

Contribution à l'étude de la résilience économique des troupeaux laitiers wallons face aux changements climatiques

Auteur : Destrait, Vincent

Promoteur(s) : Soyeurt, Hélène; Dogot, Thomas

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : sciences agronomiques, à finalité spécialisée

Année académique : 2020-2021

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/12236>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

**CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DE LA RÉSILIENCE
ÉCONOMIQUE DES TROUPEAUX LAITIERS WALLONS
FACE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES**

VINCENT DESTRAIT

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES AGRONOMIQUES

ANNÉE ACADÉMIQUE 2020-2021

CO-PROMOTEURS: HÉLÈNE SOYEURT & THOMAS DOGOT

© Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

**CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DE LA RÉSILIENCE
ÉCONOMIQUE DES TROUPEAUX LAITIERS WALLONS
FACE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES**

VINCENT DESTRAIT

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES AGRONOMIQUES

ANNÉE ACADÉMIQUE 2020-2021

CO-PROMOTEURS: HÉLÈNE SOYEURT & THOMAS DOGOT

Ce travail a été réalisé en collaboration avec :

Elevéo

Association Wallonne des Eleveurs

Service Technico-Economique

et

Centre de Recherche Agronomique Wallon

Réseau PameSeb ASBL



Remerciements

Mes premiers remerciements vont à mes co-promoteurs de ce travail de fin d'études, Hélène Soyeurt et Thomas Dogot, pour leur confiance, leurs conseils enrichissants et leurs innombrables relectures. Je tiens également à vous remercier pour votre soutien en toutes circonstances durant cette période particulière.

Je voudrais ensuite remercier très chaleureusement le service technico-économique d'Elevéo ainsi que le CRA-W pour m'avoir accordé leur confiance afin de disposer et d'exploiter leurs bases de données pour ce mémoire.

Je tiens également à remercier le Professeur Yves Beckers, en sa qualité de directeur des études du master Sciences agronomiques, pour toute l'aide apportée afin de démêler le casse-tête des crédits au cours de ces dernières années.

Un grand merci à Anthony et Charles pour votre aide précieuse et vos conseils avisés durant les nombreuses réunions en visio-conférence.

Je tiens particulièrement à remercier mes parents et mon frère de m'avoir encouragé tout au long de ces années d'études et d'avoir cru en mes capacités malgré les embûches rencontrées. Merci de m'avoir permis de réaliser ces études.

POUM aux nombreuses rencontres gembloutoises de l'ABI, de l'AG et aux membres du groupe de la première heure, pour ces belles longues années en votre compagnie. Sans oublier Filou, Benja et Roucoups dont leurs suggestions m'ont toujours poussé « vers le haut ». Comme le dit l'adage, « l'ABI ne périra pas », tout comme mes souvenirs gembloutois. Alors, à la prochaine autour d'un bon Floppy !

Enfin, je tiens à remercier très sincèrement Maurine de m'avoir soutenu au quotidien et d'avoir toujours été à l'écoute pendant ces longues périodes de travail. Merci de m'avoir supporté lors des moments « more difficult » au cours de mon parcours.

Résumé

Le secteur de l'élevage laitier est de plus en plus confronté aux risques climatiques. Dans ce cadre, l'objectif de ce travail est de contribuer à l'évaluation de la résilience économique des exploitations laitières wallonnes face aux changements climatiques. Pour ce faire, les bases de données météorologiques du réseau du PameSeb et des données technico-économiques d'Elevéo ont été utilisées et contenaient, respectivement, 1.090.152 et 96.048 enregistrements. En vue de fusionner les données journalières météorologiques et les données comptables annualisées, les valeurs des indices de température-humidité (THI) et de son équivalent ajusté (THIadj) ont été moyennées sur la période culturale s'étalant du 1^{er} avril au 30 septembre. De plus, les valeurs de THI et THIadj au 3^{ème} quartile ont été également étudiées afin de réduire l'influence des valeurs extrêmes.

Au regard de la variabilité spatio-temporelle de ces indicateurs, il est apparu que les bovins laitiers ont été fortement impactés par un stress thermique durant les saisons culturales de 2006, 2016, 2017 et 2018. La modélisation incluant toutes les données disponibles a montré qu'une relation combinant une composante linéaire et quadratique liait la marge brute et ses composantes aux indicateurs de stress thermique. Des effets moyens significatifs ont globalement été obtenus pour tous les paramètres économiques. Les points de rupture, caractérisant un changement de comportement dans l'évolution de chacun des paramètres économiques, ont été observés avant le seuil de THIadj de 64 défini par la littérature. Cependant, lorsque les fermes ont été modélisées individuellement, les conditions climatiques n'impactaient significativement qu'une ferme étudiée sur 5, chacune ayant leur propre point de rupture. Partant de ce constat, deux fermes de profil différent (intensif vs. extensif.) ont été comparées : leur point de rupture différait attestant d'une stratégie de gestion influencée par les conditions climatiques locales et leurs conditions de production. En conclusion, les résultats de cette étude montrent l'intérêt de continuer l'étude de l'influence du 3^{ème} quartile du THIadj sur la résilience économique des fermes wallonnes au stress thermique.

Mots clés

Vaches laitières — résilience – paramètres technico-économiques – stress thermique

Abstract

The dairy farming sector is increasingly confronted with climate risks. In this context, the objective of this work is to contribute to the evaluation of the economic resilience of Walloon dairy farms to climate change. To this end, the meteorological database of the PameSeb network and the technical-economic database of Elevéo were used and contained, respectively, 1,090,152 and 96,048 records. In order to merge the daily meteorological data with the annualized accounting data, the temperature-humidity index (THI) values and its adjusted equivalent (adjTHI) were averaged over the cropping period from 1st of April to 30th of September. In addition, the THI and THIadj values at the 3rd quantile were also studied to reduce the influence of extreme values.

Based on the spatial-temporal variability of these indicators, it appeared that dairy cattle were strongly impacted by heat stress during the 2006, 2016, 2017 and 2018 cropping seasons. Modelling including all the available data showed that a combined linear and quadratic component relationship linked gross margin and its components to heat stress indicators. Overall, significant average effects were obtained for all economic parameters. The breakpoints, characterizing a change in the behavior of each economic parameters, were observed before the adjTHI threshold of 64 defined by the literature. However, when farms were modelled individually, the climatic conditions only significantly impacted one of the five farms studied, each with their own breakpoint. Based on this finding, two farms with different profiles (intensive vs. extensive) were compared : their breakpoints differed, indicating a management strategy influenced by local climatic conditions and their production conditions. In conclusion, the results of this study show the interest to continue to study the 3rd quantile influence of the adjTHI on the economic resilience of Walloon farms to heat stress.

Keywords

Dairy cows – resilience – technical-economic parameters – heat stress

Table des matières

Remerciements	i
Résumé.....	iii
Abstract	iv
Table des figures.....	2
Table des tableaux.....	3
1. Introduction.....	4
2. Etat de l'art.....	6
2.1. Le changement climatique	6
2.1.1. Representative Concentration Pathway (RCP).....	6
2.2. Indicateurs mesurant le changement climatique.....	9
2.3. Effets du stress thermique sur les bovins laitiers.....	13
2.4. Résilience du secteur agricole	16
3. Objectifs.....	19
4. Matériels et Méthodes.....	20
4.1. Données.....	20
4.2. Impact du THI et THladj sur les paramètres économiques et recherche du point de rupture moyen	23
4.3. Estimation du point de rupture par ferme	24
5. Résultats et discussion	25
5.1. Variabilité temporelle.....	25
5.1.1. Des données météorologiques.....	25
5.1.2. Des paramètres économiques.....	27
5.2. Impact du THI et THladj sur les paramètres économiques	34
5.3. Variabilité du point de rupture par ferme.....	40
6. Conclusion et perspectives.....	47
7. Bibliographie.....	50
8. Annexes	59

Table des figures

Figure 1 : Ligne du temps des importantes réformes de la PAC pour le secteur laitier depuis 2003.....	4
Figure 2 : Evolution des anomalies de la température de surface regroupant les océans et les terres émergées et les océans en comparaison de la période 1986-2005 (I.P.P.C, 2014).	7
Figure 3 : Comparaison entre le modèle 2081-2100 et celui de 1986-2100 de la variation de la température moyenne à la surface et des précipitations moyennes (IPPC, 2014).	8
Figure 4 : Courbe de distribution de l'évolution du climat à la suite d'une augmentation de la température moyenne (IRM, 2020).	9
Figure 5 : Représentation des impacts visibles et invisibles du stress thermique sur une vache laitière (Habeeb et al., 2018).	14
Figure 6 : Carte de la Région wallonne situant les exploitations laitières et les stations météorologiques.	22
Figure 7 : Carte de la Région wallonne indiquant l'emplacement des différentes stations météorologiques et leur aire d'influence.	22
Figure 8 : Evolution temporelle de la variabilité du THI et du THladj pour la saison culturale.	25
Figure 9 : Evolution temporelle de la variabilité de la marge brute par vache traite.....	27
Figure 10 : Boîte à moustaches représentant la variabilité des marges brutes entre les exploitations extensives et les exploitations intensives	29
Figure 11 : Evolution temporelle de la variabilité de la valeur de production du lait par vache traite.	30
Figure 12 : Evolution temporelle de la variabilité du coût d'achat d'aliments par vache traite.	32
Figure 13 : Evolution temporelle de la variabilité du coût des frais de cheptel totaux par vache traite.	33
Figure 14 : Evolution théorique de LAITVT, FRCHEPTVT, ALIMENTVT et MARGEBVT en fonction des indicateurs de THI et de THladj.	36
Figure 15 : Evolution théorique de LAITVT, FRCHEPTVT, ALIMENTVT et MARGEBVT en fonction de l'indicateur THladj _{Quart3} pour la Ferme E et la Ferme I.....	42

Table des tableaux

Tableau 1 : Aperçu du panel d'indicateurs les plus cités avec leurs références et accompagnés de leurs formules de quantification, basé sur Herbut et Angrecka (2018).	11
Tableau 2 : Synthèse des p-valeurs et du coefficient de détermination des modèles de régression entre les indicateurs et les paramètres économiques.	35
Tableau 3 : Tableau résumant la variabilité temporelle du $THI_{adj_{Quart3}}$ des stations significatives regroupant les exploitations laitières wallonnes présentant au moins 8 années comptables au cours de la période d'étude s'étalant de 2006 à 2018.	41

1. Introduction

La production laitière représente un des plus importants secteurs dans la sphère économique mondiale. En 2019, la production totale mondiale de lait de vache a été estimée à 717 millions de tonnes dont près de 168 millions de tonnes sont produites par l'Union européenne. La Belgique contribue à cette production européenne à hauteur de 4,288 millions de tonnes dont 1,260 millions de tonnes pour la Région wallonne (CBL, 2020). Ainsi, les projections futures de la production laitière semblent s'orienter vers un accroissement mondial des volumes produits et, dans une moindre mesure, pour les volumes européens (FAOSTAT, 2019). Or, les systèmes agricoles sont mis en présence d'un ample panel de challenges sociaux, institutionnels et économiques (Morkūnas *et al.*, 2018; Meuwissen *et al.*, 2019), mettant en péril les divers objectifs du secteur laitier.

Au cours des dernières années, le monde agricole a évolué notamment à cause des changements de directives de la Politique Agricole Commune (PAC) dont les 5 principales réformes sont reprises dans la Figure 1. Ainsi, la Région wallonne a vu son nombre d'exploitations laitières se réduire drastiquement : de 19.382 à 4.493 entre 1984 et 2018 (CBL, 2020). Ces dernières présentent également une production moyenne accrue de 7.315 litres par vache traite en 2018 contre une production moyenne de 6.722 litres par vache traite en 2006. En plus, les éleveurs wallons ont fait évoluer à la hausse leur cheptel pour atteindre en moyenne 103 vaches traites contre 68 en 2006 (Awé, Ciney).

