présence des ventilateurs n'étant pas significatives, elles n'ont pas été conservées dans le modèle final. De même, une interaction entre la localisation et le THI n'était pas significative dans le modèle.

Tableau 21 : Modèle linéaire mixte expliquant la température ruminale

Paramètre		Moyenne (°C)	SD	p-value
<i>Intercept</i>		39,75	0,04	<0,0001
<i>THI</i>	< 68	Ref	–	–
	≥ 68	0,18	0,011	<0,0001
<i>Matelas</i>	<i>Louisiane</i>	Ref	–	–
	<i>Aquaclim</i>	-0,17	0,042	0,0004
<i>Parité</i>	1	Ref	–	–
	2 et +	0,099	0,044	0,0258

Selon le modèle, lorsque le THI est supérieur à 68, la température ruminale est significativement plus élevée, il en est de même pour les vaches multipares. En revanche, la température ruminale est significativement inférieure pour les animaux du lot Aquaclim. En effet, il existe une différence significative de la température ruminale lorsque le THI est plus élevé de 0,18 °C. Les primipares ont une température ruminale plus faible de 0,1 °C et celle des vaches du lot Aquaclim est inférieure de 0,17 °C.

En conclusion, il existe une corrélation moyenne entre le THI et la température ruminale (coefficient de Pearson de 0,52 avec une p-value < 0,0001). Les trois paramètres expliquant la température ruminale dans ce modèle sont le THI, la parité et le matelas à disposition des animaux (différences significatives). Un THI élevé est à l'origine d'une augmentation de la température ruminale corrigée moyenne quotidienne (+ 0,18 °C) quel que soit le lot observé (coefficient de corrélation de Pearson entre les 2 variables de 0,52). Les primipares ont une température ruminale inférieure aux multipares (-0,1 °C). Les vaches du lot Aquaclim ont une température ruminale inférieure à celles du lot Louisiane (-0,17 °C). Il n'existe cependant pas d'interaction entre la température ruminale et le type de matelas utilisé.

D- Données concernant la durée de rumination

1- Statistiques descriptives

Les données concernant la durée de rumination quotidienne sont récapitulées dans le *Tableau 22*.

Tableau 22 : Résumé des données concernant la durée de rumination quotidienne moyenne

Nombre de données	Moyenne (min)	Ecart type (min)	Minimum (min)	Q1 (min)	Médiane (min)	Q3 (min)	Maximum (min)
10906	589	66	252	555	597	633	749

Afin de mieux comprendre la dynamique de la durée de rumination au sein des deux lots, un violinplot est réalisé *Figure 38*. Il ne semble pas y avoir de différences concernant la durée de rumination entre les deux lots sur l'ensemble de l'étude.

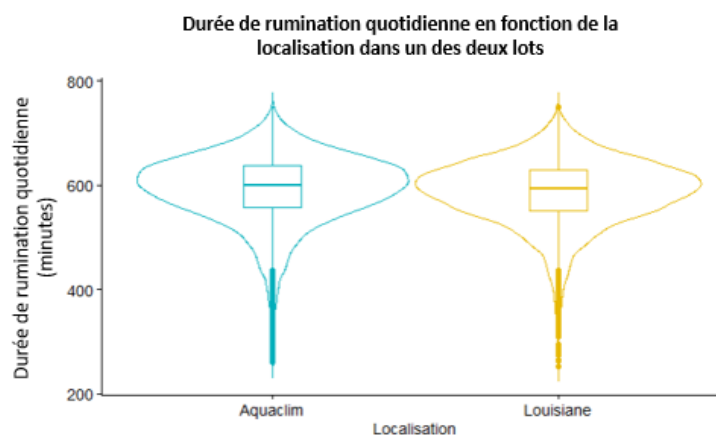


Figure 38 : Violinplot représentant la durée de rumination quotidienne en fonction de la localisation des vaches sur l'ensemble de l'étude

Pour appréhender la dynamique de la durée de rumination dans le temps, le graphique ci-dessous (*Figure 39*) la représente associée au THI. Lors de la période chaude de juillet, la durée de rumination quotidienne diminue. Cela est plus difficile de conclure pour celle de septembre, lié à l'absence de données disponibles à cette période. La durée de rumination est cependant relativement fluctuante le reste du temps.

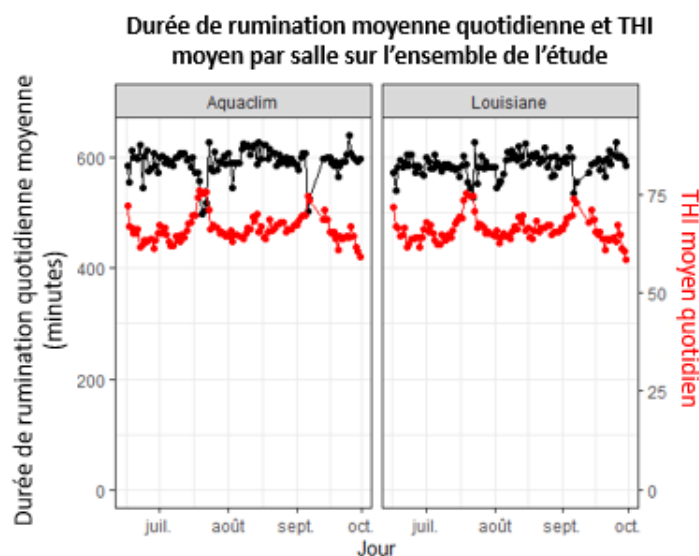


Figure 39 : Durée de rumination moyenne quotidienne et THI moyen quotidien selon la localisation sur l'ensemble de l'étude

En zoomant sur la période chaude de juillet (*Figure 40*), la durée de rumination semble diminuer sans décalage dans le temps lorsque le THI dépasse 70 dans les deux lots. Il semblerait que la durée de rumination diminue plus longtemps et de façon plus intense dans le lot Aquaclim par rapport au lot Louisiane sur cette période.

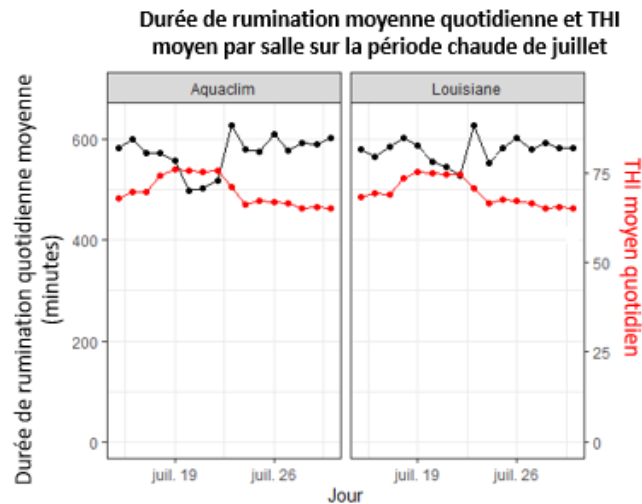


Figure 40 : Durée de rumination moyenne quotidienne et THI moyen quotidien sur la période chaude de juillet

Pour mieux comprendre la dynamique de la durée de rumination en période chaude, on s'intéresse à la dispersion des individus entre les deux lots en comparaison avec une période en absence de stress thermique identifié (*Figure 41*). Il semble ressortir que :

- En période de stress thermique, les durées de rumination individuelles sont plus dispersées que durant des périodes plus fraîches quel que soit le lot.
- Les durées de rumination individuelles des animaux du lot Aquaclim semblent être plus faibles et ce, de façon plus intenses que dans le lot Louisiane lors de la période chaude de juillet.
- Les températures ruminales individuelles hors période de stress thermique paraissent plus proches et semblent moins fluctuer dans le lot Aquaclim que dans le lot Louisiane sauf pour quelques individus dans les deux lots.

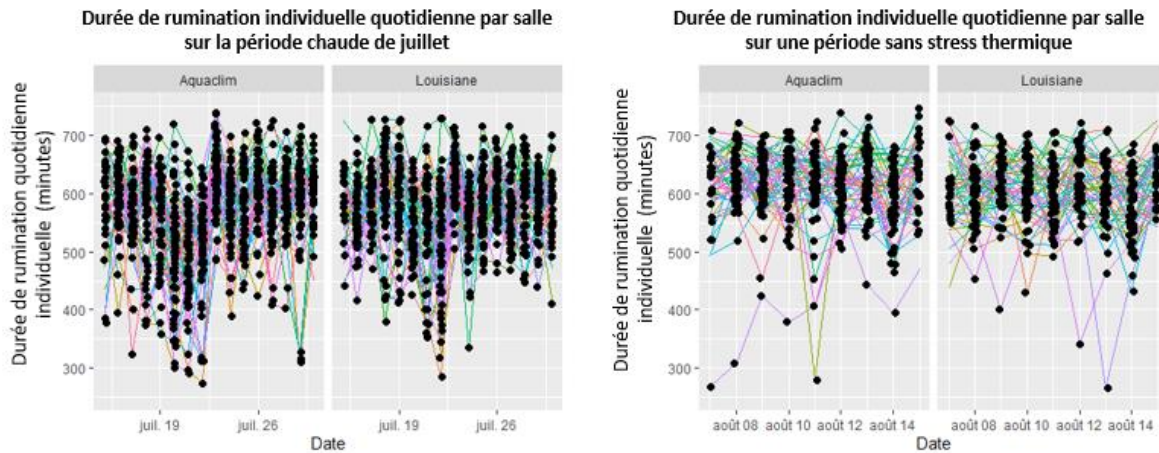


Figure 41 : Comparaison de la durée de rumination quotidienne individuelle sur la période chaude de juillet et sur une période en absence de stress thermique

2- Comparaisons de moyennes

Le *Tableau 23* présente les résultats des tests de comparaison de moyennes effectués sur l'ensemble de la période de l'étude, semaine par semaine et sur la période chaude de juillet.

Tableau 23 : Comparaison de moyenne entre les deux lots sur l'ensemble de l'étude, semaine par semaine et sur la période chaude de juillet

Dates	Durée de rumination moyenne Louisiane (minutes)	Durée de rumination moyenne Aquaclim (minutes)	P-value
Ensemble de l'étude	586	591	4,9 e-05
17/06/2021 au 24/06/2021	582	590	0,1
24/06/2021 au 01/07/2021	581	590	0,019
01/07/2021 au 08/07/2021	589	593	0,42
08/07/2021 au 15/07/2021	581	601	2,9 e-06
15/07/2021 au 22/07/2021	574	554	0,0004
22/07/2021 au 29/07/2021	580	583	0,58
29/07/2021 au 05/08/2021	568	587	5,6 e-05
05/08/2021 au 12/08/2021	597	609	0,014
12/08/2021 au 19/08/2021	604	613	0,023
19/09/2021 au 26/08/2021	598	600	0,61
26/08/2021 au 02/09/2021	586	592	0,19
02/09/2021 au 09/09/2021	582	570	0,06
09/09/2021 au 16/09/2021	582	598	0,032
16/09/2021 au 23/09/2021	586	587	0,6
23/09/2021 au 30/09/2021	602	603	0,74
Période chaude de juillet	588	590	0,12

Sur l'ensemble de la période de l'étude, les vaches du lot Aquaclim ruminent en moyenne 5 minutes de plus de façon significative.

De plus, lorsque l'on compare la durée de rumination moyenne quotidienne semaine par semaine, on observe :

- Une absence de différences significatives entre les durées de rumination des deux lots les semaines 1, 3, 6, 10, 11, 12, 14 et 15.
- Les autres semaines, les durées de rumination quotidiennes moyennes sont significativement différentes. Une seule semaine, la semaine 5, le lot Louisiane a une durée de rumination plus élevée (573 minutes vs 553 minutes). Le reste du temps, le lot Aquaclim a une durée de rumination supérieure par rapport au lot Louisiane (*Tableau 24*) :

Tableau 24 : Différence de durée de rumination en faveur du lot Aquaclim

Semaine 2	Semaine 4	Semaine 7	Semaine 8	Semaine 9	Semaine 13
8 minutes	20 minutes	9 minutes	12 minutes	9 minutes	16 minutes

Enfin, sur la période chaude de juillet, aucune différence significative n'est observée. Les durées de rumination sont très proches (590 minutes en Aquaclim pour et 587 minutes en Louisiane).

Ainsi, de premier abord, il ne semble pas y avoir un impact du matelas à eau réfrigérée sur la durée de rumination lorsque le THI est élevé. Le modèle présenté dans la partie suivante va permettre de vérifier cette hypothèse.

3- Modèle linéaire mixte

Tout d'abord, il existe une faible corrélation négative (coefficient de corrélation de Pearson de -0,12, p-value <0,0001) entre le THI moyen quotidien et la durée de rumination quotidienne (*Figure 42*).

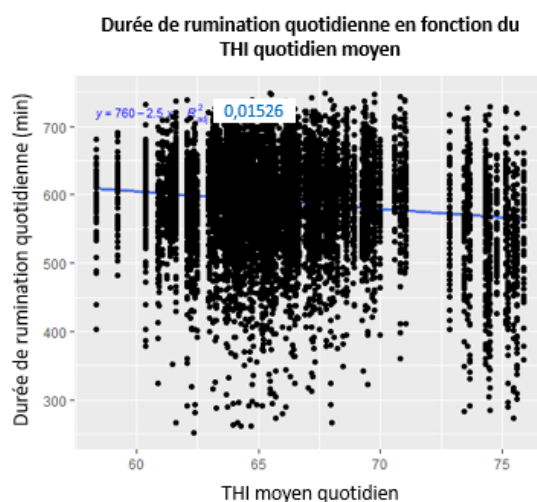


Figure 42 : Durée de rumination quotidienne en fonction du THI moyen quotidien

Un modèle linéaire mixte est mis en place selon la méthodologie de la partie II-E-1 (Tableau 25). La présence des ventilateurs n'étant pas significative, elle n'a pas été conservée dans le modèle final. De plus, des modèles avec un ou deux jours de décalage entre le THI et la durée de rumination ont été testés mais ne sont pas significatifs.

Tableau 25 : Modèle linéaire mixte explicatif de la durée de rumination

Paramètre	Moyenne (min)	SD	p-value
<i>Intercept</i>	572	4,6	< 0,0001
<i>THI</i>			
< 70	Ref	–	–
≥ 70	-15	3,1	< 0,0001
<i>Matelas</i>			
<i>Louisiane</i>	Ref	–	–
<i>Aquaclim</i>	0,93	5	0,85
<i>Parité</i>			
1	Ref	–	–
2	13	5,7	0,024
3 et +	18	6,4	0,005
<i>JEL</i>			
≤ 50	Ref	–	–
> 50	13	2,3	< 0,0001
<i>Matelas*THI</i>			
<i>Louisiane* <70</i>	Ref	–	–
<i>Louisiane* ≥ 70</i>	Ref	–	–
<i>Aquaclim* < 70</i>	Ref	–	–
<i>Aquaclim* ≥ 70</i>	-27	4,3	< 0,0001

Les vaches multipares ont une durée de rumination significativement supérieure aux primipares, 13 minutes pour les vaches de parité 2 et 18 minutes pour les vaches de parité 3 et plus. De même, les vaches avec plus de 50 jours en lait ont une durée de rumination supérieure de 13 minutes. Enfin, les vaches en Aquaclim soumises à un THI ≥ 70, ruminent 27 minutes de moins que les autres. Essayons de mieux définir l'interaction entre les matelas et le THI grâce aux moyennes marginales (Tableau 26).

Tableau 26 : Moyennes marginales de l'interaction matelas*THI du modèle linéaire mixte expliquant la durée de rumination

	THI < 70		THI ≥ 70		P-value
	Moyenne marginale (minutes)	SE	Moyenne marginale (minutes)	SE	
Louisiane	589	3,6	574	4,6	< 0,0001
Aquaclim	590	3,7	547	4,5	< 0,0001

Lorsque le THI est supérieur ou égal à 70, la durée de rumination diminue dans les deux lots, d'environ 15 minutes dans le lot Louisiane et 43 minutes dans le lot Aquaclim. Les vaches ruminent donc 27 minutes de moins lorsque le THI est supérieur ou égal à 70 dans le lot Aquaclim.

En conclusion, les paramètres expliquant la durée de rumination dans ce modèle sont le THI, la parité, le nombre de jours en lait, le matelas à disposition des animaux ainsi qu'une interaction entre le matelas et le THI (différences significatives). Un THI élevé est à l'origine d'une diminution de la durée de rumination dans les deux lots (coefficient de corrélation de Pearson entre les 2 variables de -0,12). Cependant, alors que les durées de rumination sont similaires dans les deux lots lorsque le THI est inférieur à 70, la durée de rumination est inférieure de 27 minutes dans le lot Aquaclim par rapport au lot Louisiane lorsque le THI est supérieur ou égal à 70. Les primipares ont une durée de rumination inférieure aux multipares (-13 et -18 minutes par rapport aux vaches de parité 2 et 3 et +). Enfin, les vaches avec plus de 50 jours en lait ruminent 13 minutes de plus que celles avec un stade de lactation plus faible.

E- Données concernant la durée d'ingestion

1- Statistiques descriptives

Les données concernant la durée d'ingestion quotidienne sont récapitulées dans le *Tableau 27*.

Tableau 27 : Résumé des données concernant la durée d'ingestion sur l'ensemble de l'étude

Nombre de données	Moyenne (min)	Ecart type (min)	Minimum (min)	Q1 (min)	Médiane (min)	Q3 (min)	Maximum (min)
10754	312	63	141	270	311	354	508

Afin de mieux comprendre la dynamique de la durée d'ingestion au sein des deux lots, un violinplot est réalisé *Figure 43*. Il ne semble pas y avoir de différences concernant la durée d'ingestion entre les deux lots sur l'ensemble de l'étude.

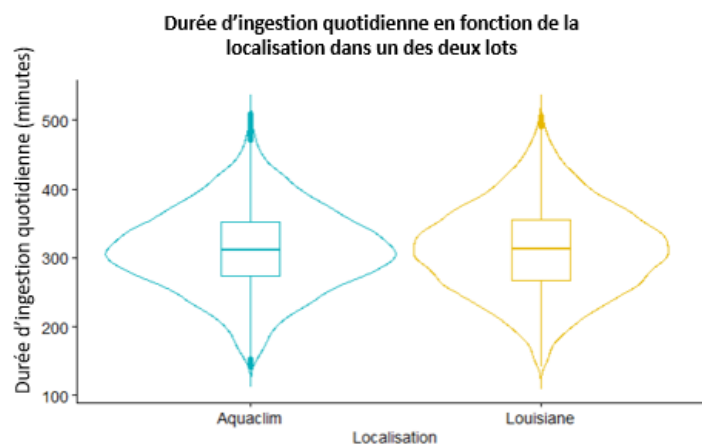


Figure 43 : Violinplot représentant la durée d'ingestion en fonction du lot sur l'ensemble de l'étude

Pour appréhender la dynamique de la durée d'ingestion dans le temps, le graphique ci-dessous (Figure 44) la représente associée au THI. Lors de la période chaude de juillet, la durée d'ingestion quotidienne diminue. De la même manière que pour la durée de rumination, les données concernant la durée d'ingestion sont absentes pour la période chaude de septembre. La durée d'ingestion est très variable au cours du temps en dehors de cette période chaude.