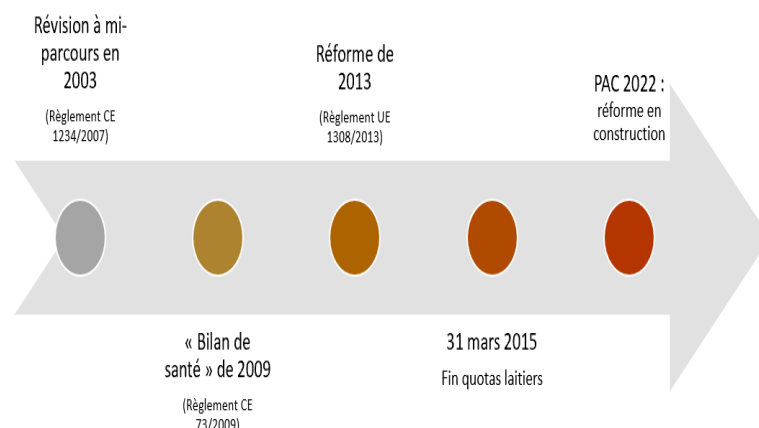


Figure 1 : Ligne du temps des importantes réformes de la PAC pour le secteur laitier depuis 2003.

Le secteur laitier wallon s'est accommodé d'une organisation sans quotas laitiers depuis 2015 : d'abord, sous le Mini-Paquet Lait (Règlement UE 261/2012, 2012) et depuis 2016, sous le deuxième Paquet Lait (Règlement UE 1612/2016, 2016). Ce dernier a pour but la réduction de l'offre à la suite de la dernière crise du prix du lait. Cependant, au cours de cette dernière décennie, on compte trois crises : la crise conjoncturelle¹ du secteur laitier en 2009 (Trouvé *et al.*, 2017), la crise de la zone « euro » en 2012 (Huart, 2013) et la crise structurelle² du secteur laitier en 2015-2016 (Trouvé *et al.*, 2017). Ces crises à répétition ont fragilisé le monde agricole.

De plus, au-delà de ces aspects politico-économiques, les changements climatiques, avec notamment l'augmentation des phénomènes extrêmes, apportent des contraintes et incertitudes supplémentaires pour ce secteur. La reconnaissance de l'impact du changement climatique sur le monde agricole ajoute un défi supplémentaire à prendre en compte et de fait, à intégrer (Lin, 2011).

Par ailleurs, le monde agricole doit demeurer durable tant à moyen qu'à long terme, tout en étant résilient à la hausse des phénomènes extrêmes (Urruty and Huyghe, 2017; Quendler *et al.*, 2020). Or, c'est le manque de résistance aux différents risques du secteur agricole qui est l'un des principaux obstacles à la durabilité globale de l'agriculture (Quendler *et al.*, 2020). En effet, l'agriculture est sujette par nature à un panel varié de risques accentuant sa faible résistance : les risques biotiques, abiotiques, biophysiques, environnementaux, climatiques et économiques (Meybeck *et al.*, 2012).

Par conséquent, Döring *et al.* (2014) estiment que le concept de résilience est un critère clé pour évaluer la santé des systèmes agricoles et mesurer l'incertitude économique liée aux risques climatiques. De ce fait, l'évaluation de l'incertitude liée aux risques climatiques ainsi que des potentielles stratégies de gestion de celle-ci vont constituer la question de recherche

¹ « La crise conjoncturelle est définie comme une période de crise sur un cycle court inférieur à une année due à une phase d'épuration des déséquilibres accumulés lors de l'expansion de la production » (Trouvé *et al.*, 2017).

² « La crise structurelle est définie comme une période de crise sur un cycle moyen supérieur à une année due à une mutation voire une rupture dans le fonctionnement d'un marché agricole jusque-là organisé des modalités spécifiques » (Trouvé *et al.*, 2017).

de ce travail de fin d'études. En effet, si la littérature relate les nombreuses réponses de l'animal face aux changements climatiques, elle est plutôt mince à propos d'une approche macro-économique évaluant la résilience économique de l'exploitation et de son troupeau (Morkūnas *et al.*, 2018). Dès lors, seul le secteur de l'élevage des bovins laitiers a été pris en compte dans ce travail même si les effets du changement climatique se marquent sur l'ensemble des cultures végétales. On peut donc citer quelques impacts négatifs sur les cultures notamment : la modification de l'évapotranspiration de la plante et du sol (Kang *et al.*, 2009), la réduction de l'efficacité de l'assimilation du carbone par les plantes (Gray *et al.*, 2016), l'accélération du cycle de vie des plantes et la levée de dormance plus tardive en raison d'un manque de températures basses (Seguin, 2010). Par contre, dans notre région, le changement climatique va également impacter plutôt positivement la production de biomasse, ce qui est intéressant pour la production d'herbes dans les pâturages étant donné que l'herbe pâturée reste le mode d'alimentation le moins coûteux pour l'éleveur de bovins laitiers (Peyraud and Delaby, 2005).

Le début du présent document établira l'état de l'art lié à la question de recherche concernant la résilience économique des élevages laitiers wallons face aux changements climatiques afin de mettre en avant les objectifs de ce travail de fin d'études. Il s'en suivra un exposé du matériel employé et de la méthodologie mise en place afin de répondre aux objectifs poursuivis. Finalement, la présentation et la discussion des résultats produits constitueront la suite du manuscrit qui se terminera par une conclusion s'ouvrant sur les perspectives en lien avec la thématique de recherche.

2. Etat de l'art

2.1. Le changement climatique

2.1.1. Representative Concentration Pathway (RCP)

Le réchauffement climatique est observable depuis l'ère préindustrielle (IPPC, 2014; Lubchenco and Karl, 2012 ; Figure 2). De nombreux scientifiques redoutent que l'ampleur, la fréquence voire l'impact de ces changements climatiques augmentent dans le futur (Meehl *et*

al., 2000; Cook *et al.*, 2014; Trenberth *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2018; Xu, Chen and Zhang, 2019).

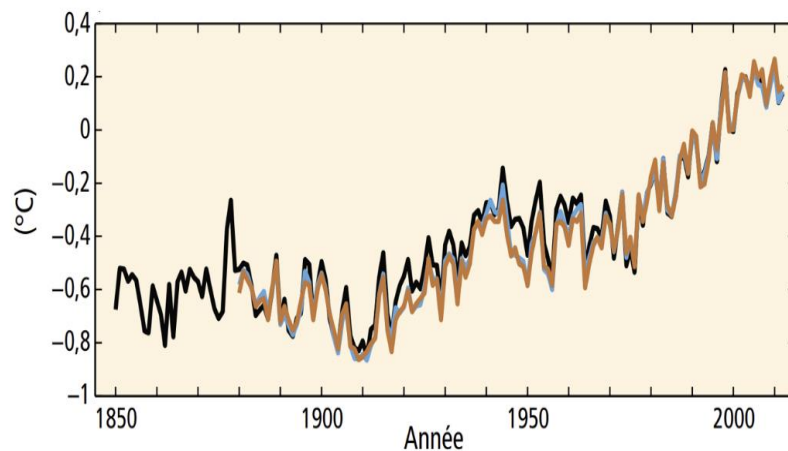


Figure 2 : Evolution des anomalies de la température de surface regroupant les océans et les terres émergées en comparaison de la période 1986-2005. Les différentes couleurs correspondent à des ensembles de données différents regroupés pour le rapport synthétique du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (I.P.P.C., 2014).

Le « Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat » (G.I.E.C) a modélisé quatre scénarii, appelés « *Representative Concentration Pathway* »³ (RCP), en fonction de l'émission anthropogénique des gaz à effet de serre et du forçage radiatif⁴ équivalent estimé. Il s'agit de trois scénarii de stabilisation (RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 6) et un scénario suivant la tendance actuelle, le RCP 8.5 (IPPC, 2014). Cependant, le G.I.E.C préconise le scénario RCP 2.6 visant à limiter le réchauffement planétaire à 1.5 degré Celsius (°C) par rapport à la situation préindustrielle pour la fin du XXI^{ème} siècle (I.P.P.C., 2018). En effet, au-delà d'une augmentation de 2°C, il y a un important risque d'atteindre le point de basculement climatique, dit de « non-retour » (I.P.P.C., 2018), où la dynamique du système climatique est radicalement bouleversée (Randers and Goluke, 2020). En prime, Lenton *et al.* (2019) insistent sur le fait que ce point de basculement climatique pourrait bien être plus proche qu'on ne le pense actuellement. C'est pourquoi, l'Accord de Paris des Nations Unies, signé lors de la

³ Le Representative Concentration Pathway (RCP) est défini comme « un ensemble de scénarios contenant des projections d'émissions, de concentrations et d'occupations des sols dans le but de fournir des informations sur les trajectoires de développement possibles des principaux agents de forçage du changement climatique et d'y réaliser des analyses ultérieures par des modèles climatiques et des modèles d'évaluation intégrée » (Van Vuuren *et al.*, 2011).

⁴ Le forçage radiatif est défini par le G.I.E.C comme « l'équilibre entre le rayonnement solaire entrant et les émissions de rayonnement infrarouge sortant de l'atmosphère, exprimé en W/m^2 » (I.P.P.C., 2014).

Conférence sur les Changements Climatiques (COP 21) par 188 gouvernements dont la Belgique, tend à limiter le réchauffement climatique à 1,5°C afin d'atténuer les impacts (Seneviratne *et al.*, 2018) sur l'environnement et sur les espèces animales et végétales (I.P.P.C., 2018) et aussi d'éclairer les décisions politiques sur le climat (Xu, Chen and Zhang, 2019).

Cependant, les changements climatiques prédits à l'échelle du globe ne sont pas équivalents d'une région à l'autre tant sur les terres émergées que dans les océans (I.P.P.C., 2019 ; Figure 3). Ainsi, l'Europe occidentale et centrale (Rebetez *et al.*, 2009) et la Méditerranée (Hoerling *et al.*, 2012) subiront des vagues de chaleur plus importantes tandis que le Nord de l'Europe connaîtra des conditions plus humides ainsi que plus d'inondations hivernales (Seneviratne *et al.*, 2018). En ce qui concerne la Belgique, le scénario RCP 2.6 prôné par le G.I.E.C. tend à prédire une élévation plus importante de la température et une nette accentuation de la pluviosité et de l'humidité durant l'hiver. A contrario, les périodes estivales verront une réduction des précipitations entraînant un risque plus accentué de sécheresse (IRM, 2020). Cependant, selon le scénario RCP 8.5, il est estimé que la Belgique connaîtra des sécheresses plus extrêmes, voire exceptionnelles, selon un degré de confiance modéré, des vagues de chaleur plus récurrentes, des jours tropicaux où la température dépassera les 30°C ainsi que des précipitations extrêmes selon un degré de confiance élevé (Termonia *et al.*, 2018).

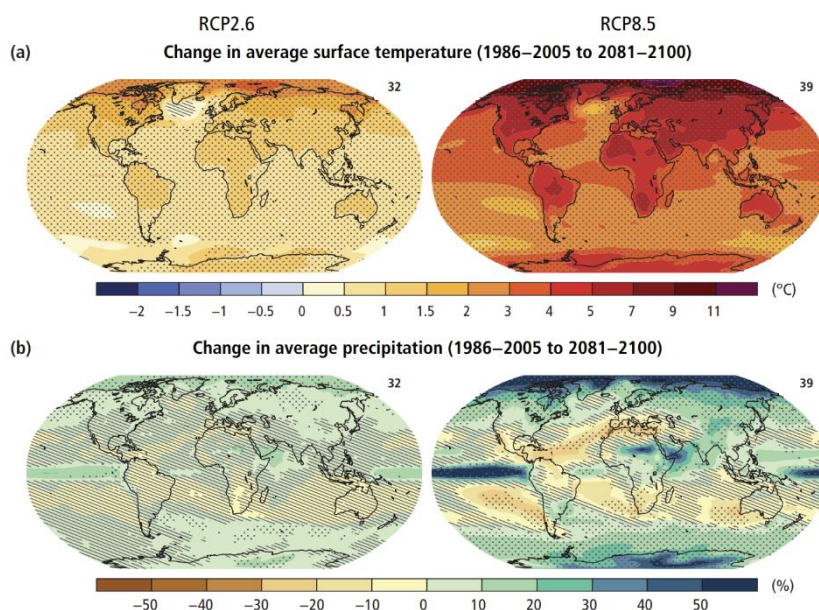


Figure 3 : Comparaison entre le modèle 2081-2100 et celui de 1986-2100 de la variation de la température moyenne à la surface et des précipitations moyennes (Scénario RCP 2.6 (à gauche) et Scénario RCP 8.5 (à droite)) (IPPC, 2014).

Tout ceci s'explique par la climatologie de la température qui respecte une distribution normale comme le montre la Figure 4 (IRM, 2020). Ainsi, sous l'impulsion du changement climatique, la courbe de distribution normale s'oriente vers les températures plus importantes, soit vers la droite du graphique. Au fur et à mesure que la température moyenne va s'accroître, les températures extrêmes vont également évoluer à la hausse. De surcroît, la probabilité de ressentir ces extrêmes, dont des sécheresses climatiques, augmente également avec le nouveau climat défini (IRM, 2020). L'augmentation de la température favorise une atmosphère plus chaude ayant la capacité, avant saturation, de contenir un plus important volume de vapeur d'eau (Dai, 2011; Hao *et al.*, 2018; IRM, 2020). Par conséquent, les précipitations sont également impactées ce qui va modifier la teneur en eau du sol (Hao *et al.*, 2018), engendrant un effet délétère sur l'ensemble des domaines d'activités socio-économiques (Hao *et al.*, 2018).

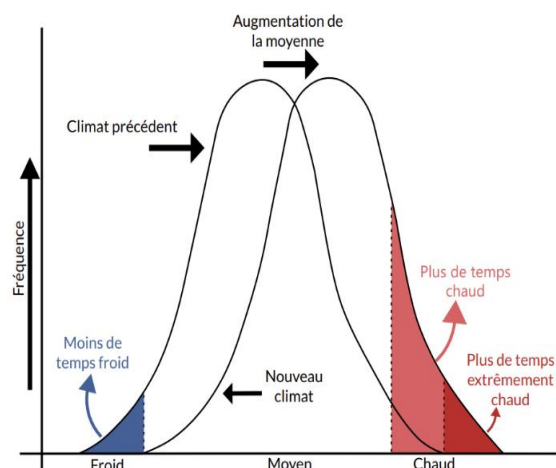


Figure 4 : Représentation graphique de la courbe de distribution de l'évolution du climat à la suite d'une augmentation de la température moyenne (IRM, 2020).

2.2. Indicateurs mesurant le changement climatique

Il y a donc un intérêt réel à quantifier l'impact de ces changements climatiques notamment dans le cas de la production laitière, et plus spécifiquement sur la vache laitière. La littérature recense différentes approches de quantification dont la principale repose sur un panel d'indices d'humidité et température, exprimés en unités absolues et caractérisant le confort thermique des bovins laitiers par rapport aux changements climatiques. Ainsi, le Tableau 1

liste les indicateurs les plus référencés dans la littérature scientifique d'après Herbut et Angrecka (2018). Cependant, seule une poignée d'entre eux sont destinés à un usage en régions tempérées, dont la Belgique fait partie. Ainsi, seuls le Temperature-Humidity Index (THI), le Black Globe-Humidity Index (BGHI), l'Adjusted Temperature Humidity Index (THIadj) et le Comprehensive Climate Index (CCI) sont potentiellement utilisables (Herbut and Angrecka, 2018).

Mais, le THI est actuellement le plus employé pour mesurer la menace du stress thermique chez les bovins laitiers (Hammami *et al.*, 2013; Hoffmann *et al.*, 2020).

Cependant, suite à son évaluation de différents indicateurs dans les conditions environnementales luxembourgeoises, Hammami *et al.* (2013) recommandent l'usage du THIadj afin de prévenir le stress thermique pour les vaches laitières de la race Holstein. De plus, selon Zimbelman *et al.* (2009), il n'y a aucun bénéfice à remplacer le THI par le BGHI vu qu'aucun de leurs résultats n'atteste que le BGHI estime mieux le seuil des températures entraînant une perte nette en termes de rendement laitier. Le CCI s'utilise sur une large gamme de conditions climatiques chaudes et froides (prenant en compte principalement les basses températures caractéristiques des régions tempérées) et se prête dès lors plutôt à l'évaluation du stress en période automnale voire hivernale. Cependant, son importante complexité de calcul réduit drastiquement son utilisation (Hammami *et al.*, 2013). Par conséquent, les indicateurs qui seront utilisés dans le présent travail pour évaluer le stress thermique durant les conditions climatiques chaudes, en région tempérée, seront le THI et le THIadj.

Tableau 1 : Aperçu du panel d'indicateurs les plus cités avec leurs références et accompagnés de leurs formules de quantification, basé sur Herbut et Angrecka (2018).⁵

Indice	Nom de l'indice	Référence	Formule de quantification
THI	Temperature-Humidity Index	Thom (1959) ; NRC (1971)	$THI = (1.8 * Tsa + 32) - [(0.55 - 0.0055 * Hra) * (1.8 * Tsa - 26)]$
BGHI	Black Globe-Humidity Index	Buffington <i>et al.</i> (1981)	$BGHI = T_{BG} + 0.36 \times T_{DP} + 41.5$
ETI	Equivalent Temperature Index	Baeta <i>et al.</i> (1987)	$ETI = 27.88 - (0.45 \times Tsa) + (0.010754 \times Tsa^2) - (0.4905 \times Hra) + (0.00088 \times Hra^2) + (1.1507 \times Vvt) - (0.12644 \times Vvt^2) + [0.019876 \times (Tsa \times Hra)] - [0.04631 \times (Tsa \times Vvt)]$
HLI	Heat Load Index	Gaughan <i>et al.</i> (2008)	$HLI = 8.62 + (0.38 \times Hra) + (1.55 \times T_{BG}) - (0.5 \times Vvt) + e^{(2.4-Vvt)}$, si $T_{BG} > 25$; $HLI = 10.66 + (0.28 \times Hra) + (1.3 \times T_{BG}) - Vvt$, si $T_{BG} \leq 25$; $T_{BG} = (1.33 \times Tsa) - (2.65 \times Tsa^{0.5}) + [3.21 \times \log(Vvt + 1)] + 3.5$
THIadj	Adjusted Temperature-Humidity Index	Mader <i>et al.</i> (2006)	$THI_{adj} = [4.51 + THI - (1.992 \times Vvt) + (0.0068 \times Rad)]$; $THI = (0.8 \times Tsa) + [Hra \times (Tsa - 14.4)] + 46.4$
CCI	Comprehensive Climat Index	Mader <i>et al.</i> (2010)	$CCI = Hra_{adj} + Vvt_{adj} + Rad_{adj}$ $Hra_{adj} = e^{[(0.00182 \times Hra) + (1.8 \times 10^{-5} \times Tsa \times Hra)]} \times [(0.000054 \times Tsa^2) + (0.00192 \times Tsa) - 0.0246] \times (Hra - 30)$; $Vvt_{adj} = \left(\frac{-6.56}{e^{\left[\frac{1}{(2.26 \times Vvt + 0.23)^{0.45}} \right] \times [2.9 + 1.14 \times 10^{-6} \times Vvt^{2.5} - \log_{0.3}(2.26 \times Vvt + 0.33)^{-2}]}} \right) - 0.0056 \times Vvt^2 + 3.33$; $Rad_{adj} = (0.0076 \times Rad) - (0.00002 \times Rad \times Tsa) + (0.00005 \times Tsa^2 \times \sqrt{Rad}) + (0.1 \times Tsa) - 2$
ITSC	Index of thermal stress for cows	Da Silva <i>et al.</i> (2015)	$ITSC = 77.1747 + 4.8327 \times Tsa - 34.8189 \times Vvt + 118.6981 \times Pv - 14.7956 \times Pv^2 - 0.1059 \times ERHL$

⁵ Abréviations dans les formules de quantification : la température de l'air en °C (Tsa), l'humidité relative de l'air en % (Hra), la température du globe noir en °C (T_{BG}), la température du point de rosée en °C (T_{DP}), la vitesse du vent en m/s (Vvt), l'intensité du rayonnement solaire en W/m^2 (Rad), la pression de vapeur partiel en kPa (Pv) et la charge thermique effective par rayonnement en W/m^2 ($ERHL$).

Le THI, défini au départ pour estimer le confort humain, a rapidement été employé pour mesurer le stress thermique chez les animaux (Hammami *et al.*, 2013). Son développement est l'œuvre de Thom (1959), mais l'expression du THI n'a cessé d'évoluer au fil du temps afin de s'adapter au mieux aux bovins laitiers élevés en pâtures ou dans une étable (Herbut and Angrecka, 2018). Ainsi, Herbut et Angrecka (2018) listent les nombreuses modifications et corrections apportées à l'équation du THI. Au final, l'expression développée par le « *National Research Council* des Etats-Unis d'Amérique » (NRC, 1971) sort du lot de par son aisance d'utilisation et est dès lors devenue la plus employée dans la littérature. La formule peut se résumer comme suit :

$$THI = (1.8 * Tsa + 32) - [(0.55 - 0.0055 * Hra) * (1.8 * Tsa - 26)]$$

où Tsa représente la température de l'air exprimée en degré Celsius (°C) tandis que Hra représente l'humidité relative de l'air exprimée en pourcent (%).

Bien que le THI soit largement utilisé, Hammami *et al.* (2013) voient trois grandes limitations. Premièrement, le THI se comporte comme une représentation empirique. Ensuite, il présume que les animaux réagissent tous similairement aux facteurs environnementaux. Finalement, le THI n'intègre pas certains paramètres environnementaux tels que la vitesse du vent et le rayonnement solaire, ni même les incidences spécifiques liées à l'animal étudié notamment la race et l'âge de ce dernier.

L'Adjusted Temperature Humidity Index (THIadj) solutionne certaines de ces limitations. Cet indice a été mis au point par Mader *et al.* (2006) sur base des équations préexistantes du THI, mais incorpore en plus le rayonnement solaire et la vitesse du vent (Herbut and Angrecka, 2018; Ji *et al.*, 2020) ainsi que des paramètres biologiques⁶ comme la couleur du pelage et la race de l'animal (Herbut and Angrecka, 2018). Sa formule se résume de la manière suivante :

$$THIadj = 4.51 + THI - (1.992 * Vvt) + (0.0068 * Rad)$$

$$THI = (0.8 * Tsa) + [Hra * (Tsa - 14.4)] + 46.4$$

⁶ Les paramètres biologiques ont été dès lors intégrés dans les divers coefficients de l'équation du THIadj de Mader *et al.* (2006) au regard de l'expérimentation faite sur des bovins d'Angus, Gelbvieh et Charolais dont leur couleur de robe passait du noir au rouge, ensuite au feu et finalement, au blanc.

Où V_v représente la vitesse du vent exprimée en m/s, R_{ad} représente le rayonnement solaire exprimé en W/m^2 , T_{sa} représente la température de l'air exprimée en °C tandis que H_{ra} représente l'humidité relative de l'air exprimée en %.