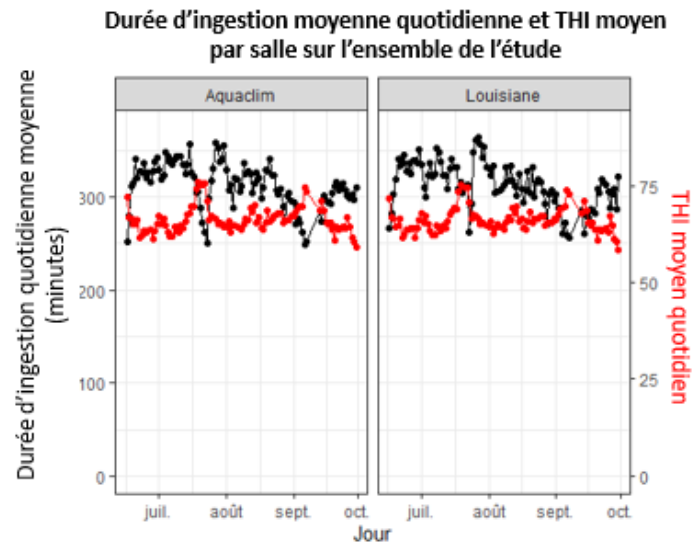


Figure 44 : Durée d'ingestion moyenne quotidienne en fonction du THI moyen quotidien et du lot sur l'ensemble de l'étude

En zoomant sur la période chaude de juillet (Figure 45), la durée d'ingestion semble diminuer sans décalage dans le temps lorsque le THI dépasse 70 dans les deux lots. Il semblerait que la durée d'ingestion diminue plus longtemps et de façon plus intense dans le lot Aquaclim par rapport au lot Louisiane sur cette période.

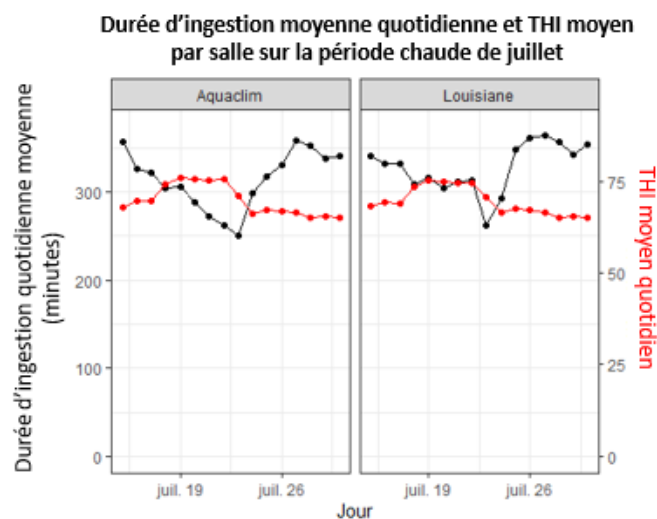


Figure 45 : Durée d'ingestion moyenne quotidienne en fonction du THI moyen quotidien et du lot sur la période chaude de juillet

En s'intéressant à la dispersion de la durée d'ingestion quotidienne des animaux sur la période chaude de juillet et sur une période en absence de stress thermique (*Figure 46*), on observe que les vaches du lot Louisiane ont une durée d'ingestion plus dispersée que celles en Aquacim quelle que soit la période.

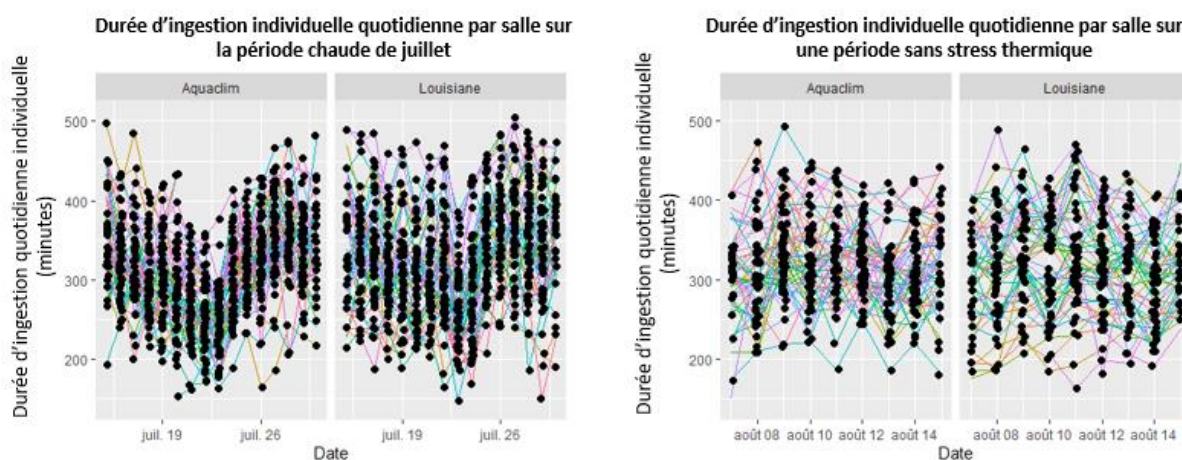


Figure 46 : Dispersion de la durée d'ingestion des vaches sur la période chaude de juillet et sur une période sans stress thermique

2- Comparaisons de moyennes

Le *Tableau 28* présente les résultats des tests de comparaison de moyennes effectués sur l'ensemble de la période de l'étude, semaine par semaine et sur la période chaude de juillet.

Tableau 28 : Comparaison de moyennes de la durée d'ingestion quotidienne sur l'ensemble de l'étude, semaine par semaine et sur la période chaude de juillet

Dates	Durée d'ingestion moyenne Louisiane (minutes)	Durée d'ingestion moyenne Aquacim (minutes)	P-value
Ensemble de l'étude	313	312	0,5
17/06/2021 au 24/06/2021	323	318	0,3
24/06/2021 au 01/07/2021	336	330	0,1
01/07/2021 au 08/07/2021	322	334	0,006
08/07/2021 au 15/07/2021	333	338	0,2
15/07/2021 au 22/07/2021	321	311	0,03
22/07/2021 au 29/07/2021	329	311	0,0004
29/07/2021 au 05/08/2021	332	325	0,1
05/08/2021 au 12/08/2021	317	321	0,4
12/08/2021 au 19/08/2021	310	314	0,2
19/09/2021 au 26/08/2021	317	322	0,2
26/08/2021 au 02/09/2021	297	296	0,7
02/09/2021 au 09/09/2021	271	264	0,1
09/09/2021 au 16/09/2021	276	287	0,07
16/09/2021 au 23/09/2021	295	303	0,08
23/09/2021 au 30/09/2021	303	305	0,6
Période chaude de juillet	308	306	0,4

Sur l'ensemble de la période du 17/06/2021 au 30/09/2021, il n'y a pas de différence significative entre les durées d'ingestion en Aquaclim et en Louisiane. Les durées d'ingestion sont très proches (312 et 313 minutes respectivement).

Si l'on regarde ces résultats semaine par semaine, on observe :

- Une absence de différence significative les semaines 1, 2, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 et 15. De plus, aucune tendance ne semble se dégager.
- Les semaines 3, 5 et 6 présentent des différences significatives. La semaine 3 est en faveur du lot Aquaclim avec 334 minutes d'ingestion en Aquaclim et 322 minutes d'ingestion en Louisiane. Les semaines 5 et 6 sont en faveur du lot Louisiane avec 321 minutes contre 311 minutes d'ingestion sur la semaine 5 et 329 minutes contre 311 minutes d'ingestion sur la semaine 6.

Sur la période chaude de juillet, aucune différence significative n'est observée. Les durées d'ingestion sont très proches (306 et 308 minutes).

Ainsi, au premier abord, il ne semble pas y avoir un impact du matelas à eau réfrigérée sur la durée d'ingestion lorsque le THI est élevé. Le modèle présenté dans la partie suivante va permettre de vérifier cette hypothèse.

3- Modèle linéaire mixte

Tout d'abord, il existe une faible corrélation négative (coefficient de corrélation de Pearson de -0,16, p-value <0,0001) entre le THI moyen quotidien et la durée d'ingestion quotidienne (*Figure 47*).

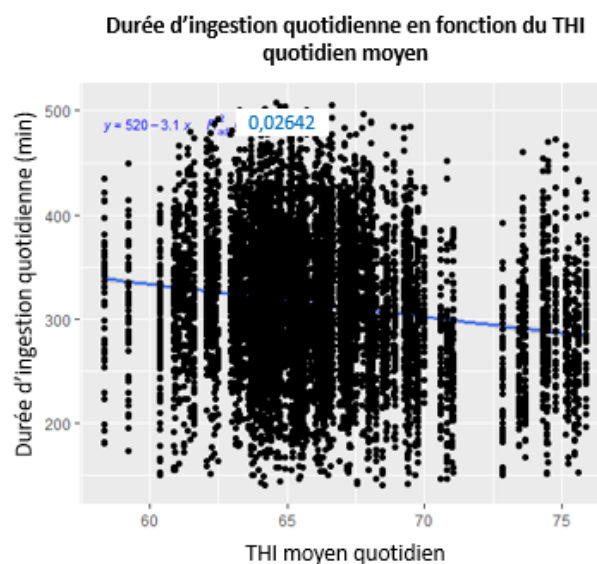


Figure 47 : Durée d'ingestion quotidienne en fonction du THI moyen quotidien

Un modèle linéaire mixte est mis en place selon la méthodologie de la partie II-E-1 (*Tableau 29*). De la même manière que pour la durée de rumination, un modèle linéaire mixte avec un décalage d'un et deux jours entre le THI et la durée d'ingestion a été testé mais n'était pas significatif.

Tableau 29 : Modèle linéaire mixte explicatif de la durée d'ingestion

Paramètre		Moyenne (min)	SD	p-value
Intercept		318	6,1	< 0,0001
THI	< 68	Ref	–	–
	≥ 68	-21	1,8	< 0,0001
Matelas	Louisiane	Ref	–	–
	Aquaclim	-0,5	6,9	0,9
Parité	1	Ref	–	–
	2	-17	7,9	0,03
	3 et +	-34	9,1	< 0,0001
JEL	≤ 50	Ref	–	–
	> 50	21	2,2	< 0,0001
Ventilateurs	Non	Ref	–	–
	Oui	-22	1,4	< 0,0001
Matelas*THI	Louisiane* < 68	Ref	–	–
	Louisiane* ≥ 68	Ref	–	–
	Aquaclim* < 68	Ref	–	–
	Aquaclim* ≥ 68	-5	2,5	0,03

Les vaches multipares ont une durée d'ingestion significativement inférieure aux primipares, 17 minutes pour les vaches de parité 2 et 34 minutes pour les vaches de parité 3 et plus. De plus, les vaches avec plus de 50 jours en lait ont une durée d'ingestion supérieure de 21 minutes. En outre, lorsque les ventilateurs sont présents, la durée d'ingestion diminue de 22 minutes. Enfin, les vaches en Aquaclim soumises à un THI ≥ 68, ingèrent 5 minutes de moins que les autres. Essayons de mieux définir l'interaction entre les matelas et le THI grâce aux moyennes marginales (Tableau 30).

Tableau 30 : Moyennes marginales de l'interaction entre le THI et les matelas dans le modèle linéaire mixte explicatif de la durée d'ingestion

	THI<68		THI≥68		P-value
	Moyenne marginale (minutes)	SE	Moyenne marginale (minutes)	SE	
Louisiane	301	5	280	5,2	<0,0001
Aquaclim	300	5,1	274	5,3	<0,0001

Lorsque le THI est supérieur ou égal à 68, la durée d'ingestion diminue dans les deux lots, d'environ 21 minutes dans le lot Louisiane et 26 minutes dans le lot Aquaclim. Les vaches ingèrent donc 5 minutes de moins lorsque le THI est supérieur ou égal à 68 dans le lot Aquaclim.

En conclusion, les paramètres expliquant la durée d'ingestion dans ce modèle sont le THI, la parité, le nombre de jours en lait, le matelas à disposition des animaux, la présence des ventilateurs ainsi qu'une interaction entre le matelas et le THI (différences significatives). Un THI élevé, supérieur ou égal à 68, est à l'origine d'une diminution de la durée d'ingestion dans les deux lots (coefficient de corrélation de Pearson entre les 2 variables de -0,16). Cependant, la durée d'ingestion est inférieure de 5 minutes dans le lot Aquaclim par rapport au lot Louisiane lorsque le THI est supérieur ou égal à 68, alors que les durées d'ingestion sont similaires dans les deux groupes lorsque le THI est inférieur ou égal à 68. Les primipares ont une durée d'ingestion supérieure aux multipares (17 et 34 minutes par rapport aux vaches de parité 2 et 3 et +). De plus, les vaches avec plus de 50 jours en lait ingèrent 22 minutes de plus que celles avec un stade de lactation plus faible. Enfin, lorsque les ventilateurs sont allumés, les vaches ingèrent 22 minutes de moins.

F- Données comportementales

1- Budgets-temps

a- Statistiques descriptives

Les données concernant les budget-temps sont récapitulées dans le *Tableau 31*. Le nombre de données correspond au nombre de jours étudiés.

Tableau 31 : Récapitulatif des données concernant le budget-temps

Paramètre	Nombre de données	Moyenne (min)	Ecart type (min)	Minimum (min)	Q1 (min)	Médiane (min)	Q3 (min)	Maximum (min)
<i>Temps passé debout dans les allées</i>	144	216	45	147	178	218	249	355
<i>Temps passé debout dans les logettes</i>	144	210	37	133	179	204	243	326
<i>Temps passé couché dans les logettes</i>	144	495	73	330	442	488	554	748
<i>Temps passé à l'auge</i>	144	264	36	122	238	261	287	338
<i>Temps passé à la traite</i>	144	34	3	28	32	34	36	45
<i>Temps passé à l'abreuvoir</i>	144	42	10	25	35	39	46	77

Pour mieux appréhender les différentes durées du budget-temps dans chacun des deux lots, elles sont représentées sur la *Figure 48*. De façon générale, les vaches du lot Aquaclim passent plus de temps couchées dans les logettes et debout à l'auge. Les vaches du lot Louisiane passent plus de temps debout, que ce soit dans les allées, dans les logettes, à l'abreuvoir et à la traite.

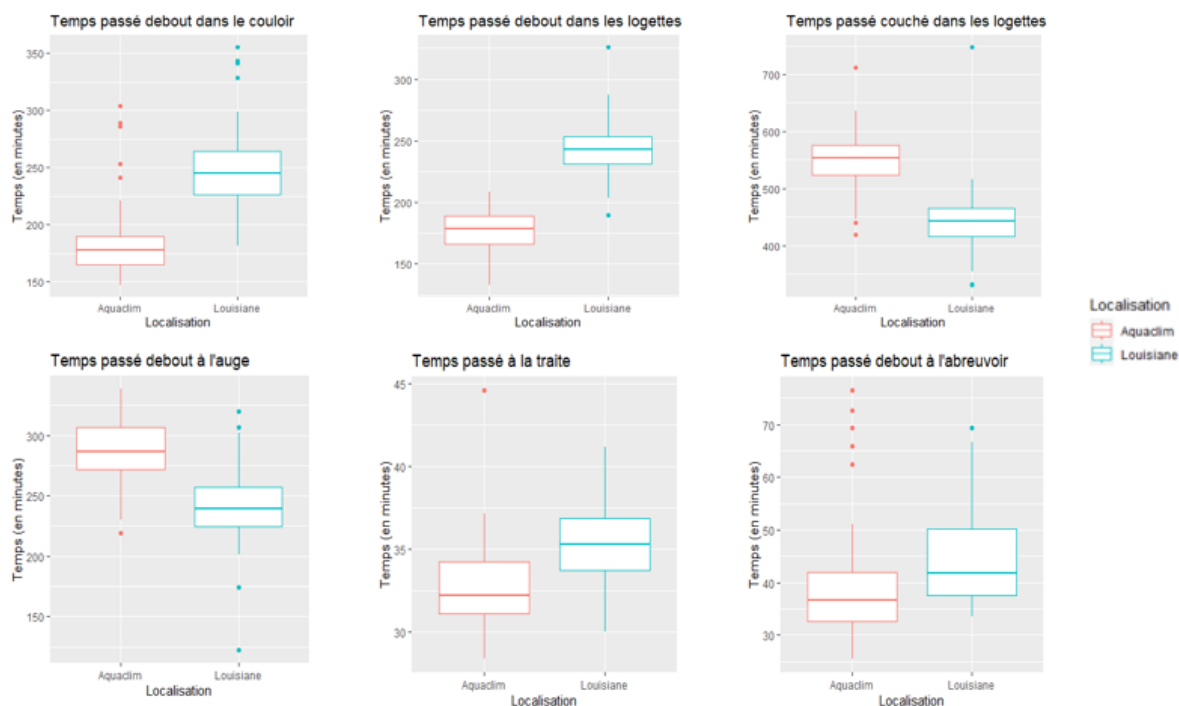


Figure 48 : Boxplot du budget-temps des différentes activités dans les deux lots

La Figure 49 représente le cumul des budget-temps des différentes activités sur l'ensemble de l'étude et durant les deux périodes chaudes. Les observations précédentes sont confirmées : les vaches du lot Aquadim passent plus de temps couchées et celles du lot Louisiane debout. De façon générale, les budget-temps sont relativement conservés tout au long de l'étude sauf lorsque le THI augmente. En effet, durant les périodes chaudes, le temps passé couché tend à diminuer tout comme le temps passé à manger quel que soit le lot considéré. Il semblerait que les vaches passent plus de temps à la traite lorsque le THI est élevé.

Il existe des variations du temps cumulé total en fonction des jours. Le temps cumulé total en minutes d'une journée vaut 1440 minutes. Les barres sont souvent inférieures à ce seuil. Cela s'explique par le fait que certaines activités ne sont pas prises en compte comme le fait d'être couché dans le couloir ou en mouvement ailleurs que dans les allées.