2.3. Effets du stress thermique sur les bovins laitiers

Lorsque l'animal sort de sa zone de confort thermique, ce dernier souffre de ce que l'on appelle un stress thermique (FAO, 1988).

Pour lutter contre ce stress, le corps des bovins laitiers tente de restaurer des conditions favorables à son fonctionnement physiologique en éliminant l'excédent de chaleur dans l'environnement (Habeeb *et al.*, 2018) selon divers mécanismes tels que l'évapotranspiration, le rayonnement, la conduction et la convection (Wang *et al.*, 2018).

Or, cette capacité de dissipation de la chaleur et donc, de refroidissement corporel, est fortement limitée par les conditions environnementales (Promket *et al.*, 2020).

De surcroît, en période de lactation, les bovins laitiers génèrent d'importantes quantités de chaleur métabolique (West *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2018; Promket *et al.*, 2020) surenchérisant le surplus de chaleur déjà induit à la suite du stress thermique. De ce fait, il est aisé de comprendre les difficultés rencontrées par les bovins laitiers pour maintenir une température interne constante et dissiper tout ce surplus de chaleur (Wang *et al.*, 2018).

Le stress thermique engendre ainsi directement des conséquences visibles (Habeeb *et al.*, 2018) comme une diminution de la production laitière ou un changement de comportement de l'animal (West *et al.*, 2003; Nardone *et al.*, 2010; Lambertz *et al.*, 2014; Cowley *et al.*, 2015; Rojas-Downing *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2018; Amamou *et al.*, 2019; Blanco-Penedo *et al.*, 2020; Ji *et al.*, 2020; Promket *et al.*, 2020), mais également des conséquences invisibles (Habeeb *et al.*, 2018), telles que des effets néfastes sur l'état général de l'animal (de Andrade Ferrazza *et al.*, 2017). De fait, par un stress thermique important, le système immunitaire de l'animal est fortement réduit et peut mener à la mort de l'individu dans les plus graves cas (Rojas-Downing *et al.*, 2017).

Le bien-être des vaches laitières est donc fortement influencé par le stress thermique (Lambertz *et al.*, 2014) comme le montre la Figure 5.

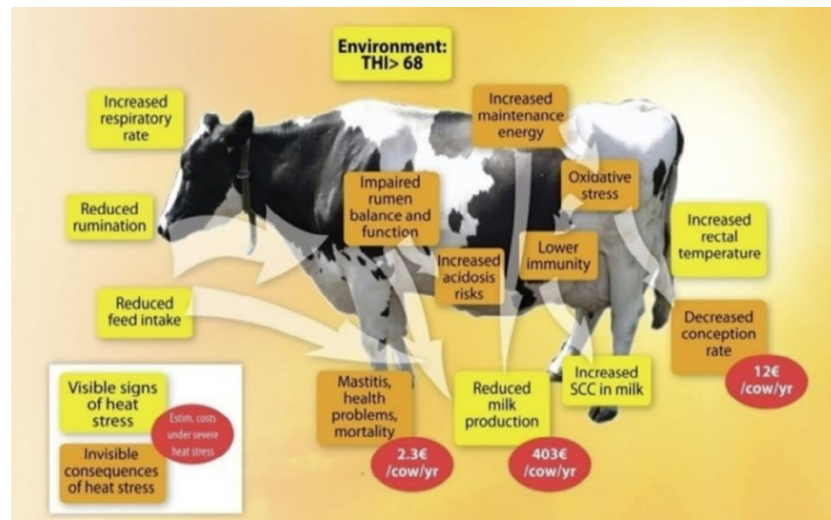


Figure 5 : Représentation des impacts visibles et invisibles du stress thermique sur une vache laitière (Habeeb *et al.*, 2018).

Dès lors, selon un degré mouvant par rapport au stress thermique, les performances de la reproduction et les réponses physiologiques, plus particulièrement, sont affectées : les besoins d'entretien (Cowley *et al.*, 2015; Promket *et al.*, 2020), la température corporelle, rectale et cutanée, la fréquence respiratoire, le taux de transpiration, la consommation d'eau et d'aliments (Cowley *et al.*, 2015; de Andrade Ferrazza *et al.*, 2017; Rojas-Downing *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2018; Ji *et al.*, 2020), la fréquence cardiaque (Kadzere *et al.*, 2002; West *et al.*, 2003; Ji *et al.*, 2020) et l'efficacité de la conversion alimentaire (Rojas-Downing *et al.*, 2017).

Ainsi, Gauly *et al.* (2013) estiment que le stress thermique pour les vaches laitières à haut rendement préoccupe de plus en plus les producteurs laitiers européens. En effet, l'incidence sur les races à haut rendement laitier est plus importante que sur des races plus rustiques à plus faible rendement (Coppock *et al.*, 1982; Nardone *et al.*, 2010). D'ailleurs, une sensibilité accrue au stress thermique pour les races à haut rendement laitier est observée lors des soixante premiers jours de lactation (Pragna *et al.*, 2017; Habeeb *et al.*, 2018). Par conséquent, il existe ainsi une certaine relation antagoniste entre la tolérance au stress thermique et la production des vaches laitières de race Holstein (Bernabucci *et al.*, 2014; Carabaño *et al.*, 2014; Amamou *et al.*, 2019).

La production de lait se réduit quand la chaleur métabolique produite s'accroît conjointement avec le stress thermique (Kadzere *et al.*, 2002; Rojas-Downing *et al.*, 2017). Or, cette réduction de production entraîne d'importantes pertes économiques comme le soulignent St-Pierre *et al.* (2003). Ces dernières sont également amplifiées en fonction de la qualité du lait (Blanco-Penedo *et al.*, 2020) : soit par la variation de la composition du lait (teneur en protéines et en matières grasses), soit par la hausse de la fréquence des cellules somatiques dans le lait et des mammites (Promket *et al.*, 2020). Ainsi, en période de stress thermique, la réduction de la production laitière globale conduit à des pertes économiques annuelles estimées à 403 €/vache (Habeeb *et al.*, 2018). Cette estimation est fortement influencée par les différentes pertes de rendement laitier, protéique et de matières grasses, explicitées précédemment.

L'amélioration technique des méthodes de surveillance, de quantification et d'évaluation des paramètres physiologiques et environnementaux, a permis de mener de nombreuses études sur les vaches laitières dans divers pays (Ji *et al.*, 2020), études qui ont légitimé de définir un seuil de THI lié au stress thermique. Bien qu'initialement fixé à 72 (NRC, 1971) et ensuite revu à 68 (Zimbelman *et al.*, 2009), Brügemann *et al.* (2011) proposent de diminuer encore ce seuil à 60 à la suite des observations faites auprès de vaches laitières allemandes de la race Holstein, sur base du rendement protéique. Gorniak *et al.* (2014) ont ensuite confirmé ce seuil de 60 pour le climat tempéré en Allemagne (Lambertz *et al.*, 2014) car il témoignerait d'une réduction de l'ingestion alimentaire (Ominski *et al.*, 2002; Ji *et al.*, 2020) ainsi que de la production laitière (Ji *et al.*, 2020). De son côté, Hammami *et al.* (2013) définissent le seuil du THI à 62 pour les populations de vaches laitières de la race Holstein au Grand-Duché du Luxembourg. Le seuil de THI_{adj} est supérieur à celui du THI et fixé à 74 (Mader *et al.*, 2006). Hahn *et al.* (2009) ont été plus loin en proposant une échelle: le stade d'alerte pour les valeurs de 75 à 78, le stade de danger pour les valeurs de 79 à 83 et le stade d'urgence pour les valeurs dépassant 84 (Herbut and Angrecka, 2018). Hammami *et al.* (2013) ont proposé une nette réduction de ce seuil, passant de 74 à 64 dans le but de mieux répondre aux conditions des régions tempérées de l'Europe occidentale puisque le seuil de Mader *et al.* (2006) s'appuyait sur les conditions climatiques du Nebraska (USA).

2.4. Résilience du secteur agricole

Concernant la production laitière, dès la fin des années 80, Beede et Collier (1986) soumettaient déjà l'idée de réduire l'impact du stress thermique pour accroître la résilience selon trois stratégies de gestion : premièrement, la métamorphose physique de l'environnement, deuxièmement l'amélioration génétique permettant une tolérance accrue au stress et troisièmement, l'intervention sur la nutrition.

Ainsi, la première stratégie se concentre sur la fourniture d'ombre tant naturelle (arbres dans les prairies) qu'artificielle (structure d'ombrage construite). C'est même la plus simple approche pour réduire la chaleur émanant des radiations solaires (Renaudeau *et al.*, 2012; Sejian *et al.*, 2018). Cependant, l'ombrage n'élimine pas complètement l'effet du stress thermique (Gaughan *et al.*, 2010) vu qu'elle n'influe pas sur la température de l'air et l'humidité relative (Armstrong, 1994). C'est pourquoi différents systèmes de refroidissement (par climatisation, par évaporation, par brumisation, par pads) ont été développés mais seul le système de refroidissement par évaporation semble être le plus employé dans les régions chaudes (Renaudeau *et al.*, 2012) alors que ce genre de système reste encore minoritaire dans les régions tempérées (Hammami *et al.*, 2013).

La seconde stratégie s'oriente sur le développement des capacités de tolérance au stress thermique grâce à la sélection génétique. En effet, les animaux thermotolérants réagissent aux variations des conditions environnementales en adaptant leurs caractères phénotypiques (Sejian *et al.*, 2018). Ainsi, différentes pistes de mesures de la résilience ont été proposées : la régulation épigénétique de l'expression du gène ainsi que l'empreinte thermique du génome (Renaudeau *et al.*, 2012), l'introgession génomique (Strandén *et al.*, 2019), l'analyse de l'information omique (Carabaño *et al.*, 2019) ou encore, l'étude plus générale de la plasticité (Rovelli *et al.*, 2020). De ce fait, plusieurs gènes candidats ont été liés à l'adaptation des bovins (Rovelli *et al.*, 2020) mais la complexité de la réponse face au stress thermique ainsi que l'antagonisme entre la recherche de productivité et la tolérance à la chaleur ne facilitent pas la résolution de la problématique (Bernabucci, 2019; Carabaño *et al.*, 2019).

Enfin, la dernière stratégie s'organise autour de la gestion nutritionnelle du bétail dans l'optique de satisfaire les besoins durant les périodes de stress thermique et maintenir l'équilibre. En effet, une réduction de l'ingestion d'aliments s'observe en période chaude et est considérée comme une des premières adaptations de l'animal face aux conditions

environnementales (Renaudeau *et al.*, 2012; Sejian *et al.*, 2018). De ce fait, l'éleveur peut agir, d'une part, en changeant la composition de la ration en macronutriments et, d'autre part, en corrigeant la composition de la ration en micronutriments (Renaudeau *et al.*, 2012). Ce dernier peut également favoriser l'apport d'aliments durant les périodes plus fraîches, voire la nuit, et ainsi, permettre une meilleure résilience face à la chaleur (West, 1999). Toutefois, une bonne gestion de la consommation d'eau reste fondamentale pour les animaux, spécialement lors de périodes de stress thermiques (Renaudeau *et al.*, 2012).

Du coup, le concept de résilience autorise diverses stratégies de gestion pour minimiser l'impact du stress thermique. Néanmoins, quel que soit le moyen déployé pour renforcer la résilience, il représente un certain coût impactant la santé financière des exploitations laitières. De cette manière, en raison du changement climatique (Pasqui and Di Giuseppe, 2019), la résilience économique doit être prise en compte.

Cependant, du point de vue de la résilience économique, la littérature reste plutôt mince comme le font remarquer Morkūnas *et al.* (2018).