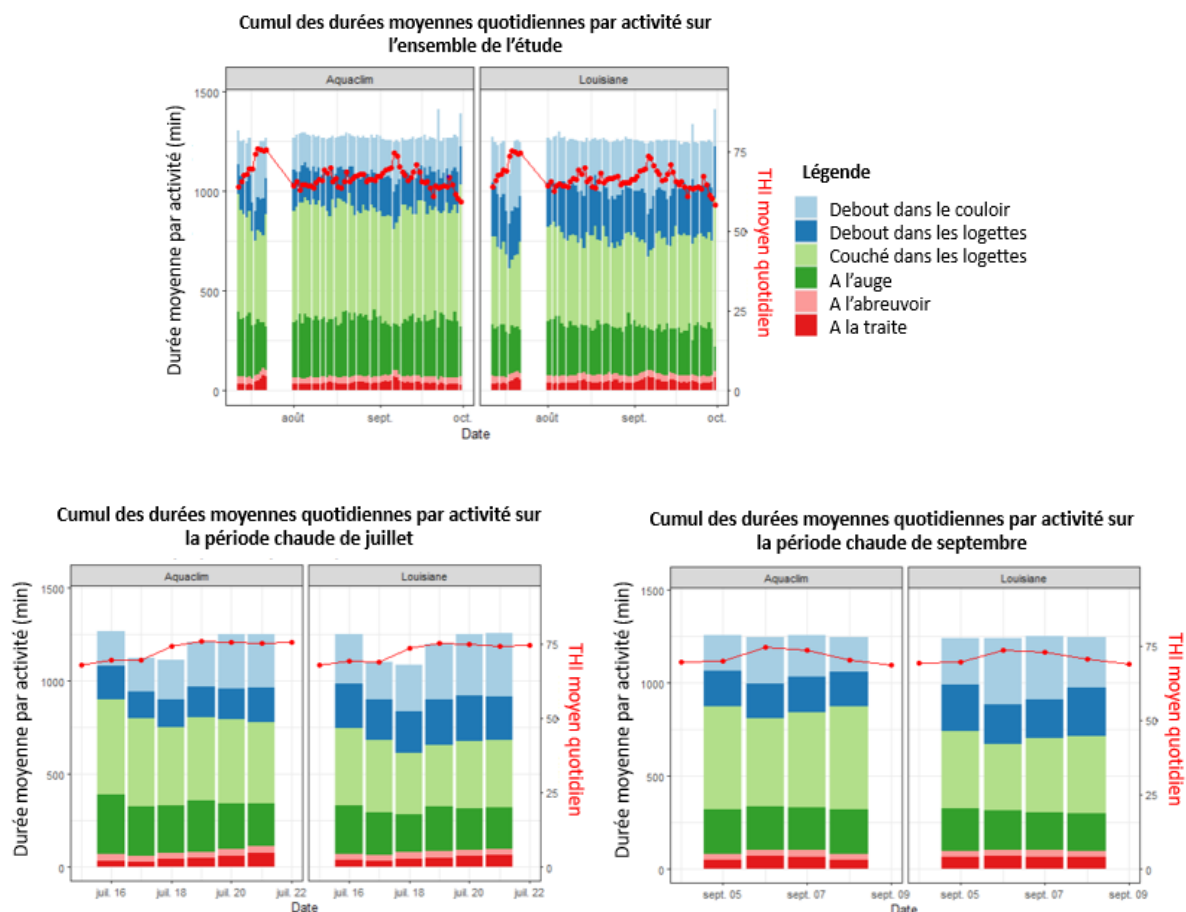


Figure 49 : Cumul des budget-temps des différentes activités selon le lot sur l'ensemble de l'étude et sur les deux périodes chaudes

b- Comparaisons de moyennes

Le *Tableau 32* récapitule les tests de comparaison de moyennes effectués pour la durée allouée à chaque activité.

Sur l'ensemble de l'étude :

- Les animaux du lot Aquaclim passent 106 minutes de plus couchées, 46 minutes de plus à l'auge que les vaches du lot Louisiane.
- Les animaux du lot Louisiane passent 65 minutes de plus debout dans les allées, 64 minutes de plus debout les logettes, 2 minutes de plus à la traite et 6 minutes de plus à l'abreuvoir.

Durant les périodes chaudes, il n'est pas possible de conclure sur le temps passé à la traite et le temps passé à boire (p -value > 0,05). Les autres observations sont globalement identiques aux précédentes. Cependant, le temps passé debout tend à augmenter lors des périodes chaudes et, nécessairement, le temps passé couché diminue. Le temps passé à l'abreuvoir semble augmenter tandis que le temps passé à l'auge diminue également lorsque le THI est plus élevé. Cela confirme les résultats de la partie précédentes (III.D).

Lors de la période chaude de juillet, l'écart entre les deux tend à se réduire concernant les temps passés debout, couchés et à l'auge ce qui n'est pas présent lors de la période chaude de septembre où les vaches du lot Aquaclim semblent moins pâtir du stress thermique que les vaches du lot Louisiane.

Tableau 32 : Comparaison de moyennes du temps alloué à chaque activité sur l'ensemble de l'étude et sur les deux périodes chaudes

Temps alloué par activité (minutes)	Sur toute la période			Sur les périodes chaudes de juillet (première ligne de la case) et septembre (deuxième ligne de la case)		
	Louisiane	Aquaclim	p-value	Louisiane	Aquaclim	p-value
Temps passé debout dans les allées	249	184	< 2,2e-16	279	228	0,06
				305	211	0,02
Temps passé debout dans les logettes	242	178	< 2,2e-16	234	167	9,6e-07
				233	190	0,044
Temps passé couché dans les logettes	442	548	< 2,2e-16	376	472	0,002
				397	524	0,002
Temps passé à l'auge	241	287	< 2,2e-16	227	259	0,045
				211	234	0,013
Temps passé à la traite	35	33	1,6e-09	33	33	0,89
				33	33	0,57
Temps passé à l'abreuvoir	45	39	0,00072	49	52	0,78
				65	59	0,36

c- Modèle linéaire mixte

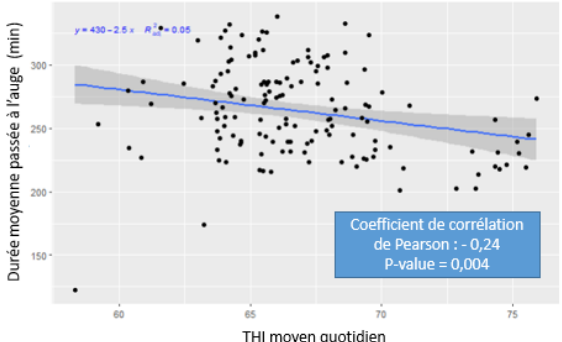
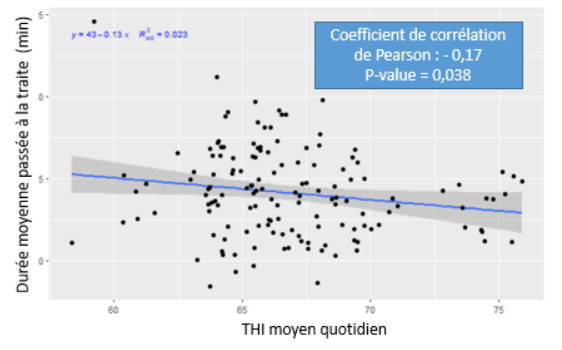
Les informations concernant les modèles pour chaque paramètre sont récapitulées dans le Tableau 34. Les moyennes marginales de l'interaction entre le THI et le type de matelas pour le modèle du paramètre durée de traite sont présentés dans Tableau 33.

Tableau 33 : Moyennes marginales de l'interaction THI et type de matelas pour le modèle du paramètre durée de traite

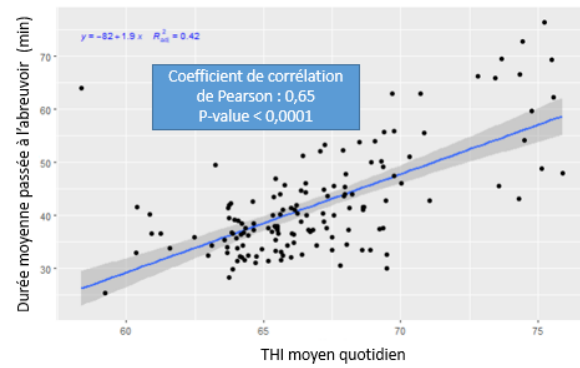
	THI<70		THI≥70		P-value
	Moyenne marginale	SE	Moyenne marginale	SE	
Louisiane	35,8	0,28	33,3	0,73	0,002
Aquaclim	33	0,29	32,9	0,7	0,9

Tableau 34 : Récapitulatif des modèles concernant les différents paramètres des budget-temps

Paramètre	Corrélation entre le paramètre et le THI	Résultats du modèle																								
Temps passé debout dans les allées	<p>Durée moyenne passée debout dans l'allée (min)</p> <p>THI moyen quotidien</p> <p>Coefficient de corrélation de Pearson : 0,42 P-value < 0,0001</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Paramètre</th> <th>Moyenne (min)</th> <th>SD</th> <th>p-value</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Intercept</td> <td>242</td> <td>3</td> <td><0,0001</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">THI</td> <td>< 70</td> <td>Ref.</td> <td>–</td> </tr> <tr> <td>≥ 70</td> <td>58</td> <td>6</td> <td><0,0001</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Matelas</td> <td>Louisiane</td> <td>Ref.</td> <td>–</td> </tr> <tr> <td>Aquaclim</td> <td>-66</td> <td>4</td> <td><0,0001</td> </tr> </tbody> </table>	Paramètre	Moyenne (min)	SD	p-value	Intercept	242	3	<0,0001	THI	< 70	Ref.	–	≥ 70	58	6	<0,0001	Matelas	Louisiane	Ref.	–	Aquaclim	-66	4	<0,0001
Paramètre	Moyenne (min)	SD	p-value																							
Intercept	242	3	<0,0001																							
THI	< 70	Ref.	–																							
	≥ 70	58	6	<0,0001																						
Matelas	Louisiane	Ref.	–																							
	Aquaclim	-66	4	<0,0001																						
Temps passé debout dans les logettes	<p>Durée moyenne passée debout dans les logettes (min)</p> <p>THI moyen quotidien</p> <p>Coefficient de corrélation de Pearson : - 0,09 P-value < 0,0001</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Paramètre</th> <th>Moyenne (min)</th> <th>SD</th> <th>p-value</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Intercept</td> <td>242</td> <td>2</td> <td><0,0001</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Matelas</td> <td>Louisiane</td> <td>Ref.</td> <td>–</td> </tr> <tr> <td>Aquaclim</td> <td>-64</td> <td>3</td> <td><0,0001</td> </tr> </tbody> </table>	Paramètre	Moyenne (min)	SD	p-value	Intercept	242	2	<0,0001	Matelas	Louisiane	Ref.	–	Aquaclim	-64	3	<0,0001								
Paramètre	Moyenne (min)	SD	p-value																							
Intercept	242	2	<0,0001																							
Matelas	Louisiane	Ref.	–																							
	Aquaclim	-64	3	<0,0001																						
Temps passé couché dans les logettes	<p>Durée moyenne passée couché dans les logettes (min)</p> <p>THI moyen quotidien</p> <p>Coefficient de corrélation de Pearson : - 0,42 P-value < 0,0001</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Paramètre</th> <th>Moyenne (min)</th> <th>SD</th> <th>p-value</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Intercept</td> <td>451</td> <td>5,4</td> <td><0,0001</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">THI</td> <td>< 70</td> <td>Ref.</td> <td>–</td> </tr> <tr> <td>≥ 70</td> <td>-68</td> <td>11</td> <td><0,0001</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Matelas</td> <td>Louisiane</td> <td>Ref.</td> <td>–</td> </tr> <tr> <td>Aquaclim</td> <td>107</td> <td>7,4</td> <td><0,0001</td> </tr> </tbody> </table>	Paramètre	Moyenne (min)	SD	p-value	Intercept	451	5,4	<0,0001	THI	< 70	Ref.	–	≥ 70	-68	11	<0,0001	Matelas	Louisiane	Ref.	–	Aquaclim	107	7,4	<0,0001
Paramètre	Moyenne (min)	SD	p-value																							
Intercept	451	5,4	<0,0001																							
THI	< 70	Ref.	–																							
	≥ 70	-68	11	<0,0001																						
Matelas	Louisiane	Ref.	–																							
	Aquaclim	107	7,4	<0,0001																						

<p><i>Temps passé à l'auge</i></p>	 <p>Durée moyenne passée à l'auge (min)</p> <p>THI moyen quotidien</p> <p>$y = 430 - 2.5 \times x$ $R^2 = 0.05$</p> <p>Coefficient de corrélation de Pearson : - 0,24 P-value = 0,004</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Paramètre</th> <th>Moyenne (min)</th> <th>SD</th> <th>p-value</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Intercept</td> <td>245</td> <td>3</td> <td><0,0001</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">THI</td> <td>< 70</td> <td>Ref.</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>≥ 70</td> <td>-38</td> <td>6,1 <0,0001</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Matelas</td> <td><i>Louisiane</i></td> <td>Ref.</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td><i>Aquaclim</i></td> <td>47</td> <td>4,1 <0,0001</td> </tr> </tbody> </table>	Paramètre	Moyenne (min)	SD	p-value	Intercept	245	3	<0,0001	THI	< 70	Ref.	-	≥ 70	-38	6,1 <0,0001	Matelas	<i>Louisiane</i>	Ref.	-	<i>Aquaclim</i>	47	4,1 <0,0001																				
Paramètre	Moyenne (min)	SD	p-value																																									
Intercept	245	3	<0,0001																																									
THI	< 70	Ref.	-																																									
	≥ 70	-38	6,1 <0,0001																																									
Matelas	<i>Louisiane</i>	Ref.	-																																									
	<i>Aquaclim</i>	47	4,1 <0,0001																																									
<p><i>Temps passé à la traite</i></p>	 <p>Durée moyenne passée à la traite (min)</p> <p>THI moyen quotidien</p> <p>$y = 43 - 0.13 \times x$ $R^2 = 0.023$</p> <p>Coefficient de corrélation de Pearson : - 0,17 P-value = 0,038</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Paramètre</th> <th>Moyenne (min)</th> <th>SD</th> <th>p-value</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Intercept</td> <td>37</td> <td>0,36</td> <td><0,0001</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">THI</td> <td>< 70</td> <td>Ref.</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>≥ 70</td> <td>-2,5</td> <td>0,79 0,00187</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Matelas</td> <td><i>Louisiane</i></td> <td>Ref.</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td><i>Aquaclim</i></td> <td>-2,8</td> <td>0,4 <0,0001</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Présence de ventilateur</td> <td><i>Non</i></td> <td>Ref.</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td><i>Oui</i></td> <td>-1,5</td> <td>0,38 0,0001</td> </tr> <tr> <td rowspan="4">Matelas*THI</td> <td><i>Louisiane*THI<70</i></td> <td>Ref.</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td><i>Louisiane*THI≥ 70</i></td> <td>Ref.</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td><i>Aquaclim*THI<70</i></td> <td>Ref.</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td><i>Aquaclim*THI≥ 70</i></td> <td>2,4</td> <td>1,1 0,03181</td> </tr> </tbody> </table>	Paramètre	Moyenne (min)	SD	p-value	Intercept	37	0,36	<0,0001	THI	< 70	Ref.	-	≥ 70	-2,5	0,79 0,00187	Matelas	<i>Louisiane</i>	Ref.	-	<i>Aquaclim</i>	-2,8	0,4 <0,0001	Présence de ventilateur	<i>Non</i>	Ref.	-	<i>Oui</i>	-1,5	0,38 0,0001	Matelas*THI	<i>Louisiane*THI<70</i>	Ref.	-	<i>Louisiane*THI≥ 70</i>	Ref.	-	<i>Aquaclim*THI<70</i>	Ref.	-	<i>Aquaclim*THI≥ 70</i>	2,4	1,1 0,03181
Paramètre	Moyenne (min)	SD	p-value																																									
Intercept	37	0,36	<0,0001																																									
THI	< 70	Ref.	-																																									
	≥ 70	-2,5	0,79 0,00187																																									
Matelas	<i>Louisiane</i>	Ref.	-																																									
	<i>Aquaclim</i>	-2,8	0,4 <0,0001																																									
Présence de ventilateur	<i>Non</i>	Ref.	-																																									
	<i>Oui</i>	-1,5	0,38 0,0001																																									
Matelas*THI	<i>Louisiane*THI<70</i>	Ref.	-																																									
	<i>Louisiane*THI≥ 70</i>	Ref.	-																																									
	<i>Aquaclim*THI<70</i>	Ref.	-																																									
	<i>Aquaclim*THI≥ 70</i>	2,4	1,1 0,03181																																									

Temps passé à l'abreuvoir



Paramètre		Moyenne (min)	SD	p-value
Intercept		39	1,1	<0,0001
THI	< 70	Ref.	–	–
	≥ 70	20	1,6	<0,0001
Matelas	<i>Louisiane</i>	Ref.	–	–
	<i>Aquaclim</i>	-5,7	0,4	<0,0001
Présence de ventilateur	<i>Non</i>	Ref.	–	–
	<i>Oui</i>	5,1	0,38	<0,0001

En conclusion, certaines activités sont peu influencées par le THI comme le fait d'être debout dans les logettes (coefficient de corrélation de Pearson -0,09, p-value <0,0001), le temps passé à la traite (coefficient de corrélation de Pearson -0,17, p-value=0,0038) et le temps passé à l'auge (coefficient de corrélation de Pearson -0,24, p-value=0,004). D'autres sont moyennement corrélées avec le THI telles le fait d'être debout dans l'allée (coefficient de corrélation de Pearson 0,42, p-value <0,0001), le fait d'être couché dans les logettes (coefficient de corrélation de Pearson -0,42, p-value <0,0001) ou le temps passé à l'abreuvoir (coefficient de corrélation de Pearson 0,65, p-value <0,0001).

De plus, chacune des durées du budget-temps ne dépend pas des mêmes paramètres. En effet, le temps passé debout dans les allées est dépendant du THI et du type de matelas. Lorsque le THI est supérieur ou égal à 70, les vaches passent 58 minutes de plus debout dans les allées quel que soit le type de matelas mais les vaches en Aquaclim y passent 66 minutes de moins que les vaches en Louisiane quel que soit le THI.