Pourtant, l'« *Organisation de coopération et de développement économique* » (OCDE) a retenu la résilience économique comme une de ses principales lignes directrices. De surcroît, l'OCDE estime que la résilience est une caractéristique primordiale de la durabilité et non pas une alternative (OCDE, 2017).

L'Union européenne tente également d'instaurer cette ligne directrice dans la réforme de la PAC 2022 au travers de ses 9 objectifs dont 3 visant à dynamiser un secteur agricole résilient : l'accroissement de la compétitivité, la garantie d'un revenu agricole et le rééquilibrage de la chaîne de valeur alimentaire (van Doorn and Jongeneel, 2020).

La définition de la résilience économique souligne également ce caractère essentiel comme étant la capacité de résistance d'une économie donnée aux chocs ainsi que d'atténuer les impacts des chocs voire de restreindre la probabilité d'autres chocs (Holling *et al.*, 2002; Morkūnas *et al.*, 2018; Quendler *et al.*, 2020).

Ensuite, la résilience économique peut être classée de deux manières différentes (Morkūnas *et al.*, 2018; Dormady *et al.*, 2019) : soit la résilience économique dite statique (Hill *et al.*, 2008; Briguglio *et al.*, 2009) soit la résilience économique dite dynamique (Pant *et al.*,

2014). D'une part, la classe dite « statique » permet de conceptualiser un système avec aucune mesure préventive pour éviter le choc et joue sur sa flexibilité pour minimiser les effets du choc. D'autre part, la classe dite « dynamique » adjoint au système dit « statique » une perspective temporelle estimant le timing nécessaire pour revenir à la situation initiale (Pant *et al.*, 2014). Dans le cadre de l'étude menée dans ce travail de fin d'études, l'évaluation de la résilience économique des exploitations laitières durant les conditions climatiques chaudes, en région tempérée, se focalisera sur l'approche dite « statique ».

Quelle que soit la classe de résilience économique étudiée, elle peut être quantifiée en prenant la volatilité des revenus comme indicateur (Hill *et al.*, 2008; Briguglio *et al.*, 2009; Morkūnas *et al.*, 2018). Or, l'indicateur de revenus est parfois peu conseillé dans le raisonnement analytique employé pour l'économie agricole étant donné qu'il nécessite, à la fois, l'intégration des paramètres économiques estimant la valeur de la production et celle des paramètres quantifiant les coûts fixes et variables liés à la production (Kelly and Gráda, 2013; Gollin *et al.*, 2014). De ce fait, Morkūnas *et al.* (2018) proposent de s'orienter uniquement sur la volatilité de la production tandis que Carter *et al.* (2007) ainsi que Béné (2013) soutiennent l'idée de se concentrer sur les coûts. Il s'agit plutôt des coûts variables que des coûts fixes étant donné que la valeur des coûts fixes reste identique tant avant qu'après l'apparition du choc.

Finalement, la nette divergence entre les auteurs sur le paramètre à prendre en compte pour quantifier économiquement la résilience conduit à intégrer, à la fois, la volatilité du revenu, de la production et des coûts. Cette intégration complète renvoie dès lors vers une vision plus globale de la problématique de résilience.

Par conséquent, la résilience économique incarne la stabilité, la robustesse et la viabilité de l'exploitation agricole (Meuwissen *et al.*, 2019; Quendler *et al.*, 2020) face aux conditions vacillantes soumises au changement climatique (Urruty and Huyghe, 2017).

3. Objectifs

L'objectif principal de ce travail de fin d'études est de contribuer à l'évaluation de la résilience économique des exploitations laitières wallonnes face aux changements climatiques, via les données provenant de la base de données météorologiques du réseau PameSeb (CRA-W/Réseau Pameseb, 2021) et de la base de données technico-économiques d'Elevéo (Awé, Ciney). Pour satisfaire à cet objectif principal, le présent travail de fin d'études a été structuré autour de 4 sous-objectifs :

- Mise au point d'indicateurs annualisés de THI et THladj permettant de témoigner des périodes chaudes afin de pouvoir les relier aux données comptables qui sont par nature annualisées ;
- Etude de la variabilité spatio-temporelle des indicateurs THI et THladj ;
- Etude de l'impact moyen des indicateurs de THI et THladj sur les paramètres économiques des exploitations laitières wallonnes et recherche du point de rupture moyen ;
- Etude de la variabilité du point de rupture par ferme.

4. Matériels et Méthodes

L'ensemble des scripts de ce travail ont été écrits en langage Python à l'aide des bibliothèques « *Pandas* », « *Numpy* », « *Matplotlib.pyplot* », « *Statsmodels.formula.api* » et « *Datetime* » exécuté via l'interface Spyder (version 4.1.5) implémentée dans Anaconda Navigator.

4.1. Données

Les données technico-économiques utilisées dans le présent travail ont été collectées entre 2006 et 2018 par Elevéo (Awé, Ciney), au sein de 568 exploitations laitières wallonnes. Pour être considéré dans l'étude, chaque enregistrement devait avoir une adresse, provenir d'une exploitation ayant une année comptable complète et être lié à une exploitation laitière. Les valeurs potentiellement aberrantes ont été écartées en retirant les 1% des observations extrêmement hautes et basses. Le jeu de données ainsi nettoyé contenait 96.048 enregistrements.

Les exploitations étudiées sont majoritairement situées dans la partie Est et Sud de la Région wallonne (Figure 6). Le climat de la zone d'étude a été classé par Köppen-Geiger (2006) comme se situant dans la zone « Cfb », soit sous un « climat tempéré chaud, sans saison sèche mais avec un été tempéré ». Afin de refléter la situation financière des exploitations, seule la marge brute (MARGEVBT)⁷ et ses composantes que sont la valeur totale de production du lait (LAITVT)⁸, les frais de cheptel totaux (FRCHEPTVT)⁹ et les coûts d'alimentation (ALIMENTVT)¹⁰ ont été considérés dans cette étude. De plus, en raison de l'inflation annuelle, une correction a été apportée en multipliant ces données par un coefficient de conversion calculé à partir des indices de prix à la consommation et dont la base (Base = 100) est l'année 2018.

⁷ MARGEVBT : Valeur de la marge brute (Production totale moins les frais variables) divisé par le nombre de vaches traites présentes dans le troupeau laitier durant l'année comptable étudiée, exprimé en €/vache (Dalcq, 2020).

⁸ LAITVT : Valeur de la production de lait divisée par le nombre de vaches traites présentes dans le troupeau laitier durant l'année comptable étudiée, exprimé en €/vache (Dalcq, 2020).

⁹ FRCHEPTVT : Frais de cheptel totaux (insémination, vétérinaire, médicaments, litière, etc., à l'exception des coûts d'alimentation) destinés aux vaches traites divisé par le nombre de vaches traites présentes dans le troupeau laitier durant l'année comptable étudiée, exprimé en €/vache (Dalcq, 2020).

¹⁰ ALIMENVT : Achat d'aliments destinés aux vaches traites divisé par le nombre de vaches traites présentes dans le troupeau laitier durant l'année comptable étudiée, exprimé en €/vache (Dalcq, 2020).

Les données météorologiques sont issues quant à elles de 27 stations météorologiques incluses dans le réseau PameSeb du Centre Wallon de Recherches Agronomiques (CRA-W) et sont relatives à la température de l'air (T_{sa}) exprimée en °C, l'humidité relative de l'air (H_{ra}) exprimée en %, la pluviosité (Plu) exprimée en mm, le rayonnement (Ens) exprimé en J/cm^2 et la vitesse du vent (V_{vt}) exprimée en m/s (CRA-W/Réseau Pameseb, 2021). Les données aberrantes comme les données du rayonnement (Ens) inférieures à $19 J/cm^2$ ont été renseignées en données manquantes (Joukoff, 1991). Le fichier contenait 1.090.152 enregistrements. Sur base de ces données, le THI et le THladj ont été calculés en utilisant les formules de la NRC (1971) et de Mader *et al.* (2006) mentionnées précédemment dans l'état de l'art.

La formule de Mader *et al.* (2006) nécessitant d'employer le rayonnement horaire exprimé en W/m^2 , les données journalières enregistrées pour le rayonnement (Ens) par le réseau PameSeb ont été multipliées par le coefficient de conversion ($1W/m^2 = 0,11575 J/cm^2$) pour obtenir les données en W/m^2 .

Les données économiques sont annualisées vu qu'elles découlent des comptabilités de gestion. Cependant, le THI et le THladj sont exprimés sur base journalière. Par conséquent, afin de permettre la fusion de ces 2 sources d'information et afin de mieux refléter les périodes chaudes qui apparaissent pendant la saison culturale, les données relatives au THI et THladj ont été collationnées sur une période s'étalant du 1^{er} avril au 30 septembre en estimant des paramètres statistiques comme la moyenne (c'est-à-dire THI_{moy} et $THladj_{moy}$) et le 3^{ème} quartile (c'est-à-dire THI_{quart3} et $THladj_{quart3}$). En effet, comme le soulignent Zamani *et al.* (2016), ce semestre est un bon indicateur du stress thermique en conditions climatiques chaudes ainsi que de sa sévérité durant une année. Le recours à l'estimation de la moyenne correspond à une vision moyenne du stress vécu pendant la période culturale tandis que le 3^{ème} quartile reflète plus les valeurs extrêmes subies. Le minimum et le premier quartile n'ont pas été intégrés dans la suite de l'étude vu qu'ils ne sont aucunement liés aux situations de stress thermique apparaissant en conditions climatiques chaudes. Le maximum a également été mis de côté afin d'éviter la surestimation de la situation réelle du stress thermique.

La fusion des données a pu être réalisée en affectant les données mesurées dans la station météorologique la plus proche de l'exploitation laitière étudiée. Pour se faire, la méthode de Voronoi a été employée à l'aide du logiciel « *Système d'Information Géographique Libre* »

(QGIS, version 3.8). Ainsi, chacune des exploitations laitières initialement géolocalisées via l'application en ligne « *OpenStreetMap* »¹¹ a été affiliée à une station météorologique (Figure 6). Les polygones dessinés autour des stations dans les Figures 6 et 7 représentent leurs aires d'influence estimées par la méthode de Voronoi.

Le logiciel QGIS a également été utilisé comme outil de visualisation dans ce travail. La base de données fusionnées contenait 149.839 données issues de 549 exploitations laitières.

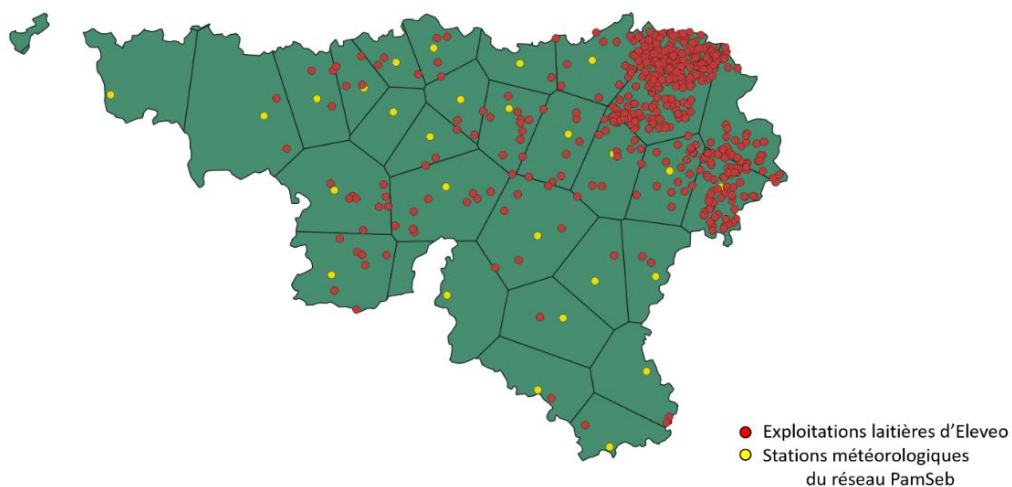


Figure 6 : Carte de la Région wallonne situant les exploitations laitières reprises par Elevéo (Awé, Ciney) et les stations météorologiques les plus proches du réseau PameSeb (CRA-W/Réseau Pameseb, 2021) définie par le polygone de Voronoi.