Concernant le temps passé debout dans les logettes, le seul paramètre l'influençant est le type de matelas : les vaches en Aquaclim y passent 64 minutes de moins quel que soit le THI.

La durée passée couché dans les logettes est dépendante du THI et du type de matelas. Lorsque le THI est supérieur ou égal 70, elle est réduite de 68 minutes quel que soit le matelas. En Aquaclim, les vaches passent 107 minutes de plus couchées qu'en Louisiane quel que soit le THI.

Le temps de séjour à l'auge est influencé par le THI et le type de matelas. Lorsque le THI dépasse 70, les vaches passent 38 minutes de moins à l'auge quel que soit le type de matelas utilisé. Les vaches du lot Aquaclim passent 47 minutes de plus à l'auge quel que soit le THI.

Concernant la durée de la traite, la présence des ventilateurs diminue de 1,5 minute la durée de traite. La durée de la traite est inférieure en Aquaclim quel que soit le THI : -2,8 minutes lorsque le THI est inférieur à 70 et -1,1 lorsque le THI est supérieur ou égal à 70. Il n'y a pas d'influence du THI sur les vaches du lot Aquaclim alors que les vaches du lot Louisiane passent 2,5 minutes de moins à la traite quand le THI est supérieur ou égal à 70.

Enfin, le temps passé à l'abreuvoir dépend du THI, du type de matelas à disposition des vaches et de la présence de ventilateurs. Lorsque le THI dépasse 70, les vaches passent 20 minutes de plus à l'abreuvoir et 5,1 minutes de plus quand les ventilateurs sont allumés. En Aquaclim, les vaches passent 5,7 minutes de moins à l'abreuvoir.

2- Indices de confort et d'utilisation des logettes

a- Statistiques descriptives

Les données concernant les indices de confort des vaches sont récapitulées dans le *Tableau* 35.

Tableau 35 : Récapitulatif des données concernant les indices de confort des vaches

Paramètre	Nombre de données	Moyenne (min)	Ecart type (min)	Minimum (min)	Q1 (min)	Médiane (min)	Q3 (min)	Maximum (min)
CCI	144	0,68	0,06	0,53	0,63	0,69	0,73	0,8
CLI	144	0,34	0,05	0,23	0,31	0,34	0,38	0,52
CSI	144	0,37	0,06	0,27	0,31	0,38	0,42	0,52
SUI	144	0,49	0,07	0,34	0,43	0,48	0,55	0,63
SPI	144	0,23	0,05	0,14	0,19	0,23	0,26	0,34

Le Tableau 36 est une aide à l'interprétation des indices.

Tableau 36 : Interprétation des données concernant les indices de confort

Paramètre	Interprétation	Valeurs recommandées
CCI (Cow Comfort Index)	Reflète de l'utilisation de la stabulation libre par les vaches, du comportement de couchage et du confort des logettes (litière/sol et dimensions) (Cook et al., 2005)	> 0,85 une heure après la traite (Cook et al., 2005)
CLI (Cow Lying Index)	Reflète du nombre de vaches debout (Mattachini et al., 2011) Indications sur le confort et l'accessibilité des logettes et l'impact sur les autres activités (déplacement, traite, repas)	
CSI (Cow Standing Index)	Reflète du nombre de vaches couchées (Mattachini et al., 2011) Indications sur le confort et l'accessibilité des logettes et l'impact sur les autres activités (déplacement et traite)	
SUI (Stall Use Index)	Reflète de l'utilisation de la stabulation libre par les vaches, du comportement de couchage et du confort des logettes (litière/sol et dimensions) (Cook et al., 2005)	> 0,75 une heure après la traite (Cook et al., 2005)
SPI (Stall Perching Index)	Reflète du confort des logettes et plus particulièrement du dimensionnement (Cook et al., 2005)	

De manière générale, ces indices sont impactés par la proportion de vaches boiteuses dans le troupeau (Cook et al., 2005).

La Figure 50 représente les différents indices en fonction du type de matelas utilisé. Les CCI, CLI et SUI sont supérieurs dans le lot Aquaclim tandis que les CSI et SPI sont supérieurs dans le lot Louisiane, cela laisse présager que les matelas Aquaclim serait plus confortables. En effet, les dimensions des logettes sont identiques dans les deux lots.

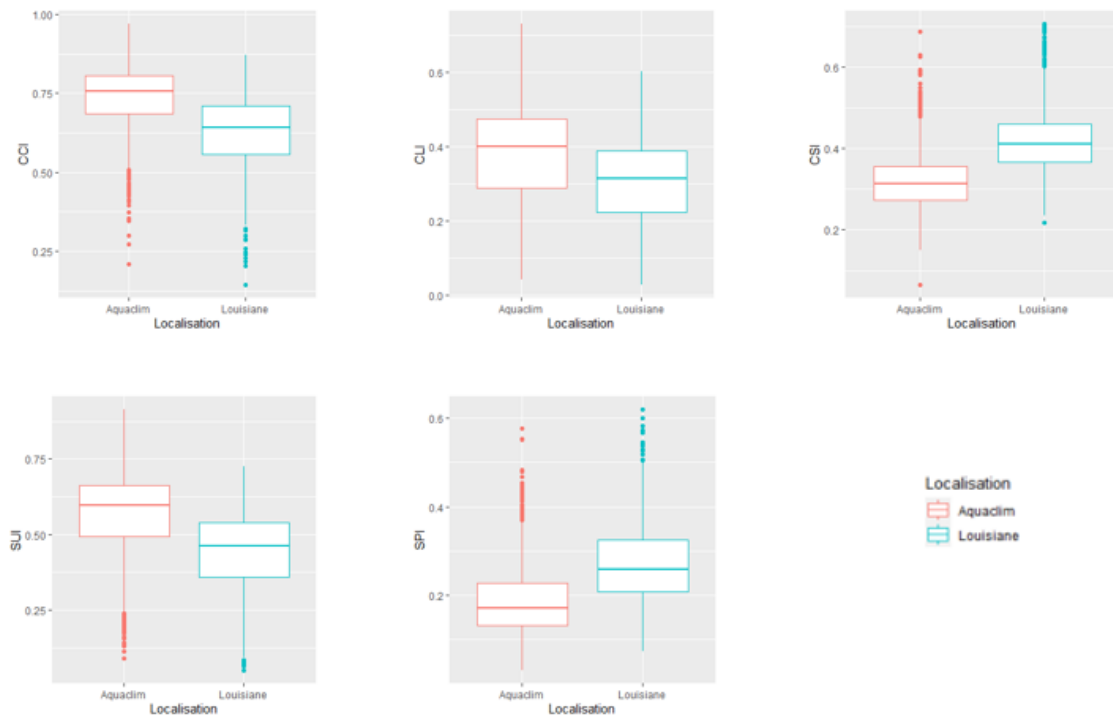
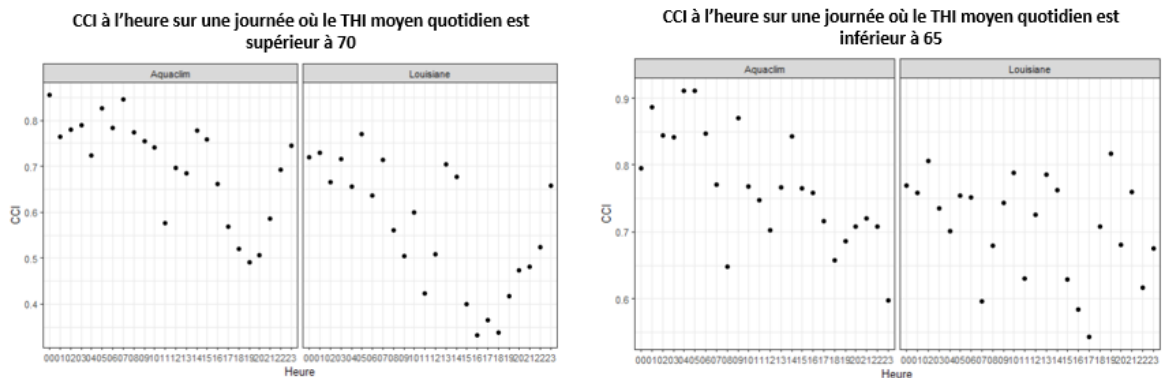


Figure 50 : Boxplot des indices par type de matelas utilisé sur l'ensemble de l'étude

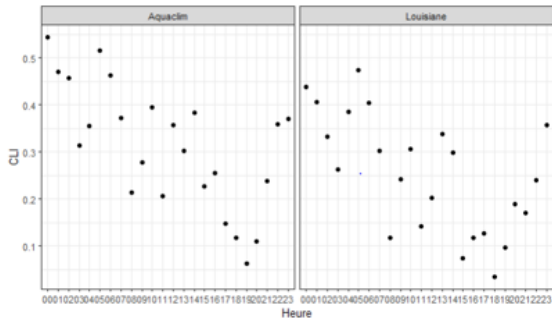
La Figure 51 représente les différents indices sur une journée où le THI est élevé (à gauche) et une journée où le THI est plus faible (à droite). Tous les indices semblent impactés par le THI : les CCI, CLI et SUI semblent diminuer lorsque le THI augmente tandis que l'effet inverse se produit avec le CSI et SPI.

De plus, il semble y avoir des variations journalières, les vaches semblent plus couchées en soirée et durant la nuit (entre minuit et 6 h du matin) et sont debout de façon plus importante la journée. Ce phénomène est accentué lorsque le THI dépasse 70.

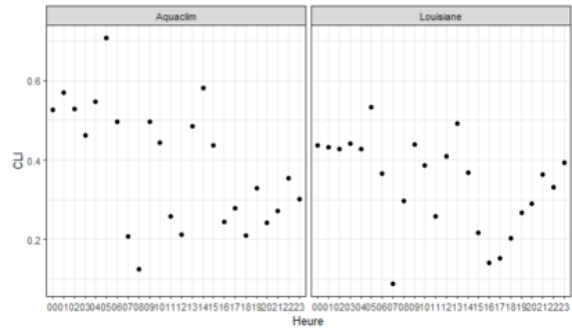
Enfin, les différences observées entre les vaches du lot Louisiane et Aquacim sont également présentes durant ces deux journées.



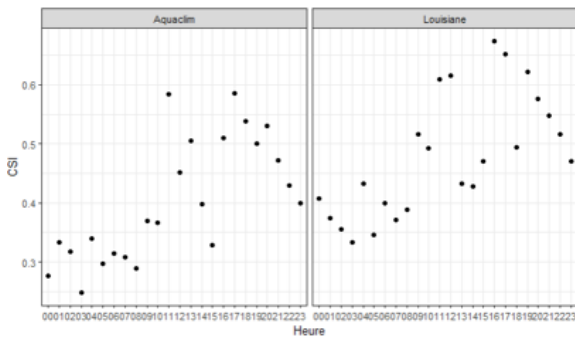
CLI à l'heure sur une journée où le THI moyen quotidien est supérieur à 70



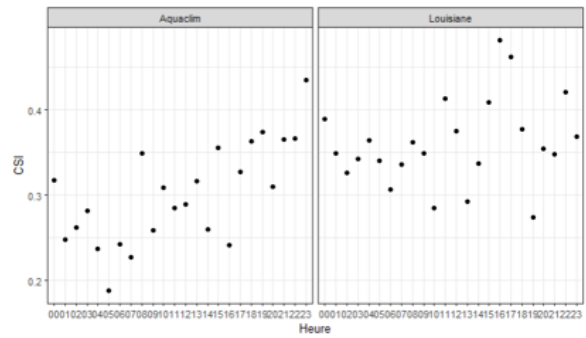
CLI à l'heure sur une journée où le THI moyen quotidien est inférieur à 65



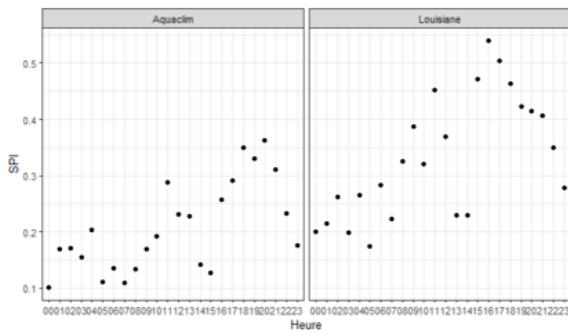
CSI à l'heure sur une journée où le THI moyen quotidien est supérieur à 70



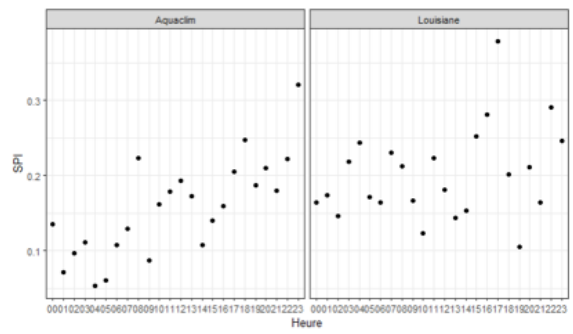
CSI à l'heure sur une journée où le THI moyen quotidien est inférieur à 65



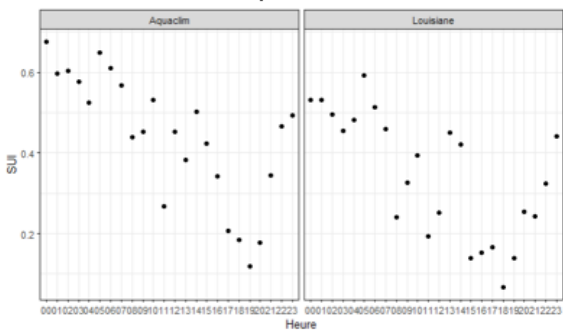
SPI à l'heure sur une journée où le THI moyen quotidien est supérieur à 70



SPI à l'heure sur une journée où le THI moyen quotidien est inférieur à 65



SUI à l'heure sur une journée où le THI moyen quotidien est supérieur à 70



SUI à l'heure sur une journée où le THI moyen quotidien est inférieur à 65

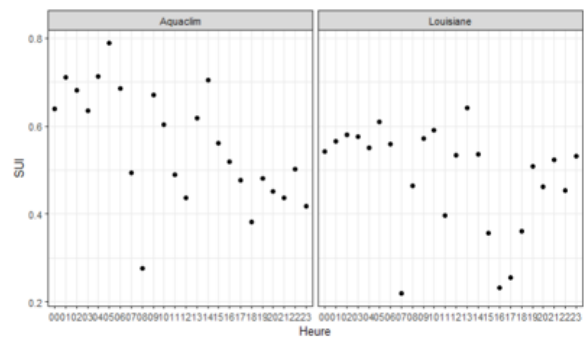


Figure 51 : Représentation des différents indices par type de matelas sur une journée où le THI est supérieur à 70 et une journée où le THI est inférieur à 65

b- Comparaisons de moyennes

Les résultats des tests de comparaison de moyennes sont récapitulés dans le *Tableau 37*.

Tableau 37 : Tests de comparaison de moyennes des indices sur l'ensemble de l'étude et les deux périodes chaudes

	Sur toute la période			Sur la période chaude de juillet			Sur la période chaude de septembre		
	Louisiane	Aquaclim	p-value	Louisiane	Aquaclim	p-value	Louisiane	Aquaclim	p-value
CCI	0,63	0,74	< 2,2e-16	0,57	0,69	1,76e-14	0,63	0,71	0,00026
CLI	0,3	0,38	< 2,2e-16	0,26	0,32	6,75e-06	0,26	0,34	0,0006
CSI	0,42	0,32	< 2,2e-16	0,48	0,40	1,18e-12	0,48	0,37	6,5e-06
SPI	0,27	0,17	< 2,2e-16	0,32	0,21	3,35e-15	0,27	0,21	0,00041
SUI	0,44	0,57	< 2,2e-16	0,38	0,48	1,44e-08	0,38	0,51	1,5e-05

Le CCI est plus élevé dans le lot Aquaclim – 0,11 point sur toute la période et 0,12 et 0,08 point sur les périodes chaudes de juillet et septembre -. Il y a donc un plus grand nombre de vaches couchées dans les logettes dans le lot Aquaclim et peut donc laisser penser que les matelas de logettes Aquaclim sont plus confortables. Cette tendance semble impactée par le THI, plus il est élevé, plus les vaches sont debout dans les logettes.

Le CLI est plus élevé dans le lot Aquaclim – 0,08 point sur toute la période et la période chaude de septembre et 0,06 point sur la période chaude de juillet -. Il y a donc plus de vaches couchées dans le lot Aquaclim qu'en Louisiane ; ce qui confirme les résultats obtenus avec les indices calculés précédemment. Il semblerait qu'il y ait un effet du THI sur le temps de couchage : un THI plus élevé diminuerait le temps de couchage.

Le CSI est plus élevé dans le lot Louisiane – 0,1 point sur toute la période et 0,08 et 0,09 point sur les périodes chaudes de juillet et de septembre -. Cela signifie qu'il y a plus de vaches debout dans le lot Louisiane qu'en Aquaclim. Ces résultats concordent avec ceux obtenus précédemment. Il semblerait qu'un THI élevé augmente le nombre d'animaux debout.

Le SPI est plus élevé dans le lot Louisiane - 0,1 point sur l'ensemble de la période, 0,09 et 0,06 point sur les périodes chaudes de juillet et septembre -. Il y a donc plus de vaches perchées dans les logettes dans le lot Louisiane. Les logettes du lot Aquaclim semblent plus confortables que celles du lot Louisiane. Ce phénomène s'accroît lorsque le THI est élevé.

Le SUI est plus élevé dans le lot Aquaclim – 0,13 point sur toute la période et la période chaude de septembre et de 0,12 sur la période chaude de juillet -. Cela signifie qu'il y a plus de vaches du lot Aquaclim qui, lorsqu'elles ne sont pas en train de manger, sont couchées dans les logettes. Il semblerait que lorsque le THI est plus élevé, le SUI soit plus faible.

Les CCI et SUI ne sont pas dans les normes de Cook et al. (2015). Cela peut s'expliquer par le fait que l'on moyenne ces indices sur une journée et que toutes les vaches ne vont pas à la traite en même temps.

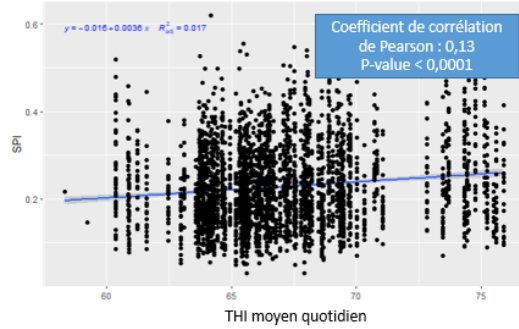
c- Modèle de régression bêta

Le modèle de régression bêta pour chacun des indices est présenté dans le *Tableau 38*.

Tableau 38 : Coefficient de corrélation entre l'indice et le THI et résultats du modèle

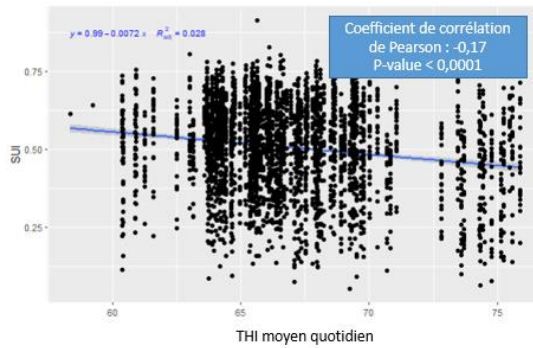
Indice	Corrélation entre l'indice et le THI	Résultats du modèle																			
CCI	<p>CCI</p> <p>THI moyen quotidien</p> <p>Coefficient de corrélation de Pearson : -0,12 P-value < 0,0001</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Paramètre</th> <th>Moyenne (min)</th> <th>SD</th> <th>p-value</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Intercept</td> <td>2,04</td> <td>0,17</td> <td><0,0001</td> </tr> <tr> <td>THI</td> <td>-0,023 (par point de THI)</td> <td>0,0025</td> <td>–</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Matelas</td> <td><i>Louisiane</i></td> <td>Ref.</td> <td>–</td> </tr> <tr> <td><i>Aquaclim</i></td> <td>0,5</td> <td>0,017 <0,0001</td> </tr> </tbody> </table>	Paramètre	Moyenne (min)	SD	p-value	Intercept	2,04	0,17	<0,0001	THI	-0,023 (par point de THI)	0,0025	–	Matelas	<i>Louisiane</i>	Ref.	–	<i>Aquaclim</i>	0,5	0,017 <0,0001
Paramètre	Moyenne (min)	SD	p-value																		
Intercept	2,04	0,17	<0,0001																		
THI	-0,023 (par point de THI)	0,0025	–																		
Matelas	<i>Louisiane</i>	Ref.	–																		
	<i>Aquaclim</i>	0,5	0,017 <0,0001																		
CLI	<p>CLI</p> <p>THI moyen quotidien</p> <p>Coefficient de corrélation de Pearson : -0,14 P-value < 0,0001</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Paramètre</th> <th>Moyenne (min)</th> <th>SD</th> <th>p-value</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Intercept</td> <td>0,94</td> <td>0,19</td> <td><0,0001</td> </tr> <tr> <td>THI</td> <td>-0,027 (par point de THI)</td> <td>0,0029</td> <td>–</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Matelas</td> <td><i>Louisiane</i></td> <td>Ref.</td> <td>–</td> </tr> <tr> <td><i>Aquaclim</i></td> <td>0,33</td> <td>0,019 <0,0001</td> </tr> </tbody> </table>	Paramètre	Moyenne (min)	SD	p-value	Intercept	0,94	0,19	<0,0001	THI	-0,027 (par point de THI)	0,0029	–	Matelas	<i>Louisiane</i>	Ref.	–	<i>Aquaclim</i>	0,33	0,019 <0,0001
Paramètre	Moyenne (min)	SD	p-value																		
Intercept	0,94	0,19	<0,0001																		
THI	-0,027 (par point de THI)	0,0029	–																		
Matelas	<i>Louisiane</i>	Ref.	–																		
	<i>Aquaclim</i>	0,33	0,019 <0,0001																		
CSI	<p>CSI</p> <p>THI moyen quotidien</p> <p>Coefficient de corrélation de Pearson : 0,26 P-value < 0,0001</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Paramètre</th> <th>Moyenne (min)</th> <th>SD</th> <th>p-value</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Intercept</td> <td>-2,44</td> <td>0,1</td> <td><0,0001</td> </tr> <tr> <td>THI</td> <td>0,03 (par point de THI)</td> <td>0,0016</td> <td>–</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Matelas</td> <td><i>Louisiane</i></td> <td>Ref.</td> <td>–</td> </tr> <tr> <td><i>Aquaclim</i></td> <td>-0,43</td> <td>0,01 <0,0001</td> </tr> </tbody> </table>	Paramètre	Moyenne (min)	SD	p-value	Intercept	-2,44	0,1	<0,0001	THI	0,03 (par point de THI)	0,0016	–	Matelas	<i>Louisiane</i>	Ref.	–	<i>Aquaclim</i>	-0,43	0,01 <0,0001
Paramètre	Moyenne (min)	SD	p-value																		
Intercept	-2,44	0,1	<0,0001																		
THI	0,03 (par point de THI)	0,0016	–																		
Matelas	<i>Louisiane</i>	Ref.	–																		
	<i>Aquaclim</i>	-0,43	0,01 <0,0001																		

SPI



Paramètre	Moyenne (min)	SD	p-value
Intercept	-2,5	0,16	<0,0001
THI	0,022 (par point de THI)	0,0024	–
Matelas	<i>Louisiane</i>	Ref.	–
	<i>Aquaclim</i>	-0,47	0,016 <0,0001

SUI



Paramètre	Moyenne (min)	SD	p-value
Intercept	1,97	0,18	<0,0001
THI	-0,033 (par point de THI)	0,0027	–
Matelas	<i>Louisiane</i>	Ref.	–
	<i>Aquaclim</i>	0,5	0,018 <0,0001

En conclusion, tous les indices de confort et d'utilisation des logettes sont peu influencés par le THI (coefficients de corrélation de Pearson compris entre -0,17 et 0,26, p-value < 0,0001).

De plus, dans le modèle de régression bêta, tous les indices ne dépendent que du THI et du type de matelas sur lesquels les vaches sont logées.

Le CCI diminue de 0,023 point par point de THI ambiant et le lot Aquaclim possède un CCI 0,5 point supérieur au lot Louisiane.

Le CLI diminue de 0,027 point par point de THI ambiant et le lot Aquaclim possède un CLI 0,33 point supérieur au lot Louisiane.

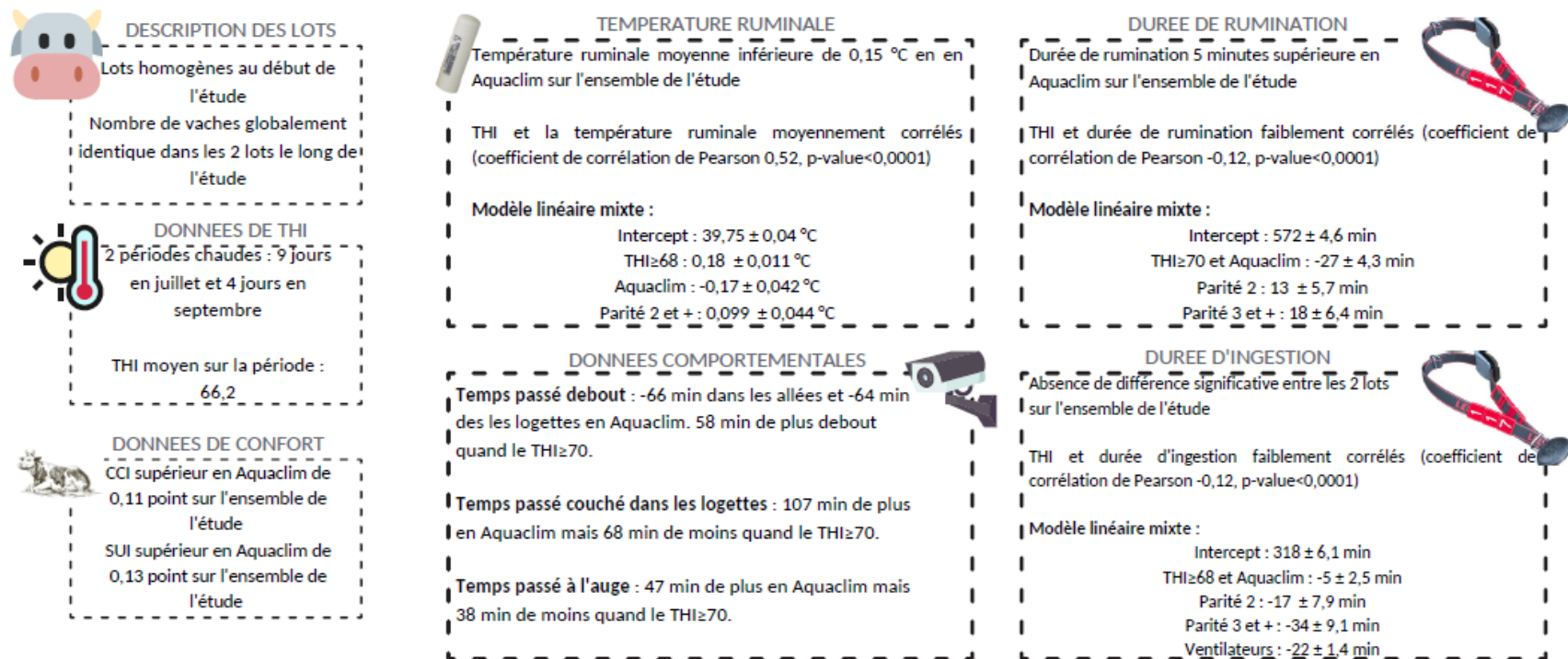
Le CSI augmente de 0,03 point par point de THI extérieur ambiant et diminue de 0,43 point pour le lot Aquaclim par rapport au lot Louisiane.

Le SPI augmente de 0,022 point par point de THI extérieur ambiant et diminue de 0,47 point pour le lot Aquaclim par rapport au lot Louisiane.

Enfin, le SUI diminue de 0,033 point par point de THI ambiant et est 0,5 point plus élevé dans le lot Aquaclim par rapport au lot Louisiane.

G- Conclusions concernant les résultats

Le schéma représenté sur la *Figure 52* récapitule les résultats obtenus lors de l'étude.



Effets des matelas à eau réfrigérée sur la température ruminale mais pas d'effets voire effets néfastes sur la durée d'ingestion et de rumination lors de stress thermique. Effets très positifs sur la durée de couchage et le temps passé debout. Discordance entre les données caméra et des colliers pour la durée d'ingestion. Matelas Aquaclim nettement plus confortables que les matelas Louisiane.

Figure 52 : Résumé des analyses estimant les effets d'un matelas de logettes à eau réfrigérée sur la température corporelle et le comportement de vaches laitières en période chaude

Partie 3- Discussion :

Mise en perspective et effets des matelas de logettes à eau réfrigérée sur la physiologie et le comportement des vaches laitières durant cette étude

I- Conditions environnementales

A- Faible THI sur l'ensemble de l'étude

Durant l'ensemble de l'étude, le THI était peu élevé. En effet, il était en moyenne de 66,2. En terme de répartition, 85 jours ont compté un THI moyen quotidien inférieur à 68 – c'est-à-dire inférieur au seuil de stress thermique –, 17 jours avec un THI compris entre 68 et 71 et 8 jours avec un THI compris entre 72 et 79. Or, il est admis que les bovins connaissent un stress thermique entre 68 et 74 points de THI (Herbut et al., 2018). Cela ne représente que 25 jours durant l'étude et de façon discontinue. Il semble que les vaches n'aient alors subies qu'un stress thermique modéré sur une courte période. Nous savons également que plus la durée du stress thermique est importante, plus les effets néfastes sont prolongés (Becker et al., 2020). L'idéal pour pallier cela serait de reproduire l'étude une année plus chaude avec des périodes avec un THI élevé plus longues – comme l'été 2022 -.

B- Choix du THI en tant que paramètre évaluant le stress thermique

Le THI est un indicateur de stress thermique qui dépend seulement de la température et de l'humidité relative. Il est important de prendre en compte la vitesse de l'air et les radiations solaires auxquelles sont soumis l'animal afin d'explicitier de façon plus précise le stress thermique qu'il ressent. Ainsi, le THI ajusté (THI_{adj}) prend en compte ces différents paramètres et s'écrit de la façon suivante (Équation 6) :

Équation 6 : Equation du THI ajusté selon Herbut et al. (2018)

$$THI_{adj} = 4,51 + THI - (1,922 \times V) + (0,0068 \times SR)$$

où V représente la vitesse de l'air en m/s et SR l'intensité des radiations solaires en W/m².

Cependant, dans notre étude, les vaches sont en bâtiment ce qui limite de façon considérable les radiations solaires auxquelles elles sont soumises. De plus, la vitesse de l'air n'est pas homogène dans le bâtiment, la mesurer nécessiterait de nombreux capteurs et ce matériel est coûteux.

II- Significativité des résultats obtenus

A- Concernant la température ruminale

Tout d'abord, les données de températures ruminales récoltées sont conformes à celles de la littérature, c'est-à-dire qu'elles se situent entre 38,5 et 41 °C (Ammer et al., 2016a; Ammer et al., 2016b; Bewley et al., 2008; Liang et al., 2013).

La différence de température ruminale obtenue entre les deux lots selon le modèle mixte linéaire (- 0,17 °C) est supérieure à la précision liée à l'appareil qui est de 0,1 °C. De plus, cette différence est inférieure aux données qui sont retrouvées dans la littérature. En effet, les différences de températures corporelles observées entre les vaches ayant accès à des moyens de rafraîchissement et d'autres n'y ayant pas accès se situent entre 0,2 °C et 1 °C (cf Partie 1, paragraphe IV). Perano et al. (2015) observent une différence d'un degré entre leur lot témoin (sans matelas à eau réfrigérée) et le lot avec matelas à eau réfrigérée à 4,5°C. Cela laisse à penser que les matelas permettent une diminution de la température ruminale mais plus faible qu'espéré. En effet, cela ne semble pas se répercuter sur la durée d'ingestion ou de rumination en période chaude. Il est possible que la température des matelas ne soit pas assez fraîche pour refroidir de façon optimale les animaux comme cela a pu être observé dans l'étude de Perano et al. (2015) avec de l'eau circulante à 4,5 °C. Il faut cependant garder à l'esprit que l'interaction entre le matelas et le THI n'est pas significative : lorsque le THI est élevé les matelas Aquaclim n'ont plus d'effet sur la température ruminale, contrairement à ce que l'on aurait pu s'attendre. Plusieurs causes sont envisageables :

- Il est possible que les matelas n'aient pas d'effets rémanents : lorsque la vache n'est plus couchée de dessus, la température ruminale augmente rapidement et se stabilise au niveau des vaches de l'autre lot
- La température ambiante n'est peut-être pas suffisante pour observer une différence plus importante de la température ruminale entre les deux lots
- La température de surface des matelas n'est peut-être pas suffisante pour observer une différence lorsque le THI est supérieur à 68.

En ce qui concerne l'augmentation de température ruminale en lien avec le THI (+ 0,18 °C) dans le modèle linéaire mixte, les résultats sont concordants avec la littérature. Ammer et al. (2016a) avaient également observé une augmentation de la température ruminale de l'ordre de 0,2 °C lorsque le THI dépassait 70 points.

Enfin, Bewley et al. (2008) observent également une augmentation de température ruminale en lien avec la parité (+ 0,18 °C pour les multipares). Dans notre étude cette augmentation est de 0,1 °C. Cela peut être lié au niveau de production laitière. En effet, une vache multipare produit plus de lait et donc ingère plus de matière sèche, ce qui provoque une augmentation de la température ruminale.

B- Concernant les durées d'ingestion et de rumination mesurées par les colliers Lely Qwes HR

La durée de rumination moyenne est supérieure à celles qui sont retrouvées dans la littérature de près de 50 minutes (Ji, Banhazi, Ghahramani, et al., 2020; Müschner-Siemens et al., 2020). De plus, la durée d'ingestion moyenne est également supérieure de 30 à 50 minutes par rapport à la littérature (Gomez & Cook, 2010; White et al., 2017). Cela peut s'expliquer par le fait qu'ils aient une proportion plus importante de primipares dans leurs échantillons, une ration différente ou un niveau de production laitière moins important. Aussi, dans notre étude, la ration est repoussée toutes les deux heures favorisant l'ingestion et la rumination (Dulphy et al., 1987). Les méthodes utilisées pour mesurer ces durées étant différentes, il n'est pas possible d'exclure un biais lié à l'appareil de mesure.

Dans les modèles linéaires mixtes de notre étude, les multipares consomment moins longtemps (17 minutes pour les vaches de parité 2 et 34 minutes pour les vaches de parité 3 et plus) et ruminent plus que les primipares (13 minutes pour les vaches de parité 2 et 18 minutes pour les vaches de parité 3 et plus). Dans la littérature, il est rapporté que les multipares ruminent 50 minutes de plus que les primipares, ce qui est supérieur à ce que nous observons (Beauchemin, 2018; Cocco et al., 2021). De plus, bien que les multipares passent 15 minutes de plus à ingérer que les primipares selon Bach et al. (2015), il est possible qu'il y ait de la compétition pour l'aliment dans le bâtiment de l'étude et, que les multipares ayant une meilleure capacité d'ingestion, mangent moins longtemps mais autant en terme de quantité que les primipares (Beauchemin, 2018).

Concernant le nombre de jours en lait, les données sont cohérentes avec celles obtenues par Braun et al. (2017). En effet, les vaches avec un stade de lactation inférieur à 50 jours mangent moins et ruminent moins que celles avec 50 jours en lait et plus.

En outre, les résultats des modèles linéaires mixtes des durées d'ingestion et rumination concernant l'interaction entre le type de matelas et le THI sont contrintuitifs par rapport aux hypothèses formulées. Il était supposé que lors de stress thermique, les vaches du lot Aquaclim aient une meilleure durée d'ingestion et de rumination que les vaches du lot Louisiane. Cependant, elles ingèrent 5 minutes de moins et ruminent 27 minutes de moins. Le matelas ne semble donc pas assez efficace pour contrebalancer les effets du stress thermique. Aucune explication n'est trouvée dans la littérature concernant ces différences. Les études ayant utilisées de tels matelas n'ont pas trouvé de différence de durée de rumination entre le lot témoin et le lot avec matelas (Drwencke et al., 2020), mais ont trouvé une augmentation de la durée d'ingestion par rapport au lot témoin (Perano et al., 2015). En revanche, cela n'a que très peu d'impact sur la production laitière. Selon Lucas Bouglé (2022), les vaches du lot Aquaclim ne produisent que 0,05 kg/vache/jour de moins que les vaches du lot Louisiane lorsque le THI est élevé.