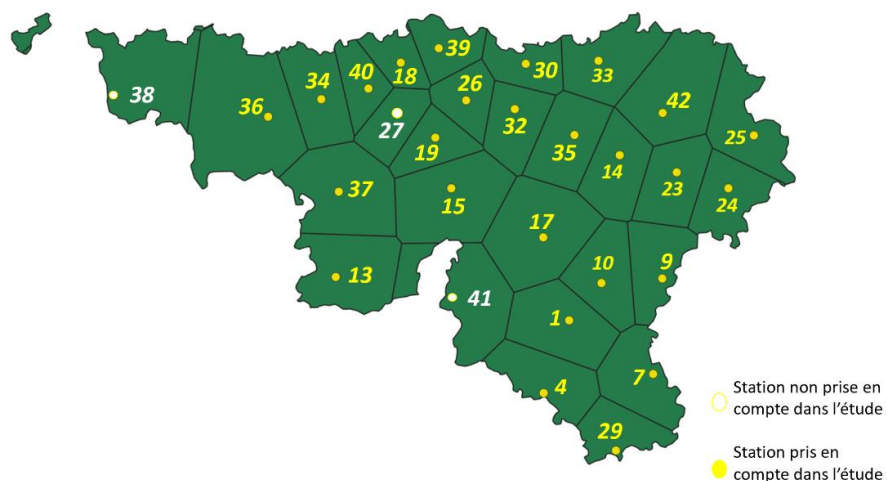


Figure 7 : Carte du réseau PameSeb du Centre de Recherche Agronomique wallon indiquant l'emplacement des différentes stations météorologiques (CRA-W/Réseau Pameseb, 2021) et leur aire d'influence définie par les polygones de Voronoi.

¹¹ OpenStreetMap, 2020. <https://maps.open-street.com/gui/>

Des statistiques descriptives ont été calculées sur ces données et la variabilité temporelle a également été illustrée au moyen de représentations de type Boxplot : le premier et le troisième quartile sont les extrémités de la boîte tandis que les moustaches fixées par défaut estiment 99% de la variabilité, soit 1,5 fois l'écart interquartile ; la médiane est quant à elle représentée sous la forme d'un trait plein. La variabilité spatiale des données météorologiques a été illustrée de la même manière.

4.2. Impact du THI et THladj sur les paramètres économiques et recherche du point de rupture moyen

L'analyse de l'effet du THI et THladj sur les paramètres économiques des exploitations a été effectuée en utilisant la régression suivante :

$$Y = \mu + CFERME + \beta_1 \times Indicateur + \beta_2 \times Indicateur^2 + \varepsilon$$

Où Y correspond à la donnée économique (LAITVT, FRCHEPTVT, ALIMENTVT et MARGEBVT), μ représente l'intercept de la régression, $CFERME$ est l'effet fixe lié à la ferme étudiée, β_1 et β_2 sont, respectivement, les coefficients de régression linéaire et quadratique liés à l'indicateur étudié (c'est-à-dire THI ou THladj sous forme de moyenne ou de 3^{ème} quartile), et ε représente le résidu. L'effet fixe $CFERME$ a également été utilisé par Gantner *et al.* (2011) et Bernabucci *et al.* (2014) pour leurs études. Cependant, contrairement à ces auteurs qui considéraient l'effet du THI comme un facteur fixe, l'effet du THI a été apprécié par l'emploi d'une composante linéaire et quadratique à cause de la taille restreinte du jeu de données de la présente étude. Le coefficient de régression a été estimé afin de connaître la part de la variabilité des indicateurs du THI et THladj expliquée par le modèle. Les p-valeurs ont été estimées pour évaluer la significativité des coefficients de régression β_1 et β_2 . En effet, si la p-valeur est supérieure à 5%, cela signifie que le coefficient de régression n'est pas significativement supérieur à 0 et donc que l'effet du THI ou THladj est inexistant. A partir de l'intercept, de la moyenne des solutions pour l'effet fixe $CFERME$ ainsi que de la valeur des coefficients de régression β_1 et β_2 , une représentation théorique de l'évolution des paramètres économiques en fonction de 4 indicateurs étudiés a été réalisée. Cette

représentation théorique a permis de mettre en évidence le point de rupture, c'est-à-dire l'endroit où on peut observer un changement dans le comportement de la courbe.

Afin d'estimer au mieux l'effet fixe lié à la ferme (*CFERME*), seules les exploitations ayant un minimum de 4 observations comptables ont été conservées pour cette partie de l'étude. Cela représentait 275 exploitations laitières, soit 50% des exploitations étudiées.

4.3. Estimation du point de rupture par ferme

Compte tenu des sources de variation endogènes et exogènes du stress thermique mentionnées précédemment dans l'état de l'art, il est attendu que le point de rupture pourrait être différent d'une exploitation à l'autre. Par exemple, celles-ci pourraient avoir plus d'espaces d'ombrage ou encore avoir des races moins productivistes. Ainsi, de manière similaire à l'étude menée pour estimer le point de rupture moyen, une régression faisant intervenir une composante linéaire et quadratique pour les indicateurs THI et THIadj a été utilisée. La seule différence réside dans l'absence de l'effet fixe *CFERME* comme dans ce cas, seules les données relatives à une seule exploitation laitière ont été utilisées. Pour effectuer cette analyse, seules les fermes ayant au moins 8 années comptables, soit au moins 60 % de la période d'étude, ont été étudiées. En tout, 143 exploitations laitières respectaient cette nouvelle condition.

Finalement, à partir des résultats obtenus et afin d'affiner la réflexion, un profil d'exploitation dite « intensive » et celui d'une exploitation dite « extensive » ont été échantillonnés dans le but de permettre la comparaison entre ces deux stratégies de gestion évoluant entre les deux extrêmes définis par le gradient d'intensification développé par Dalcq (2020).

Dans un souci de respect de la confidentialité des données spécifiques aux deux exploitations étudiées, celles-ci ont été nommées « *Ferme I* » pour le profil de l'exploitation dite « intensive » et « *Ferme E* » pour le profil de l'exploitation dite « extensive ».

5. Résultats et discussion

5.1. Variabilité temporelle

5.1.1. Des données météorologiques

Tout d'abord, concernant la variabilité spatiale de la température de l'air dans les différentes stations météorologiques du réseau PameSeb, il semble qu'en général, la Tsa moyenne mesurée oscille aux alentours des 15°C durant la saison culturale, à l'exception des stations 23, 24 et 25 (situées sur les communes belges de Saint-Vith, Trois-Ponts et Butgenbach respectivement, soit dans les Cantons de l'Est). En effet, ces trois stations montrent qu'elles mesurent une différence moyenne de Tsa de 2 à 3 °C en-dessous des autres stations du réseau PameSeb. L'IRM (2021) confirme cette différence moyenne en raison du relief géologique belge. Cela démontre dès lors une variabilité spatiale très hautement significative (p -valeur $< 0,001$) et de fait, une influence des conditions climatiques locales sur l'exploitation agricole.

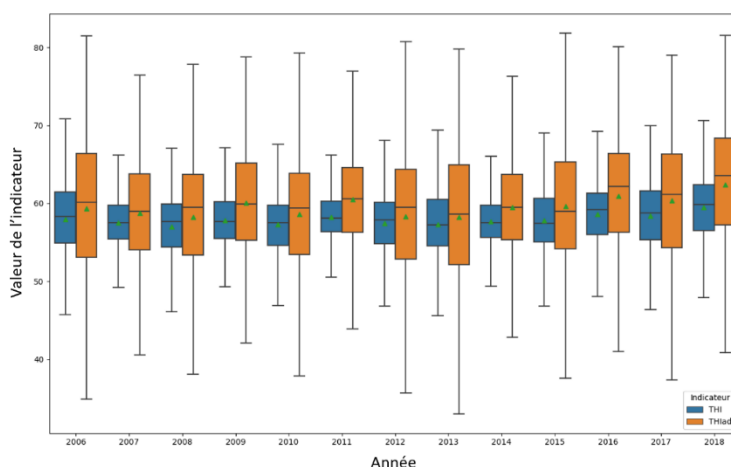


Figure 8 : Evolution temporelle de la variabilité du THI et du THladj sous forme de Boxplot pour la saison culturale, où leur médiane est représentée par le trait plein noir tandis que leur moyenne correspond au triangle vert.

Ensuite, on peut observer que la valeur moyenne du THI (moyennée à l'année) au cours de la période étudiée entre 2006 et 2018, oscille entre 57,04 (la valeur moyenne la plus basse, en 2008) et 59,46 (la valeur moyenne la plus haute, en 2018) alors que sur cette même période, la valeur moyenne du THladj oscille entre 58,23 (la valeur moyenne la plus basse, en

2008) et 62,43 (la valeur moyenne la plus haute, en 2018) (Figure 8). Néanmoins, elles demeurent sous le seuil de 62 (pour le THI) et de 64 (pour le THladj), fixé par Hammami *et al.* (2013), dû au fait que la moyenne générale lisse les résultats obtenus.

Cependant, l'évolution temporelle des indicateurs calculés montre que 2018 a été l'année la plus impactée par le stress thermique. En effet, 25 % des données pour le THI étaient supérieures à 62,38 et cela empire avec le THladj où près de 50% des données outrepassaient le seuil pendant la période culturale.

En outre, les années de 2006, 2016 et 2017 ont également une situation préoccupante car les THI_{quart3} calculés sont juste en-dessous du seuil de 62 : soit à 61,47 ; 61,32 et 61,53 respectivement. Lorsque l'on examine le THladj, cette situation s'aggrave puisque le $THladj_{\text{quart3}}$ de la majorité des années de la période étudiée surpasse le seuil de 64, à l'exception de quatre années (2007, 2008, 2010 et 2014) dont le $THladj_{\text{quart3}}$ se situe juste en-dessous du seuil fixé : soit à 63,78 ; 63,74 ; 63,83 et 63,74 respectivement. Le nombre de jours présentant un stress thermique sur base du seuil de THI est, en moyenne, de 26,89 jours tandis que sur base du THladj, on en dénombre 51,76 jours . Il y a dès lors 93 % en plus de jours décelés comme dépassant le seuil si on prend le THladj. Tous ces résultats confirment la plus grande variabilité du THladj comparé au THI.

Les bovins laitiers ont donc effectivement souffert de stress thermique pendant la période d'étude du présent travail. En plus, Shock *et al.* (2016) et Ouellet *et al.* (2019) ont démontré qu'il existe une différence moyenne de 3 à 4 unités de THI entre les données relevées par les stations météorologiques et les conditions réelles relevées à l'intérieur d'une étable. De cette manière, le nombre de jours décelés par le THI outrepassant le seuil est de 69,42 jours (en réduisant de 3 unités) et de 85,97 jours (en réduisant de 4 unités), soit 158 et 220 % en plus qu'initialement. Le stress thermique subi peut dès lors être amplifié avec la stabulation à l'intérieur de l'étable. En effet, la forme et les spécificités des bâtiments agricoles influencent les conditions thermiques (Deng *et al.*, 2015; Ji *et al.*, 2020). Malgré cela, l'ombrage créé par ces derniers reste la plus simple approche pour réduire partiellement (Gaughan *et al.*, 2010) la chaleur émanant des radiations solaires (Renaudeau *et al.*, 2012; Sejian *et al.*, 2018). Ainsi, d'autres alternatives réduisant l'impact du stress thermique ont été développées (Renaudeau *et al.*, 2012) pour pallier aux défauts des ombrages artificiels. Pourtant, dans la majorité des

régions tempérées, les exploitants laitiers recourent peu à l'usage d'alternatives de refroidissement en comparaison des éleveurs des régions chaudes (Hammami *et al.*, 2013).