Il est possible que les résultats soient biaisés par la méthode de recueil des données. En effet, aucune donnée n'est fournie par LELY® en ce qui concerne les incertitudes de mesure sur les données d'ingestion et de rumination. De plus, selon Stygar et al. (2021), les colliers Qwes HR sont peu performants pour mesurer les données d'ingestion et de rumination. De plus, Elischer et al. (2013) trouvent une corrélation très modérée (coefficient de Pearson de 0,65, p-value < 0,0001) entre la durée de rumination déterminée par un observateur et celle mesurée par le collier.

En outre, aucune publication, à ma connaissance, ne compare la durée d'ingestion observée et mesurée par un collier. La durée d'ingestion étant mesurée lorsque la vache se trouve tête en bas, celle-ci est peu précise. En effet, la vache peut mettre la tête en bas dans d'autres circonstances que lorsqu'elle mange et notamment dans les logettes qui sont équipées de grattoirs pour l'encolure au niveau de la barre au garrot, comme c'est le cas dans les deux groupes de l'étude (Figure 53).



Figure 53 : Logettes du bâtiment de l'étude, les grattoirs pour l'encolure sont entourés en jaune

C- Concernant les données comportementales

Toutes les hypothèses émises sont confirmées par les résultats des données comportementales obtenues.

Les vaches du lot Aquaclim passent environ 9,16 h couchées par jour et celles du lot Louisiane 7,5 h. C'est inférieur aux données de la littérature pour des vaches en stabulation libre : 9,34 h par temps chaud (Endres & Barberg, 2007), 10,04 h par temps chaud (Lovarelli et al., 2020a) et 10,6 h toute l'année (Lovarelli et al., 2020b). Il est possible d'écarter une cause de surpopulation dans le bâtiment : celui-ci compte 60 logettes et, excepté quelques jours en Louisiane, cette limite n'a pas été dépassée. En revanche, Fregonesi et al. (2004) ont montré que les vaches ayant à disposition un revêtement en caoutchouc devant la table d'alimentation – ce qui est le cas dans l'exploitation étudiée - y passent plus de temps et passent donc moins de temps couchées, cela pourrait expliquer la différence faite de durée de couchage avec les autres études. D'autres explications à l'augmentation de la durée passée debout sont envisageables comme la présence boiterie (dermatite digitale), celle de mammites ou encore la repousse régulière de l'aliment.

Dans cette étude, le temps passé couché dans les logettes est inférieur lorsque les vaches sont en situation de stress thermique (- 68 minutes) ce qui représente 15 % de moins par rapport à un THI plus faible. C'est très inférieur aux 30 % rapportés par Becker et al. (2020). Cela peut s'expliquer par le fait que le THI sur l'ensemble de l'étude ne soit pas très élevé. De plus, les vaches avec les matelas à eau sont 107 minutes de plus couchées que les vaches sans. Cela est plutôt étonnant. En effet, Cook (2018) rapporte que le temps de couchage est en général plus faible avec des matelas à eau par rapport à des matelas classiques. Enfin, l'interaction entre le type de matelas et le THI n'est pas significative. Il n'y a donc pas d'impact du type de matelas sur le comportement de couchage des vaches lorsqu'elles sont en stress thermique. Cette observation a été faite par Drwencke et al. (2020) et Ortiz et al. (2015) qui n'ont pas eu de différence de durée de couchage entre leurs différents lots contenant des matelas à eau lors de stress thermique. Cela peut s'expliquer par le fait que les matelas de logettes Aquaclim soient plus confortables que les matelas Louisiane.

Le temps passé debout dans les allées est inférieur de 58 minutes lorsque le THI augmente, cela correspond à 23 % de moins par rapport à un THI inférieur à 70 point. C'est inférieur à ce qui est indiqué dans la littérature. En effet, il est rapporté que les vaches passent 30 % de plus de temps debout lors de stress thermique afin d'évacuer l'excédent de chaleur (Becker et al., 2020). Le temps passé debout est également influencé par le type de matelas à disposition des animaux. Les vaches passent 66 minutes de moins debout dans les allées et 64 minutes de moins debout dans les logettes en Aquaclim. Cela correspond à la durée de couchage supplémentaire par rapport au lot Louisiane. Cependant, l'interaction entre le type de matelas et le THI n'était pas significative, il n'y a donc pas particulièrement d'impact des matelas à eau réfrigérée sur le temps passé debout lors de stress thermique.

Le temps passé à l'auge est ici conforme à celui retrouvé par Gomez et Cook (2010) qui utilisent également des caméras (264 minutes dans notre étude et 258 minutes pour Gomez et Cook).

Cette durée diminue lorsque le THI augmente (- 38 minutes). Ceci correspond aux données de la littérature : la durée d'ingestion peut diminuer jusqu'à 92 minutes lorsque le THI est supérieur à 72 (Hut et al., 2022). En revanche, en ce qui concerne le type de matelas utilisé, les données sont en contradiction avec celles obtenues grâce aux colliers. Selon les données des caméras, les vaches ingèrent 47 minutes de plus dans le lot Aquaclim. Il est possible d'écarter une cause de surpopulation dans le lot Louisiane : il y a le même nombre de place à l'auge dans les deux lots pour quasiment le même nombre d'individus durant l'ensemble de l'étude. Cependant, être la tête à l'auge ne signifie pas que la vache mange – elle peut également ruminer par exemple.

De plus, le temps passé à l'abreuvoir est corrélé avec le THI. Les vaches passent 20 minutes de plus à l'abreuvoir lorsque le THI est supérieur à 70. D'autres études comme Cook et al. (2007) rapportent une augmentation de cette durée de 18 minutes. Les vaches du lot Aquaclim boivent 5 minutes de moins que celles du lot Louisiane. Cela peut être dû au fait qu'elles aient une température corporelle inférieure donc de moindres besoins en eau. En revanche, il ne faut pas conclure de façon trop hâtive : le fait d'être au niveau de l'abreuvoir ne signifie pas que la vache est en train de boire. Un compteur volumétrique à chaque abreuvoir aurait été intéressant pour déterminer en parallèle la quantité d'eau bue.

Concernant le temps passé à la traite, l'interaction entre le type de matelas et le THI indique de façon significative que les vaches du lot Aquaclim passent plus de temps à la traite (2,4 minutes) que celles du lot Louisiane lorsque le THI est supérieur à 70. Cependant, Lucas Bouglé (2022) a démontré que les vaches du lot Aquaclim produisaient à 0,05 kg/vache/j/point de THI de lait de moins que celles du lot Louisiane. Ce temps est relativement minime et il est difficile de corrélérer directement la durée de passage au robot avec la production laitière.

Il est complexe d'évaluer l'erreur de mesure liée aux caméras. Cependant, il est possible que les budget-temps soient sous-évalués du fait de la « perte » d'une proportion de vaches la nuit bien que les données avec peu de vaches aient été retirées. De plus, les budgets-temps ne sont qu'une évaluation à partir d'un nombre de vaches et ne sont pas directement mesurés par la caméra au niveau individuel. Ainsi, une reconnaissance de chaque animal par les caméras permettrait de façon plus précise une évaluation des budget-temps.

Finalement, seules les données comportementales associées au confort des matelas à eau réfrigérée vont dans le sens des hypothèses formulées (Figure 54). Il est possible que les matelas Aquaclim soient plus confortables que les matelas Louisiane mais pas assez efficaces pour rafraichir de manière efficace les animaux. Cette hypothèse sera développée dans la partie IV.C.

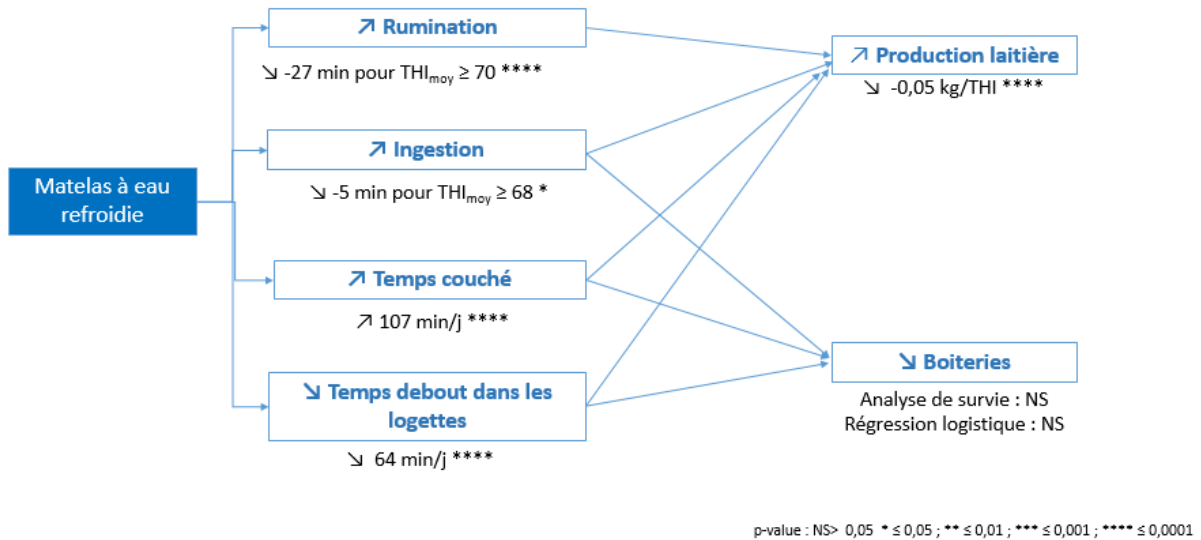


Figure 54 : Hypothèses formulées au début de l'étude et résultats effectivement obtenus

III- Contraintes liées au bâtiment

A- Homogénéité au sein du bâtiment

Un audit bâtiment a été réalisé le 10/01/2022. Des mesures de la vitesse de l'air dans le bâtiment ont été prises à l'aide d'un anémomètre alors que les ventilateurs n'avaient pas encore été mis en marche. Elles sont présentées dans la Figure 55. On observe une vitesse d'air beaucoup plus importante du côté Louisiane. L'éleveur rapporte cette même sensation l'été associée à des radiations solaires plus importantes dans le lot Aquaclim. De plus, un fumigène a été allumé et indique une bonne circulation de l'air dans le bâtiment avec un effet cheminée opérationnel.

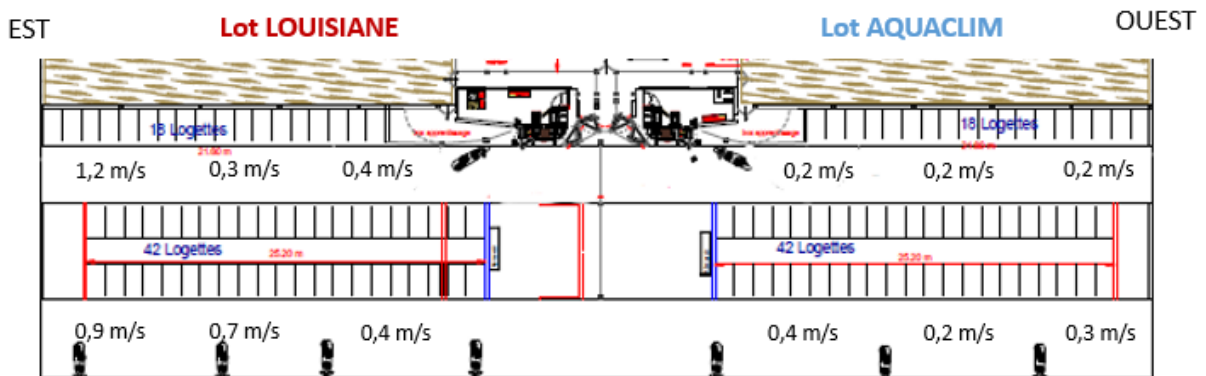


Figure 55 : Vitesse des courants d'air du bâtiment mesurées lors de l'audit bâtiment du 10/01/2022

Cela confère un désavantage du lot Aquaclim vis-à-vis du lot Louisiane et tend à minimiser les effets des matelas à eau réfrigérée.

En revanche, bien que les conditions environnementales ne soient pas tout à fait identiques dans les deux lots, en ce qui concerne les données de physiologie et de comportement, l'élevage choisi est adapté : peu de fermes commerciales peuvent fournir 120 vaches de moins de 150 jours en lait sur 4 mois en formant deux lots distincts dans le même bâtiment. De plus, la présence du robot de traite a largement facilité la récolte des données.

B- Mise en route des ventilateurs

La mise en route des ventilateurs le 19/08/2021 de façon continue jusqu'à la fin de l'étude a perturbé les interprétations des résultats. En effet, à partir de cette date, il est difficile de déterminer l'effet réel des matelas de celui des ventilateurs. Bien qu'une variable mise en route des ventilateurs ait été incorporée aux modèles, les résultats des modèles linéaires mixtes sont tous contre-intuitifs par rapport aux effets des ventilateurs. Les vaches ingèrent 22 minutes de moins lorsque les ventilateurs sont allumés et boivent 5 minutes de plus ; pour les autres variables à expliquer, la mise en place des ventilateurs n'était pas significative. Pourtant, le THI moyen avant et après le 19/08 était autour de 66, les effets de la mise en route des ventilateurs ne sont donc pas masqués par un THI plus élevé. Il aurait été intéressant de vérifier que l'effet des ventilateurs ne soit pas particulièrement présent au niveau des abreuvoirs. Cela expliquerait qu'elles y restent plus longtemps sans pour autant s'y abreuver.

Cependant, l'avantage des ventilateurs est d'homogénéiser l'environnement du bâtiment. Les différences de courant d'air au sein du bâtiment pourraient être partiellement corrigées grâce à l'allumage des ventilateurs. De ce fait, si l'expérience devait être reconduite, l'idéal serait de démarrer les ventilateurs dès le début de la phase expérimentale afin d'homogénéiser les conditions sur l'ensemble de l'étude et dans le bâtiment.

IV- Matelas de logettes à eau réfrigérée

A- Dimension des logettes

Lors de l'audit bâtiment du 10/01/2022, les logettes ont été mesurées afin de vérifier que les logettes sont adaptées aux vaches présentes dans le bâtiment. Les logettes des deux lots font les mêmes dimensions. La démarche utilisée pour évaluer la dimension des logettes est celle du CIGR (2015). Pour cela, il faut mesurer 10 % de l'effectif total correspondant aux plus grandes vaches du bâtiment. Les mesures effectuées sur les vaches sont les suivantes (*Figure 56*) :

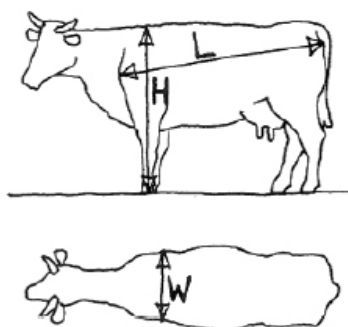


Figure 56 : Mesure des vaches selon le CIGR (2015)

où W correspond à la largeur aux épaules, H à la taille au garrot, et L à la longueur en diagonale du corps (pointe de l'épaule à la pointe de la fesse).

La moyenne des dix plus grandes vaches du bâtiment est représentée dans le *Tableau 39*.

Tableau 39 : Dimensions moyennes des dix plus grandes vaches du bâtiment

H (cm)	L (cm)	W (cm)
150,7	163,4	52,4

Les logettes sont ensuite mesurées selon les paramètres suivants (*Figure 57*) :



Figure 57 : Paramètres utilisé pour mesurer les logettes selon le CIGR (2015)

où CW correspond à la largeur des logettes (distance entre deux séparations), CRL la longueur de la zone de couchage, HLS (si absence de partage d'un espace commun)/HS (si partage d'un espace commun) l'espace libre pour la tête et l'allongement, CL la longueur de la logette qui diffère en fonction du partage d'un espace libre commun avec la logette en face (CL libre) ou si la vache est face à un mur (CL mur), NRH la hauteur de la barre au garrot et NRD la distance diagonale de la barre au garrot avec la bordure.

Les mesures des logettes et les valeurs théoriques des différents critères sont récapitulés dans le *Tableau 40*.

Tableau 40 : Formules de calcul, mesures théoriques et mesures réelles des logettes de l'exploitation de l'étude

Paramètre	CW	CRL	HLS	HS	CLibre	CLmur	NRH	NRD
Formule	$0,83 \times H$	$1,06 \times L$	$0,65 \times H$	$0,48 \times H$	$CRL + HS$	$CRL + HLS$	$0,9 \times H$	$CRL + 10$
Mesure théorique	125,081	173,204	97,955	72,336	245,54	271,159	135,63	183,204
Mesure réelle	110	170	100	77,5	247,5	270	120	220

Il ressort que les logettes ne sont pas assez larges et la barre au garrot est trop basse. Ceci peut aider à expliquer le fait que la durée de couchage soit inférieure par rapport à d'autres élevages.

B- Confort des matelas

Les indices de confort du bâtiment et des logettes indiquent que les matelas du lot Aquaclim sont plus confortables que ceux en Louisiane. Il est difficile de comparer ces indices à ceux de la littérature car aucun auteur à ma connaissance n'a travaillé en robot de traite. En effet, la majorité des indices sont présentés une heure après la traite du matin. Cependant, certains auteurs comme Krawczel et al. (2008) suggèrent de calculer ces indices la nuit – entre minuit et 4 h – au moment du pic de couchage des vaches permettant dans notre cas d'avoir des données comparables.

Le *Tableau 41* est obtenu après calcul des CCI et SUI entre minuit et 4 h sur l'ensemble de la période de l'étude.

Tableau 41 : Calcul des CCI et SUI moyens entre minuit et 4 h dans les deux lots sur l'ensemble de l'étude

	Aquaclim	Louisiane
CCI	0,81	0,73
SUI	0,64	0,54

Le confort des matelas Aquaclim est comparable au sable – qui est un matériau très confortable pour les vaches – avec un CCI supérieur à 0,8 (Cook et al., 2005). Les matelas Louisiane ont un confort « classique » de matelas en caoutchouc CCI autour de 0,75 (Cook et al., 2005). En revanche, les SUI sont inférieurs de 0,1 point à ceux de la littérature (Ito et al., 2009; Krawczel et al., 2008). Ceci peut s'expliquer par le fait que ces études n'ont pas été réalisées en été où les vaches ont tendance à être moins couchées. Par contre, les vaches du lot Aquaclim ont un SUI quasiment identique à celui des vaches ayant une ventilation naturelle l'été dans l'étude de Lobeck et al. (2011). Les matelas à eau réfrigérée ont peut-être une meilleure efficacité la nuit.

Il est donc possible de conclure sur le fait que les matelas Aquaclim ont un confort supérieur aux matelas Louisiane et aux matelas de logette en général. Les matelas Louisiane présentent également un bon confort. Afin de s'affranchir de cet effet confort des matelas à eau réfrigérée, il aurait été intéressant que le lot témoin dispose de matelas à eau sans circuit de réfrigération.

C- Système de refroidissement

La température de l'eau circulant dans les matelas Aquaclim dépend du point de rosée. Selon le fabricant, elle se situe aux alentours de 14 °C. Des mesures infrarouges ont été réalisées par l'entreprise dans une exploitation équipée des matelas le 19/06/2019 où le THI était égal à 85 points, la température de surface des matelas était de 23 °C. De plus, Gebremedhin et al. (2016) ont mesuré la température de surface de matelas équivalents à ceux utilisés dans l'étude à l'aide de thermocouples. Leurs résultats sont présentés dans la *Figure 58* et sont cohérents avec les observations faites par l'entreprise BioretAgri®.

Température de l'eau circulante (°C)	Température de surface des matelas (°C)
4.6	19.91
6.9	20.09
10.8	20.98
12.7	23.04
14.5	26.02

Figure 58 : Résultats obtenus par Gebremedhin et al. (2015) entre la température de l'eau circulant dans le matelas et leur température de surface

En outre, dans l'étude de Perano et al. (2015) menée avec des matelas semblables, de meilleurs résultats ont été obtenus avec une eau circulante à 4,5 °C par rapport à une eau à 10 °C. Une meilleure efficacité des matelas Aquaclim pourrait alors être observée si l'eau circulante était plus fraîche. Cependant, une différence de température trop importante entre l'eau circulant et le milieu extérieur favorise le dépôt de rosée et humidifie le matelas malgré le substrat. Cette humidification augmente le risque d'apparition des mammites.

Les matelas sont situés en série. Bien que le matelas suivant ne reçoive pas l'eau réchauffée par le précédent, elle a tout de même le temps de se réchauffer entre le premier et le dernier matelas, réduisant son efficacité. D'après le constructeur, cette différence de température entre l'entrée et la sortie d'eau fraîche serait relativement faible.

Enfin, la pompe à chaleur des matelas a cessé de fonctionner entre le 26/07/2021 et le 02/08/2022. Cela s'est produit après la période chaude du mois de juillet. Les animaux ont pu bénéficier du refroidissement produit par les matelas durant cette période.

Conclusion

Cette étude pilote a permis de montrer un effet bénéfique de l'équipement de logettes avec un matelas à eau réfrigérée par rapport à un matelas en caoutchouc sur la physiologie et le comportement des vaches laitières hautes productrices en début de lactation, mais cela semble plus être lié à une amélioration du confort des logettes qu'à une diminution du stress thermique. En effet, les matelas sont à l'origine d'une diminution de la température ruminale, d'une augmentation de la durée de rumination, d'une meilleure durée de couchage et donc de moins de temps passé debout sans qu'une interaction entre le THI et le type de matelas ne ressorte en faveur des matelas à eau réfrigérée. En revanche, ils présentent un confort important favorisant le comportement de couchage des vaches dans la stabulation et donc améliore le bien-être de ces animaux.

Cette étude est à ma connaissance le premier essai randomisé en condition de terrain concernant l'efficacité de matelas de logette à eau réfrigérée. Elle présente certaines limites – faible THI, mise en route des ventilateurs après plusieurs semaines d'essai, arrêt de la pompe à chaleur des matelas, réalisation dans une seule exploitation, etc. -. Il serait intéressant de reconduire l'étude durant une période plus chaude, en fixant clairement les conditions expérimentales et en comparant le dispositif à des matelas à eau ayant les mêmes caractéristiques que les matelas Aquaclim sans circuit d'eau réfrigéré afin de s'affranchir de l'effet confort démontré durant l'étude.

Ce système semble prometteur du fait de son confort et du bien-être apporté aux animaux. Les effets de ce nouveau matelas, observés dans cette étude, notamment l'augmentation du temps passé couché, la diminution du temps passé debout dans les logettes et dans les allées et la possible augmentation du temps d'ingestion semblent prometteurs pour limiter certains effets du stress thermique tel qu'une augmentation de l'incidence des boiteries liées à des lésions de la corne ou une diminution de la production laitière. Des études supplémentaires restent cependant nécessaires pour le démontrer.

Bibliographie

- Abeni, F., & Galli, A. (2017). Monitoring cow activity and rumination time for an early detection of heat stress in dairy cow. *International Journal of Biometeorology*, *61*(3), 417–425. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1222-z>
- Adams, A. E., Olea-Popelka, F. J., & Roman-Muniz, I. N. (2013). Using temperature-sensing reticular boluses to aid in the detection of production diseases in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, *96*(3), 1549–1555. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5822>
- Aggarwal, A. & Upadhyay, R. (2013). Heat stress and Hormones. In: *Heat Stress and Animal Productivity* (p 27-53). New Delhi, Inde: Springer.
- Aikman, P. C., Reynolds, C. K., & Beever, D. E. (2011). Diet digestibility, rate of passage, and eating and rumination behavior of Jersey and Holstein cows. *Journal of Dairy Science*, *91*(3), 1103–1114. <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0724>
- Allen, J. D., Hall, L. W., Collier, R. J., & Smith, J. F. (2015). Effect of core body temperature, time of day, and climate conditions on behavioral patterns of lactating dairy cows experiencing mild to moderate heat stress. *Journal of Dairy Science*, *98*(1), 118–127. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7704>
- Alzahal, O., Kebreab, E., France, J., Froetschel, M., & McBride, B. W. (2008). Ruminant temperature may aid in the detection of subacute ruminal acidosis. *Journal of Dairy Science*, *91*(1), 202–207. <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0535>
- Ambriz-Vilchis, V., Jessop, N. S., Fawcett, R. H., Shaw, D. J., & Macrae, A. I. (2015). Comparison of rumination activity measured using rumination collars against direct visual observations and analysis of video recordings of dairy cows in commercial farm environments. *Journal of Dairy Science*, *98*(3), 1750–1758. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8565>
- Ammer, S., Lambertz, C., & Gauly, M. (2016a). Is reticular temperature a useful indicator of heat stress in dairy cattle? *Journal of Dairy Science*, *99*(12), 10067–10076. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11282>
- Ammer, S., Lambertz, C., & Gauly, M. (2016b). Comparison of different measuring methods for body temperature in lactating cows under different climatic conditions. *Journal of Dairy Research*, *83*(2), 165–172. <https://doi.org/10.1017/S0022029916000182>
- Anderson, S. D., Bradford, B. J., Harner, J. P., Tucker, C. B., Choi, C. Y., Allen, J. D., Hall, L. W., Rungruang, S., Collier, R. J., & Smith, J. F. (2013). Effects of adjustable and stationary fans with misters on core body temperature and lying behavior of lactating dairy cows in a semiarid climate. *Journal of Dairy Science*, *96*(7), 4738–4750. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-6401>
- Aquaclim, confort et santé des vaches. (26/05/2020). *L'Avenir Agricole*. Retrieved July 5, 2022, from <https://www.aveniragricole.fr/actualite/article/aquaclim-confort-et-sante-des-vaches>
- Armstrong, D. V. (1994). Heat Stress Interaction with Shade and Cooling. *Journal of Dairy Science*, *77*(7), 2044–2050. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(94\)77149-6](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(94)77149-6)

- Atkins, I. K., Cook, N. B., Mondaca, M. R., & Choi, C. Y. (2018). Continuous respiration rate measurement of heat-stressed dairy cows and relation to environment, body temperature and lying time. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 61(5), 1475–1485. <https://doi.org/10.13031/trans.12451>
- Bach, A., Dinarès, M., Devant, M., & Carré, X. (2017). Associations between lameness and production, feeding and milking attendance of Holstein cows milked with an automatic milking system. *Journal of Dairy Research*, September 2006, 40–46. <https://doi.org/10.1017/S0022029906002184>
- Bareille, N., Beaudreau, F., Billon, S., Robert, A., & Faverdin, P. (2003). Effects of health disorders on feed intake and milk production in dairy cows. *Livestock Production Science*, 83, 53–62. doi:10.1016 /S0301-6226(03)00040
- Bastian, K. R., Gebrerredhin, K. G., & Scott, N. R. (2003). A finite difference model to determine conduction heat loss to a water-filled mattress for dairy cows. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 46(3), 773–780. <https://doi.org/10.13031/2013.13592>
- Baumgard, L. H., Abuajamieh, M. K., Stoakes, S. K., Sanz-Fernandez, M. V, Johnson, J. S., & Rhoads, R. P. (2014). Feeding and Managing Cows to Minimize Heat Stress. *Tri-State Dairy Nutrition Conference*, 515, 61–74.
- Beauchemin, K. A. (2018). Invited review: Current perspectives on eating and rumination activity in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 101(6), 4762–4784. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13706>
- Becker, C. A., Collier, R. J., & Stone, A. E. (2020). Invited review: Physiological and behavioral effects of heat stress in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 103(8), 6751–6770. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17929>
- Berman, A. (2011). Invited review: Are adaptations present to support dairy cattle productivity in warm climates? *Journal of Dairy Science*, 94(5), 2147–2158. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-3962>
- Berman, A. (2008). Increasing heat stress relief produced by coupled coat wetting and forced ventilation. *Journal of Dairy Science*, 91(12), 4571–4578. <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1175>
- Berman, A. (2005). Estimates of heat stress relief needs for Holstein dairy cows. *Journal of Animal Science*, 83(6), 1377–1384. <https://doi.org/10.2527/2005.8361377x>
- Berman, A., Folman, Y., Kaim, M., Mamen, M., Herz, Z., Wolfenson, D., Arieli, A., & Graber, Y. (1985). Upper Critical Temperatures and Forced Ventilation Effects for High-Yielding Dairy Cows in a Subtropical Climate. *Journal of Dairy Science*, 68(6), 1488–1495. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(85\)80987-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(85)80987-5)
- Bernabucci, U., Biffani, S., Buggiotti, L., Vitali, A., Lacetera, N., & Nardone, A. (2014). The effects of heat stress in Italian Holstein dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 97(1), 471–486. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-6611>
- Bernabucci, U., Lacetera, N., Baumgard, L. H., Rhoads, R. P., Ronchi, B., & Nardone, A. (2010). Metabolic and hormonal acclimation to heat stress in domesticated ruminants. *Animal*, 4(7), 1167–1183. <https://doi.org/10.1017/S175173111000090X>

- Bewley, J. M., Grott, M. W., Einstein, M. E., & Schutz, M. M. (2008). Impact of intake water temperatures on reticular temperatures of lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, *91*(10), 3880–3887. <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1159>
- Bewley, J. M., Einstein, M. E., Grott, M. W., & Schutz, M. M. (2008). Comparison of reticular and rectal core body temperatures in lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, *91*(12), 4661–4672. <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0835>
- Bonnefoy J.M., & Noordhuizen J. (2011). Maîtriser le stress thermique chez la vache laitière. *Bulletin Des Groupements Techniques Vétérinaires*, *60*(1), 77–86.
- Bouglé, Lucas. *Rafraîchissement des vaches en période chaude à l'aide de matelas de logette à eau refroidie : effets sur l'incidence des boiteries et la production laitière de vaches laitières hautes productrices*. Thèse d'exercice, Médecine vétérinaire, ONIRIS-Nantes, 2022.
- Braun, U., Buchli, H., & Hässig, M. (2017). Eating and rumination activities two weeks prepartum to one month postpartum in 100 healthy cows and cows with peripartum diseases. *Schweizer Archiv für Tierheilkunde*, *159*(10):535-544. DOI: <https://doi.org/10.17236/sat00130>
- Burnett, T. A., Kaur, M., Polsky, L., & Cerri, R. L. A. (2020). Rumen-Reticular Temperature During Estrus and Ovulation Using Automated Activity Monitors in Dairy Cows. *Frontiers in Veterinary Science*, *7*(December), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.597512>
- Calegari, F., Calamari, L., & Frazzi, E. (2014). Fan cooling of the resting area in a free stalls dairy barn. *International Journal of Biometeorology*, *58*(6), 1225–1236. <https://doi.org/10.1007/s00484-013-0716-1>
- Cardot, V., Le Roux, Y., & Jurjanz, S. (2008). Drinking behavior of lactating dairy cows and prediction of their water intake. *Journal of Dairy Science*, *91*(6), 2257–2264. <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0204>
- Charles, Sandrine. *La thermorégulation chez les mammifères domestiques*. Thèse d'exercice, Médecine vétérinaire, Ecole Nationale Vétérinaire de Nantes – ENVN, 2010, 246p.
- Chen, J. M., Schütz, K. E., & Tucker, C. B. (2015). Cooling cows efficiently with sprinklers: Physiological responses to water spray. *Journal of Dairy Science*, *98*(10), 6925–6938. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-9434>
- Chen, J. M., Schütz, K. E., & Tucker, C. B. (2016). Cooling cows efficiently with water spray: Behavioral, physiological, and production responses to sprinklers at the feed bunk. *Journal of Dairy Science*, *99*(6), 4607–4618. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10714>
- Cocco, R., Eug, M., & Fischer, V. (2021). Rumination time as an early predictor of metritis and subclinical ketosis in dairy cows at the beginning of lactation : Systematic review-meta-analysis. *Preventive Veterinary Medicine*, *189*(February). <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2021.105309>
- Collier, R. J., Eley, R. M., Sharma, A. K., Pereira, R. M., & Buffington, D. E. (1981). Shade Management in Subtropical Environment for Milk Yield and Composition in Holstein and Jersey Cows. *Journal of Dairy Science*, *64*(5), 844–849. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(81\)82656-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(81)82656-2)

- Collier, R. J., Baumgard, L. H., Zimbelman, R. B., & Xiao, Y. (2019). Heat stress: Physiology of acclimation and adaptation. *Animal Frontiers*, 9(1), 12–19. <https://doi.org/10.1093/af/vfy031>
- Commission Internationale du Génie Rural (CIGR)(2015). La conception du logement de la vache laitière et de la génisse de renouvellement. In : *Recommandations internationales pour le logement de la vache laitière et de la génisse de remplacement* (Deuxième section, 78p). Editions Wallonie.
- Conte, G., Ciampolini, R., Cassandro, M., Lasagna, E., Calamari, L., Bernabucci, U., & Abeni, F. (2018). Feeding and nutrition management of heat-stressed dairy ruminants. *Italian Journal of Animal Science*, 17(3), 604–620. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2017.1404944>
- Cook, N. B., Bennett, T. B., & Nordlund, K. V. (2005). Monitoring indices of cow comfort in free-stall-housed dairy herds. *Journal of Dairy Science*, 88(11), 3876–3885. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(05\)73073-3](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)73073-3)
- Cook, N. B., Mentink, R. L., Bennett, T. B., & Burgi, K. (2007). The effect of heat stress and lameness on time budgets of lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 90(4), 1674–1682. <https://doi.org/10.3168/jds.2006-634>
- Deming, J. A., Bergeron, R., Leslie, K. E., & DeVries, T. J. (2013). Associations of cow-level factors, frequency of feed delivery, and standing and lying behaviour of dairy cows milked in an automatic system. *Canadian Journal of Animal Science*, 93(4), 427–433. <https://doi.org/10.4141/CJAS2013-055>
- Drwencke, A. M., Tresoldi, G., Stevens, M. M., Narayanan, V., Carrazco, A. V., Mitloehner, F. M., Pistochini, T. E., & Tucker, C. B. (2020). Innovative cooling strategies: Dairy cow responses and water and energy use. *Journal of Dairy Science*, 103(6), 5440–5454. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17351>
- Dulphy, J., Faverdin, P., Dulphy, J., & Faverdin, P. (1987). L'ingestion alimentaire chez les ruminants : modalités et phénomènes associés. *Reproduction Nutrition Développement*, 27 (1B), pp.129-155. hal-00898577
- Elischer, M. F., Arceo, M. E., Karcher, E. L., & Siegford, J. M. (2013). Validating the accuracy of activity and rumination monitor data from dairy cows housed in a pasture-based automatic milking system. *Journal of Dairy Science*, 96(10), 6412–6422. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-6790>
- Endres, M. I., & Barberg, A. E. (2007). Behavior of dairy cows in an alternative bedded-pack housing system. *Journal of Dairy Science*, 90(9), 4192–4200. <https://doi.org/10.3168/jds.2006-751>
- Ferreira, F. C., Gennari, R. S., Dahl, G. E., & De Vries, A. (2016). Economic feasibility of cooling dry cows across the United States. *Journal of Dairy Science*, 99(12), 9931–9941. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11566>
- Foris, B., Thompson, A. J., von Keyserlingk, M. A. G., Melzer, N., & Weary, D. M. (2019). Automatic detection of feeding- and drinking-related agonistic behavior and dominance in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 102(10), 9176–9186. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16697>