Finalement, la théorie que le THladj serait un indicateur préférentiel pour les régions tempérées, soutenue par Hammami *et al.* (2013), permet d'apprécier une plus grande variabilité. De plus, Yan *et al.* (2020) ont constaté que le THladj semble avoir une meilleure efficacité prédictive que le THI au vu des corrélations obtenues dans leur étude pour certaines réponses physiologiques. Ainsi, l'ajout de paramètres environnementaux tels que la vitesse de l'air et le rayonnement solaire permet donc d'accroître la performance de l'indice THladj à quantifier le stress thermique de l'animal (Wang *et al.*, 2018; Ouellet *et al.*, 2019). En plus, l'usage du THladj supprime la limite théorique du THI considérant que les animaux sont élevés à l'intérieur vu qu'il n'intègre pas le mouvement de l'air ni le rayonnement solaire (Li *et al.*, 2009) et donc, s'oriente principalement sur les bovins laitiers élevés à l'extérieur (mis en pâture) durant la période étudiée (Ouellet *et al.*, 2019).

5.1.2. Des paramètres économiques

5.1.2.1. Marge brute par vache (MARGE BVT)

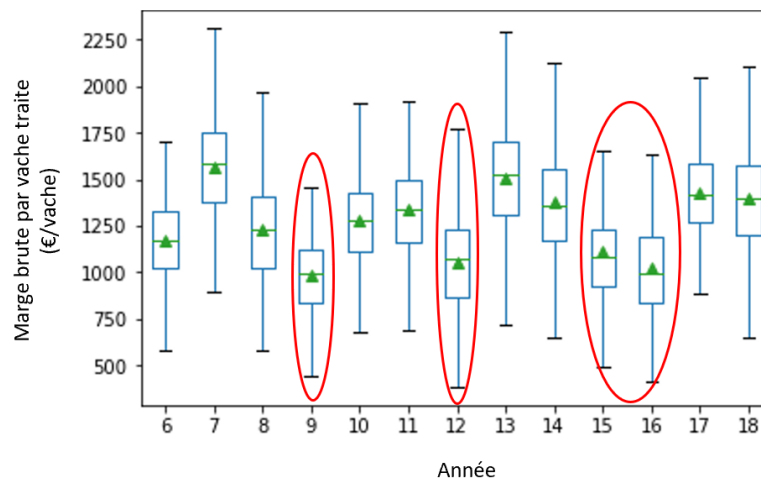


Figure 9 : Evolution temporelle de la variabilité de la marge brute par vache traite, exprimée en €/vache, sous forme de Boxplot où la médiane est représentée par le trait plein vert tandis que la moyenne correspond au triangle vert. Les périodes de crises du secteur du lait sont identifiées par un ovale rouge.

La valeur moyenne de MARGE BVT estimée entre 2006 et 2018 oscille entre 986,65 €/vache (la valeur moyenne la plus basse, en 2009) et 1.569,21€/vache (la valeur moyenne la

plus haute, en 2007) (Figure 9). De plus, on distingue nettement que les années 2009, 2012, 2015 et 2016 présentent une réduction de leur valeur moyenne par rapport aux autres exercices comptables. En effet, ces dernières sont donc impactées négativement par la faible valeur de LAITVT, elle-même handicapée par les crises successives du secteur laitier. En revanche, des années comme 2007 et 2013 compensent avec des valeurs de MARGEVT plutôt élevées au regard de leur premier quartile débutant à 1.379,13 et 1.305,81 €/vache respectivement. Ces bons résultats sont portés par l'importante hausse de LAITVT malgré l'accroissement des coûts variables.

L'amplitude illustrée est assez conséquente allant de moins de 500 €/vache à plus de 2.250 €/vache. Comme le soulignent Chapaux *et al.* (2013), la marge brute tend à croître avec le niveau de production des exploitations laitières. Ainsi, l'auteur montre une différence significative de la marge brute entre les exploitations laitières moins productives (moins de 6.000 kg de lait) et les plus productives (plus de 10.000 kg de lait). Dalcq (2020) démontre également que la MARGEVT est significativement supérieure pour les producteurs intensifs par rapport aux producteurs extensifs mais souligne qu'en raison du contexte socio-économique actuel, la viabilité économique s'avère semblable entre les deux systèmes de production. En effet, comme stipulé précédemment, les exploitations plus productives nécessitent de plus amples quantités d'aliments pour nourrir leur bétail et aussi, plus de frais d'élevage engendrés par une gestion assez poussée du troupeau (Lebacqz *et al.*, 2015). De ce fait, les frais variables engagés concourent à être plus élevés pour les exploitations intensives que pour les exploitations extensives et conduisent à impacter plus négativement la MARGEVT résultante (Britt *et al.*, 2018).

Le postulat fait par Chapaux *et al.* (2013) et Dalcq (2020) semble se confirmer dans les résultats obtenus dans le présent mémoire comme l'illustre la Figure 10. On peut dès lors observer que la MARGEVT des exploitations intensives est supérieure à celles des exploitations extensives mais que l'écart entre les deux se réduit. Du coup, comme le relèvent Alvarez *et al.* (2008) et Dalcq (2020) dans leurs études respectives, malgré le plus faible niveau de production, les exploitations extensives pourraient devenir autant génératrices de revenus que les exploitations intensives.

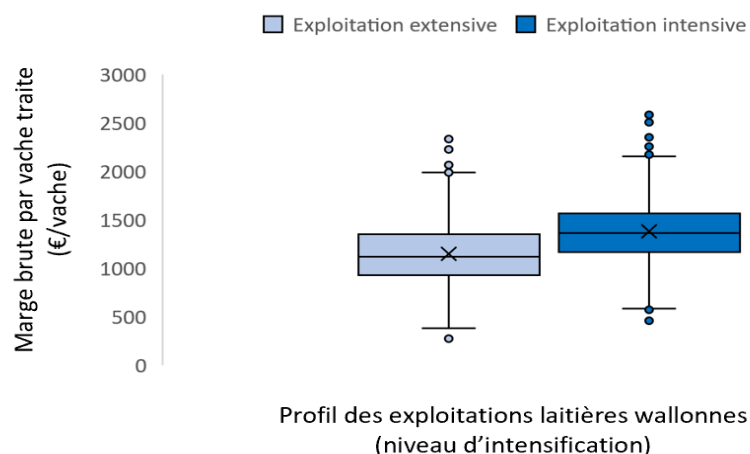


Figure 10 : Boîte à moustaches représentant la variabilité des marges brutes par vache traite, exprimée en €/vache, pour les exploitations extensives et les exploitations intensives repris par la base de données technico-économiques d'Elevéo.

Finalement, la volatilité de la MARGEBVT figure être un bon indicateur de la situation économique de l'exploitation comme le défendaient Hill *et al.* (2008) et Briguglio *et al.* (2009). Cet indicateur permet dès lors de quantifier la rentabilité ainsi que la viabilité et de fait, conduire à l'analyse de la résilience économique de l'exploitation (Van Calker *et al.*, 2015). Néanmoins, il est vrai qu'il reste un indicateur complexe vu qu'il est influencé à la fois positivement par la valeur de production (O'Brien *et al.*, 2015) et négativement par les coûts de production, eux-mêmes influencés par la volatilité des prix du marché mondial (Britt *et al.*, 2018). Malgré cela, sa vision globalisante reste un sérieux atout pour l'étude de la problématique de résilience des exploitations laitières wallonnes.

5.1.2.2. Valeur de production du lait (LAITVT)

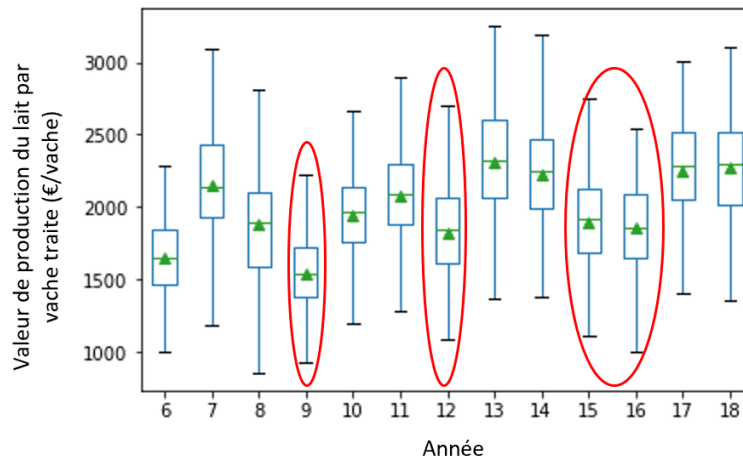


Figure 11 : Evolution temporelle de la variabilité de la valeur de production du lait par vache traite, exprimée en €/vache, sous forme de Boxplot où la médiane est représentée par le trait plein vert tandis que la moyenne correspond au triangle vert. Les périodes de crise du secteur lait sont identifiées par un ovale rouge.

La valeur de LAITVT au cours de la période étudiée entre 2006 et 2018, oscille entre 1.536,70 €/vache (la valeur moyenne la plus basse, en 2009) et 2.307,59 €/vache (la valeur moyenne la plus haute, en 2013) (Figure 11). De plus, on peut remarquer que les années 2009, 2012, 2015 et 2016 présentent une réduction de la valeur moyenne par rapport aux autres exercices comptables. En effet, celles-ci ont été fortement impactées par les crises successives (explicitées précédemment dans l'état de l'art) que le secteur laitier a subi en une décennie. En revanche, les années suivant ces dernières (2010, 2013, 2017) montrent un net accroissement de la valeur de production de lait par vache traite. Ainsi, les bons résultats de 2010 et 2017 ont été principalement influencés par la hausse du prix du beurre (SPF Economie, 2014; FranceAgriMer, 2017) tandis que l'année 2013 a été portée par la flambée des prix entraînée par l'épuisement des stocks stratégiques publics des produits laitiers de l'Union européenne (FAO, 2007; Agritrade, 2013).

L'amplitude de LAITVT est assez conséquente allant de moins de 1.000 €/vache à plus de 3.000 €/vache. Cette nette différence entre les valeurs minimales et maximales ne peut pas s'expliquer uniquement par la volatilité des prix des produits laitiers.

La variabilité en hausse des volumes de lait produit par vache entre les exploitations wallonnes peut également être attribuée comme cause. Réellement, les quantités moyennes

de lait standard produit par vache moyennées sur une année comptable ont cru entre 2006 et 2018, passant de 6.968,32 à 7.581,41 litres, soit une hausse moyenne de 9%. De ce fait, les résultats peuvent découler, en partie, du choix de la race et de son amélioration génétique (García-Ruiz *et al.*, 2016). En effet, la population de vaches laitières étudiées est composée assez majoritairement des vaches de la race Holstein (à hauteur de 76% de la population étudiée pour les Holstein Pie noire et de 19% pour les Holstein Pie rouge). Or, ces races à haut rendement laitier sont très sensibles et suivent dès lors une relation antagoniste entre la tolérance au stress thermique et la production (Bernabucci *et al.*, 2014; Carabaño *et al.*, 2014, 2019; Amamou *et al.*, 2019). Partant de ce constat et au regard des nombreux jours de stress thermique décelés par le THI et le THladj, il apparaît plutôt que l'apport massif d'aliments complétant la mise en pâture (Shalloo *et al.*, 2004; Hanrahan *et al.*, 2018) soit le facteur assurant cette hausse des volumes produits. En effet, on relève une légère hausse des volumes moyennés sur une année comptable de la production de lait standard par vache en été, passant de 3.457,47 (2006) à 3.657,85 (2018), soit une augmentation moyenne de 6%. A contrario, la quantité moyenne de lait produite à partir de fourrages en été, par vache laitière traite, reste constante, oscillant autour des 2.100 litres.