- Fregonesi, J. A., Tucker, C. B., Weary, D. M., Flower, F. C., & Vittie, T. (2004). Effect of rubber flooring in front of the feed bunk on the time budgets of dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, *87*(5), 1203–1207. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(04\)73270-1](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)73270-1)
- Garner, J. B., Douglas, M. L., Williams, S. R. O., Wales, W. J., Marett, L. C., Nguyen, T. T. T., Reich, C. M., & Hayes, B. J. (2016). Genomic selection improves heat tolerance in dairy cattle. *Scientific Reports*, *6*(July), 1–9. <https://doi.org/10.1038/srep34114>
- Gaughan, J. B. (2000). Respiration rate - Is it a good measure of heat stress in cattle? *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, *13*(SUPPL. C), 329–332.
- Gauly, M., Bollwein, H., Breves, G., Brügemann, K., Dänicke, S., Daş, G., Demeler, J., Hansen, H., Isselstein, J., König, S., Lohölter, M., Martinsohn, M., Meyer, U., Potthoff, M., Sanker, C., Schröder, B., Wrage, N., Meibaum, B., Von Samson-Himmelstjerna, G., Wrenzycki, C. (2013). Future consequences and challenges for dairy cow production systems arising from climate change in Central Europe - A review. *Animal*, *7*(5), 843–859. <https://doi.org/10.1017/S1751731112002352>
- Gebremedhin, K. G., Wu, B., & Perano, K. (2016). Modeling conductive cooling for thermally stressed dairy cows. *Journal of Thermal Biology*, *56*, 91–99. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2016.01.004>
- Golher, D. M., Patel, B. H. M., Bhoite, S. H., Syed, M. I., Panchbhai, G. J., & Thirumurugan, P. (2021). Factors influencing water intake in dairy cows: a review. *International Journal of Biometeorology*, *65*(4), 617–625. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-02038-0>
- Gomez, A., & Cook, N. B. (2010). Time budgets of lactating dairy cattle in commercial freestall herds. *Journal of Dairy Science*, *93*(12), 5772–5781. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-3436>
- González, L. A., Tolkamp, B. J., Coffey, M. P., Ferret, A., & Kyriazakis, I. (2008). Changes in Feeding Behavior as Possible Indicators for the Automatic Monitoring of Health Disorders in Dairy Cows. *Journal of Dairy Science*, *91*, 1017–1028. <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0530>
- Harner, J. P., Brouk, M., Potts, J., Bradford, B., & Smith, J. F. (2013). Scientific Data for Developing Water Budgets on a Dairy. *Western Dairy Management Conference*, 90–105.
- Haskell, M. J., Rooke, J. A., Roehe, R., Turner, S. P., Hyslop, J. J., Waterhouse, A., & Duthie, C. A. (2019). Relationships between feeding behaviour, activity, dominance and feed efficiency in finishing beef steers. *Applied Animal Behaviour Science*, *210*(June 2018), 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2018.10.012>
- Herbut, P., Angrecka, S., & Walczak, J. (2018). Environmental parameters to assessing of heat stress in dairy cattle—a review. *International Journal of Biometeorology*, *62*(12), 2089–2097. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1629-9>
- Hut, P. R., Scheurwater, J., Nielen, M., Broek, J. Van Den, & Hostens, M. M. (2022). Heat stress in a temperate climate leads to adapted sensor-based behavioral patterns of dairy cows. *Journal of Dairy Science*. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-21756>
- Idris, M., Uddin, J., Sullivan, M., McNeill, D. M., & Phillips, C. J. C. (2021). Non-invasive physiological indicators of heat stress in cattle. *Animals*, *11*(1), 1–16. <https://doi.org/10.3390/ani11010071>

- Ipema, A. H., Goense, D., Hogewerf, P. H., Houwers, H. W. J., & van Roest, H. (2008). Pilot study to monitor body temperature of dairy cows with a rumen bolus. *Computers and Electronics in Agriculture*, *64*(1), 49–52. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.05.009>
- Ito, K., Weary, D. M., & von Keyserlingk, M. A. G. (2009). Lying behavior: Assessing within- and between- herd variation in free-stall-housed dairy cows. *Journal of Dairy Science*, *92*(9), 4412–4420. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2235>
- Ji, B., Banhazi, T., Ghahramani, A., Bowtell, L., Wang, C., & Li, B. (2020). Modelling of heat stress in a robotic dairy farm. Part 3: Rumination and milking performance. *Biosystems Engineering*, *199*(2020), 58–72. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.02.006>
- Ji, B., Banhazi, T., Perano, K., Ghahramani, A., Bowtell, L., Wang, C., & Li, B. (2020). A review of measuring, assessing and mitigating heat stress in dairy cattle. *Biosystems Engineering*, *199*, 4–26. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.07.009>
- Kadzere, C. T., Murphy, M. R., Silanikove, N., & Maltz, E. (2002). Heat stress in lactating dairy cows: A review. *Livestock Production Science*, *77*(1), 59–91. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(01\)00330-X](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(01)00330-X)
- Kendall, P. E., & Webster, J. R. (2009). Season and physiological status affects the circadian body temperature rhythm of dairy cows. *Livestock Science*, *125*(2–3), 155–160. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2009.04.004>
- Kerr, S. (2015). Livestock Heat Stress: Recognition, Response, and Prevention. *Bulletin of Washington State University Extension Fact Sheef, FS157E*, 1–10.
- Kim, H., Min, Y., & Choi, B. (2019). Real-time temperature monitoring for the early detection of mastitis in dairy cattle : Methods and case researches. *Computers and Electronics in Agriculture*, *162*(June 2018), 119–125. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.04.004>
- Krawczel, P. D., Hill, C. T., Dann, H. M., & Grant, R. J. (2008). Short communication: Effect of stocking density on indices of cow comfort. *Journal of Dairy Science*, *91*(5), 1903–1907. <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0520>
- Laumonier, Gilbert (2021). Réchauffement climatique et bâtiment des vaches laitières. *Le nouveau praticien vétérinaire élevages et santé*, *13*(50), 40-47.
- Lee, M., & Seo, S. (2021). Wearable wireless biosensor technology for monitoring cattle: A review. *Animals*, *11*(10). <https://doi.org/10.3390/ani11102779>
- Legrand, A., Schütz, K. E., & Tucker, C. B. (2011). Using water to cool cattle: Behavioral and physiological changes associated with voluntary use of cow showers. *Journal of Dairy Science*, *94*(7), 3376–3386. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-3901>
- Leliveld, L. M. C., Riva, E., Mattachini, G., Finzi, A., Lovarelli, D., & Provolo, G. (2022). Dairy Cow Behavior is affected by Period, Time of the Day and Housing. *Animals*, *12*(512), 17 p.

- Levit, H., Pinto, S., Amon, T., Gershon, E., Kleinjan-Elazary, A., Bloch, V., Ben Meir, Y. A., Portnik, Y., Jacoby, S., Arnin, A., Miron, J., & Halachmi, I. (2021). Dynamic cooling strategy based on individual animal response mitigated heat stress in dairy cows. *Animal*, *15*(2), 100093. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2020.100093>
- Liang, D., Wood, C. L., McQuerry, K. J., Ray, D. L., Clark, J. D., & Bewley, J. M. (2013). Influence of breed, milk production, season, and ambient temperature on dairy cow reticulorumen temperature. *Journal of Dairy Science*, *96*(8), 5072–5081. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-6537>
- Llonch, P., Somarriba, M., Duthie, C. A., Troy, S., Roehe, R., Rooke, J., Haskell, M. J., & Turner, S. P. (2018). Temperament and dominance relate to feeding behaviour and activity in beef cattle: Implications for performance and methane emissions. *Animal*, *12*(12), 2639–2648. <https://doi.org/10.1017/S1751731118000617>
- Lobeck, K. M., Endres, M. I., Shane, E. M., Godden, S. M., & Fetrow, J. (2011). Animal welfare in cross-ventilated, compost-bedded pack, and naturally ventilated dairy barns in the upper Midwest. *Journal of Dairy Science*, *94*(11), 5469–5479. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4363>
- Lovarelli, D., Finzi, A., Mattachini, G., & Riva, E. (2020a). A survey of dairy cattle behavior in different barns in northern Italy. *Animals*, *10*(4), 1–16. <https://doi.org/10.3390/ani10040713>
- Lovarelli, D., Tamburini, A., Mattachini, G., Zucali, M., Riva, E., Provolo, G., & Guarino, M. (2020b). Relating Lying Behavior With Climate, Body Condition Score, and Milk Production in Dairy Cows. *Frontiers in Veterinary Science*, *7*(November), 5–7. <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.565415>
- Mattachini, G., Riva, E., & Provolo, G. (2011). The lying and standing activity indices of dairy cows in free-stall housing. *Applied Animal Behaviour Science*, *129*(1), 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2010.10.003>
- McDonald, P. V., von Keyserlingk, M. A. G., & Weary, D. M. (2020). Hot weather increases competition between dairy cows at the drinker. *Journal of Dairy Science*, *103*(4), 3447–3458. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17456>
- Mondaca, M. R. (2019). Ventilation Systems for Adult Dairy Cattle. *Veterinary Clinics of North America - Food Animal Practice*, *35*(1), 139–156. <https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2018.10.006>
- Moretti, R., Biffani, S., Chessa, S., & Bozzi, R. (2017). Heat stress effects on Holstein dairy cows' rumination. *Animal*, *11*(12), 2320–2325. <https://doi.org/10.1017/S1751731117001173>
- Müschner-Siemens, T., Hoffmann, G., Ammon, C., & Amon, T. (2020). Daily rumination time of lactating dairy cows under heat stress conditions. *Journal of Thermal Biology*, *88*(August 2019), 102484. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2019.102484>
- Nabenishi, H., Ohta, H., Nishimoto, T., Morita, T., Ashizawa, K., & Tsuzuki, Y. (2011). Effect of the temperature-humidity index on body temperature and conception rate of lactating dairy cows in Southwestern Japan. *Journal of Reproduction and Development*, *57*(4), 450–456. <https://doi.org/10.1262/jrd.10-135T>
- National Research Council (NRC) (1971). A guide to environmental research on animals. *National Academy of Sciences*, Washington DC, USA.

- Nordlund, K. V., Strassburg, P., Bennett, T. B., Oetzel, G. R., & Cook, N. B. (2019). Thermodynamics of standing and lying behavior in lactating dairy cows in freestall and parlor holding pens during conditions of heat stress. *Journal of Dairy Science*, *102*(7), 6495–6507. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15891>
- Olson, T. A., Lucena, C., Chase, C. C., & Hammond, A. C. (2003). Evidence of a major gene influencing hair length and heat tolerance in *Bos taurus* cattle. *Journal of Animal Science*, *81*(1), 80–90. <https://doi.org/10.2527/2003.81180x>
- Ortiz, X. A., Smith, J. F., Bradford, B. J., Harner, J. P., & Oddy, A. (2010). Effects of running time of a cattle-cooling system on core body temperature of cows on dairy farms in an arid environment. *Journal of Dairy Science*, *93*(10), 4949–4954. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-3119>
- Ortiz, X. A., Smith, J. F., Rojano, F., Choi, C. Y., Bruer, J., Steele, T., Schuring, N., Allen, J., & Collier, R. J. (2015). Evaluation of conductive cooling of lactating dairy cows under controlled environmental conditions. *Journal of Dairy Science*, *98*(3), 1759–1771. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8583>
- Overton, M. W., Sischo, W. M., Temple, G. D., & Moore, D. A. (2002). Using time-lapse video photography to assess dairy cattle lying behavior in a free-stall barn. *Journal of Dairy Science*, *85*(9), 2407–2413. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(02\)74323-3](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(02)74323-3)
- Palacio, S., Bergeron, R., Lachance, S., & Vasseur, E. (2015). The effects of providing portable shade at pasture on dairy cow behavior and physiology. *Journal of Dairy Science*, *98*(9), 6085–6093. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8932>
- Paudyal, S., Maunsell, F. P., Richeson, J. T., Risco, C. A., Donovan, D. A., & Pinedo, P. J. (2018). Rumination time and monitoring of health disorders during early lactation. *Animal, The International Journal of Animal Biosciences*, *12*(7), 1484–1492. <https://doi.org/10.1017/S1751731117002932>
- Perano, K. M., Usack, J. G., Angenent, L. T., & Gebremedhin, K. G. (2015). Production and physiological responses of heat-stressed lactating dairy cattle to conductive cooling. *Journal of Dairy Science*, *98*(8), 5252–5261. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8784>
- Raven, P. et al. (2020). Régulation de la température corporelle. In : *Biologie* (p 915-920). Bruxelles, Belgique : DeBoeck Supérieur.
- Reece, W. et al. (2015). Body temperature and its regulation. In: *Duke's physiology of domestic animals* (p 149-154). Ames, Etats-Unis : Wiley Blackwell.
- Reith, S., Pries, M., Verhülndonk, C., Brandt, H., & Hoy, S. (2014). Influence of estrus on dry matter intake, water intake and BW of dairy cows. *Animal*, *8*(5), 748–753. <https://doi.org/10.1017/S1751731114000494>
- Riaboff, L., Couvreur, S., Madouasse, A., Roig-Pons, M., Aubin, S., Massabie, P., Chauvin, A., Bédère, N., & Plantier, G. (2020). Use of predicted behavior from accelerometer data combined with GPS data to explore the relationship between dairy cow behavior and pasture characteristics. *Sensors (Switzerland)*, *20*(17), 1–33. <https://doi.org/10.3390/s20174741>

- Schütz, K. E., Rogers, A. R., Cox, N. R., Webster, J. R., & Tucker, C. B. (2011). Dairy cattle prefer shade over sprinklers : Effects on behavior and physiology. *Journal of Dairy Science*, *94*(1), 273–283. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-3608>
- Skonieski, F. R., Souza, E. R. de, Gregolin, L. C. B., Fluck, A. C., Costa, O. A. D., Destri, J., & Neto, A. P. (2021). Physiological response to heat stress and ingestive behavior of lactating Jersey cows in silvopasture and conventional pasture grazing systems in a Brazilian subtropical climate zone. *Tropical Animal Health and Production*, *53*(2). <https://doi.org/10.1007/s11250-021-02648-9>
- 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. *Journal of Dairy Science*, *96*(5), 3028–3033. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5737>
- Soriani, N., Panella, G., & Calamari, L. (2013). Rumination time during the summer season and its relationships with metabolic conditions and milk production. *Journal of Dairy Science*, *96*(8), 5082–5094. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-6620>
- Stangaferro, M. L., Wijma, R., Caixeta, L. S., & Giordano, J. O. (2016). Use of rumination and activity monitoring for the identification of dairy cows with health disorders : Part II . Mastitis. *Journal of Dairy Science*, *99*(9), 7411–7421. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-10908>
- Stermer, R. A., Brasington, C. F., Coppock, C. E., Lanham, J. K., & Milam, K. Z. (1986). Effect of Drinking Water Temperature on Heat Stress of Dairy Cows. *Journal of Dairy Science*, *69*(2), 546–551. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(86\)80436-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(86)80436-2)
- Stygar, A. H., Gómez, Y., Berteselli, G. V, Costa, E. D., Canali, E., Niemi, J. K., Llonch, P., & Pastell, M. (2021). A Systematic Review on Commercially Available and Validated Sensor Technologies for Welfare Assessment of Dairy Cattle. *Frontiers in Veterinary Science*, *8*(March), 1–15. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.634338>
- Thom, E. C. (1959). The discomfort index. *Weatherwise*, *12*:57–59.
- Tresoldi, G., Schütz, K. E., & Tucker, C. B. (2019). Cooling cows with sprinklers: Effects of soaker flow rate and timing on behavioral and physiological responses to heat load and production. *Journal of Dairy Science*, *102*(1), 528–538. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-14962>
- Tresoldi, G., Schütz, K. E., & Tucker, C. B. (2016). Assessing heat load in drylot dairy cattle: Refining on-farm sampling methodology. *Journal of Dairy Science*, *99*(11), 8970–8980. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11353>
- Tucker, C. B., Rushen, J., Jensen, M. B., Passillé, A. M. De, & Hänninen, L. (2021). Invited review : Lying time and the welfare of dairy cows. *Journal of Dairy Science*, *104*(20) 20–46. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-18074>
- Turle, Sophie. *Stress climatique en période chaude en élevage bovin laitier : détection, quantification et impacts sanitaires*. Thèse d'exercice, Médecine vétérinaire, Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse – ENVT, 2017, 84 p.
- Walker, S. L., Smith, R. F., Routly, J. E., Jones, D. N., Morris, M. J., & Dobson, H. (2008). Lameness, Activity Time-Budgets, and Estrus Expression in Dairy Cattle. *Journal of Dairy Science*, *91*(12), 4552–4559. <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1048>

West, J. W. (2003). Effects of heat-stress on production in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 86(6), 2131–2144. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73803-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73803-X)

West, J. W. (1999). Nutritional strategies for managing the heat-stressed dairy cow. *Journal of Animal Science*, 77 Suppl 2, 21–35. https://doi.org/10.2527/1997.77suppl_221x

White, R. R., Hall, M. B., Firkins, J. L., & Kononoff, P. J. (2017). Physically adjusted neutral detergent fiber system for lactating dairy cow rations. I: Deriving equations that identify factors that influence effectiveness of fiber. *Journal of Dairy Science*, 100(12), 9551–9568. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-12765>

Documentation fournie par les entreprises

Medria. *Le San'Phone, installation et utilisation* (2020). 21p.

Medria. *Solutions de monitoring* (date inconnue). 40 p.

Lely. *Equipements laitiers Lely : solutions de traite, d'alimentation et d'équipement d'élevage* (date inconnue). Retrieved July 27, 2022, from <https://docplayer.fr/7064488-Equipements-laitiers-lely.html>

Mélanie TOURILLON

TITRE DE LA THÈSE : Comportement et physiologie de vaches laitières hautes productrices en période chaude : effets d'un matelas de logette à eau refroidie

Behaviour and physiology of high producing cows during warm period : effects of a cooled waterbed

Thèse d'État de Doctorat Vétérinaire : Nantes, le 11 octobre 2022

RÉSUMÉ

Le réchauffement climatique s'accroissant et les vaches laitières hautes productrices étant sensibles à ces modifications climatiques, il est important de mettre en place des solutions rafraichissantes confortables et efficaces pour les aider à lutter contre le stress thermique et limiter ses effets néfastes. L'objectif de cette étude pilote randomisée était d'étudier l'impact de matelas de logettes à eau réfrigérée sur la physiologie et le comportement des vaches laitières en condition de terrain. Des vaches Prim'Holstein d'une ferme commerciale Morbihannaise ont été réparties aléatoirement dans une case avec des logettes équipées soit d'un matelas en caoutchouc soit du matelas à eau réfrigérée et suivies de juin à septembre 2021. Leur comportement était mesuré en continu à l'aide de caméras fixées dans la stabulation, couplées à un logiciel basé sur des algorithmes d'intelligence artificielle, et d'accéléromètres 3D embarqués sur colliers. 40 vaches étaient équipées de bolus pour enregistrer la température corporelle. 4 capteurs mesuraient également l'ambiance de la stabulation en continu.

Cette étude a permis de montrer un effet bénéfique de l'équipement de logettes avec un matelas à eau réfrigérée par rapport au un matelas en caoutchouc sur la physiologie et le comportement des vaches laitières hautes productrices en début de lactation, mais cela semble plus être lié à une amélioration du confort des logettes qu'à une diminution du stress thermique. Les matelas sont en effet à l'origine d'une diminution de la température ruminale, d'une meilleure durée de couchage et donc de moins de temps passé debout mais sans que ces effets ne soient plus marqués lors de stress thermique. Ces matelas semblent donc prometteurs, de par leur confort, pour améliorer le bien-être voire la santé des vaches laitières logées en logettes, mais leur bénéfice pour limiter les effets du stress thermique reste à démontrer.

Une nouvelle étude dans les mêmes conditions durant l'été 2022 – qui a été plus chaud -, permettrait d'étayer ces observations.

MOTS CLÉS :

- COMPORTEMENT,
- TEMPÉRATURE RUMINALE,
- VACHE LAITIÈRE,
- STRESS THERMIQUE,
- BIEN-ETRE
- LOGEMENT DES ANIMAUX

DATE DE SOUTENANCE : 11 octobre 2022