Par conséquent, malgré le fait que Morkūnas *et al.* (2018) soutiennent l'étude de la volatilité de la production comme indicateur de la résilience économique, l'analyse de LAITVT semble être trop limitante pour apprécier la résilience étant donné que la productivité permet bien une hausse du chiffre d'affaires mais pas forcément du revenu. Dès lors, l'étude des coûts et de la marge brute semblent être nécessaire pour parvenir à quantifier la sensibilité des exploitations laitières wallonnes. Cependant, un approfondissement au niveau des volumes de lait au cours des périodes chaudes reste nécessaire pour statuer de la variabilité des quantités produites en été, sans être influencée par le prix changeant du lait.

5.1.2.3. Coûts de productions variables

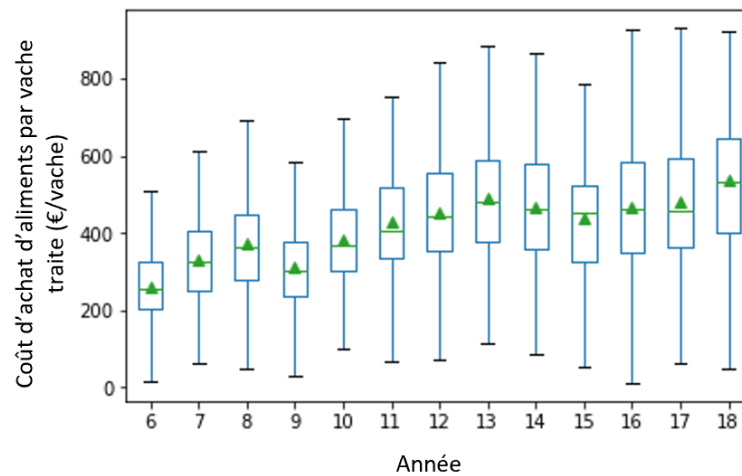


Figure 12 : Evolution temporelle de la variabilité du coût d'achat d'aliments par vache traite, exprimée en €/vache, sous forme de Boxplot où la médiane est représentée par le trait plein vert tandis que la moyenne correspond au triangle vert.

Concernant le coût d'achats d'aliments par vache traite (ALIMENTVT), l'évolution temporelle des mesures moyennées sur une année comptable (Figure 12) montre une hausse significative des coûts d'achats d'aliments. Celle-ci peut être scindée en deux parties distinctes : la première partie, de 2006 à 2013, démontre une forte croissance des ALIMENTVT en passant d'une valeur moyenne de 262,10 à 489,79 €/vache. Seule l'année 2009 atteste d'une baisse d'ALIMENTVT par rapport aux autres exercices comptables, assurément à la suite de la crise du lait. Or, pour la seconde partie, de 2013 à 2018, celle-ci présente plutôt un plateau avec une très légère pente croissante oscillant entre les valeurs moyennes de 489,79 €/vache (2013) et 539,10 €/vache (2018). Du coup, ALIMENTVT a subi une hausse moyenne de 106% au cours de l'ensemble de la période étudiée.

De ce fait, l'ALIMENTVT a été classé comme le premier et plus important poste de dépenses sur l'ensemble des charges de l'exploitation laitière (SPW, 2020).

L'amplitude illustrée démontre un accroissement non négligeable de la variabilité d'ALIMENTVT à partir de 2012 : si l'extrémité de la moustache inférieure du boxplot tend vers moins de 100 €/vache, au contraire, l'extrémité de la moustache supérieure du boxplot surpasse les 800 €/vache. En prime, on peut également remarquer que l'espace interquartile, a augmenté outrepassant les 200 €/vache d'écart dès 2012.

Par conséquent, les exploitations représentées par la moustache inférieure se seraient plutôt orientées vers l'autonomie alimentaire de leur cheptel afin de réduire l'ALIMENTVT (Jamar *et al.*, 2013). A l'opposé, les fermes décrites par la moustache supérieure pourraient avoir fait le choix de recourir continuellement à l'achat d'aliments pour compléter l'alimentation de leur troupeau et, de ce fait, elles sont plus sujettes à la hausse d'ALIMENTVT (Shalloo *et al.*, 2004; Hanrahan *et al.*, 2018). De surcroît, une partie des aliments achetés est souvent majoritairement importée hors des frontières de l'Union européenne. Cela conduit à une certaine vulnérabilité du secteur laitier face à la volatilité des prix sur le marché mondial et à l'instabilité d'approvisionnement (Johnston *et al.*, 2019).

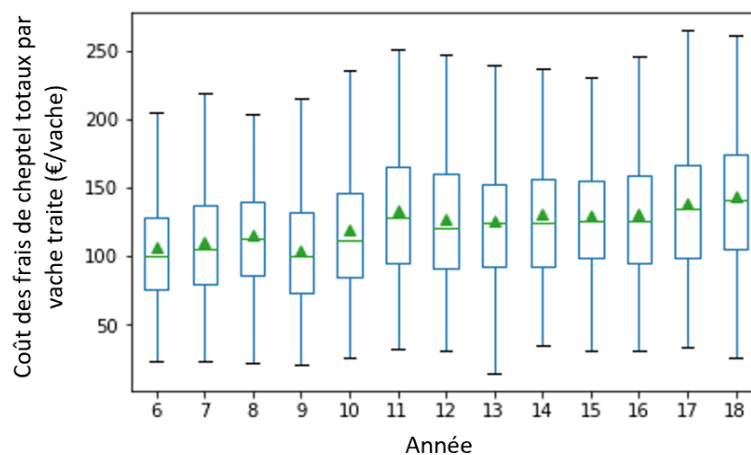


Figure 13 : Evolution temporelle de la variabilité du coût des frais de cheptel totaux par vache traitée, exprimée en €/vache, sous forme de Boxplot où la médiane est représentée par le trait plein vert tandis que la moyenne correspond au triangle vert.

Ensuite, la valeur moyenne de FRCHEPTVT entre 2006 et 2018 oscille de 103,38 €/vache (la valeur moyenne la plus basse, en 2009) à 143,95 €/vache (la valeur moyenne la plus haute, en 2018) (Figure 13). Il apparaît que les FRCHEPTVT croissent au cours de la période d'étude, soit une augmentation de 39% entre ces deux valeurs.

A cela s'ajoute une variabilité accrue des mesures représentées par la moustache supérieure du boxplot dont l'extrémité passe le cap des 250 €/vache en 2017 et en 2018. On observe dans une moindre mesure l'accroissement de la variabilité des mesures représentées par la moustache inférieure du boxplot. De ce fait, les FRCHEPTVT ont été classés comme la quatrième plus importante dépense sur l'ensemble des charges de l'exploitation laitière (SPW, 2020). Ce poste de dépenses n'est donc pas à négliger vu qu'il a été démontré que le stress

thermique influençait négativement l'état général de l'animal (de Andrade Ferrazza *et al.*, 2017).

En fin de compte, l'analyse des coûts proposée par Carter *et al.* (2007) et Béné (2013) s'avère intéressante pour évaluer la résilience des exploitations laitières wallonnes. Les coûts suggèrent dès lors une importante variabilité entre les fermes et permettent de supposer que la stratégie des exploitations étudiées se situe entre les deux extrêmes définis par le gradient d'intensification développé par Dalcq (2020).

5.2. Impact du THI et THladj sur les paramètres économiques

Compte tenu de la variabilité mesurée des paramètres économiques, il est soupçonnable qu'une faible part de cette variabilité pourrait être imputable aux indicateurs THI et THladj. En plus, selon Bernabucci *et al.* (2014), il existe une relation entre la donnée environnementale (les indicateurs THI et THladj dans cette étude) et la réponse à ce paramètre. C'est pourquoi les auteurs soutiennent l'idée de préciser cette relation grâce des points de rupture. Ce point de rupture, également nommé seuil, indique le passage de conditions environnantes favorables pour les bovins laitiers vers des conditions plutôt défavorables pour ces derniers. Pour ce faire, une analyse de l'effet du THI et THladj sur les paramètres économiques des exploitations a été effectuée en utilisant la régression avec l'effet fixe *CFERME* présentée dans le matériel et méthode.

Le Tableau 2 reprend les résultats des modèles construits pour THI et THladj à savoir les p-valeurs estimées pour les coefficients de régression β_1 et β_2 ainsi que le coefficient de détermination (R^2) témoignant de la part de la variabilité de Y expliquée par le modèle. Ainsi, on note que les coefficients de régression linéaire et quadratique de MARGEBVT, ALIMENTVT et LAITVT sont très hautement significatifs pour tous les indicateurs de THI et THladj étudiés. Ces coefficients de régression sont donc significativement différents de 0 confirmant que la relation liant ces paramètres économiques aux indicateurs de THI et THladj mêle effectivement une composante linéaire et quadratique. Pour FRCHEPTVT, les relations linéaire et quadratique sont uniquement très hautement significatives pour THI_{moy} . Pour THI_{quart3} et

THIadj_{moy}, les coefficients de régression de FRCHEPTVT sont juste significatifs tandis que pour le THIadj_{quart3}, ils sont non différents de 0 vu que les p-valeurs sont supérieures à 0,05.

Les coefficients de détermination (R^2) sont assez élevés. Le R^2 est supérieur pour les coûts variables (ALIMENTVT et FRCHEPTVT) comparé au LAITVT, qui est supérieur à celui de la MARGE BVT. Cela suggère que les changements de THI et THIadj expliqueraient plus les coûts variables. Or, ces valeurs de R^2 doivent être critiquées car si une faible part de la variabilité des paramètres économiques étudiés pourrait effectivement être imputable aux indicateurs ciblés, l'autre part pourrait être plus liée à des facteurs confondants (c'est-à-dire à des facteurs influençant à la fois la variable dépendante et les variables explicatives). En effet, il y a par exemple, un lien entre le changement d'alimentation du bétail et les conditions météorologiques.

Tableau 2 : Synthèse des p-valeurs et du coefficient de détermination des modèles de régression entre les indicateurs et les paramètres économiques.

Indicateur	Paramètres économiques	P-valeur de β_1	P-valeur de β_2	Coefficient de détermination : R^2
THI_{moy}	MARGE BVT	< 0.001	< 0.001	0.501
	LAITVT	< 0.001	< 0.001	0.612
	ALIMENTVT	< 0.001	< 0.001	0.690
	FRCHEPTVT	<0.001	< 0.001	0.752
THI_{quart3}	MARGE BVT	< 0.001	< 0.001	0.515
	LAITVT	< 0.001	< 0.001	0.620
	ALIMENTVT	< 0.001	< 0.001	0.694
	FRCHEPTVT	< 0.05	< 0.05	0.752
THIadj_{moy}	MARGE BVT	< 0.001	< 0.001	0.502
	ALIMENTVT	< 0.001	< 0.001	0.687
	LAITVT	< 0.001	< 0.001	0.609
	FRCHEPTVT	< 0.05	< 0.05	0.751
THIadj_{quart3}	MARGE BVT	< 0.001	< 0.001	0.510
	LAITVT	< 0.001	< 0.001	0.613
	ALIMENTVT	< 0.001	< 0.001	0.691
	FRCHEPTVT	>0.05	>0.05	0.750

A partir des solutions des modèles de régression développés, il a été possible de faire des représentations théoriques de l'évolution des paramètres économiques étudiés en fonction des indicateurs de THI et THIadj (Figure 14). L'inspection visuelle de ces graphiques a permis de déceler aisément les points de rupture.

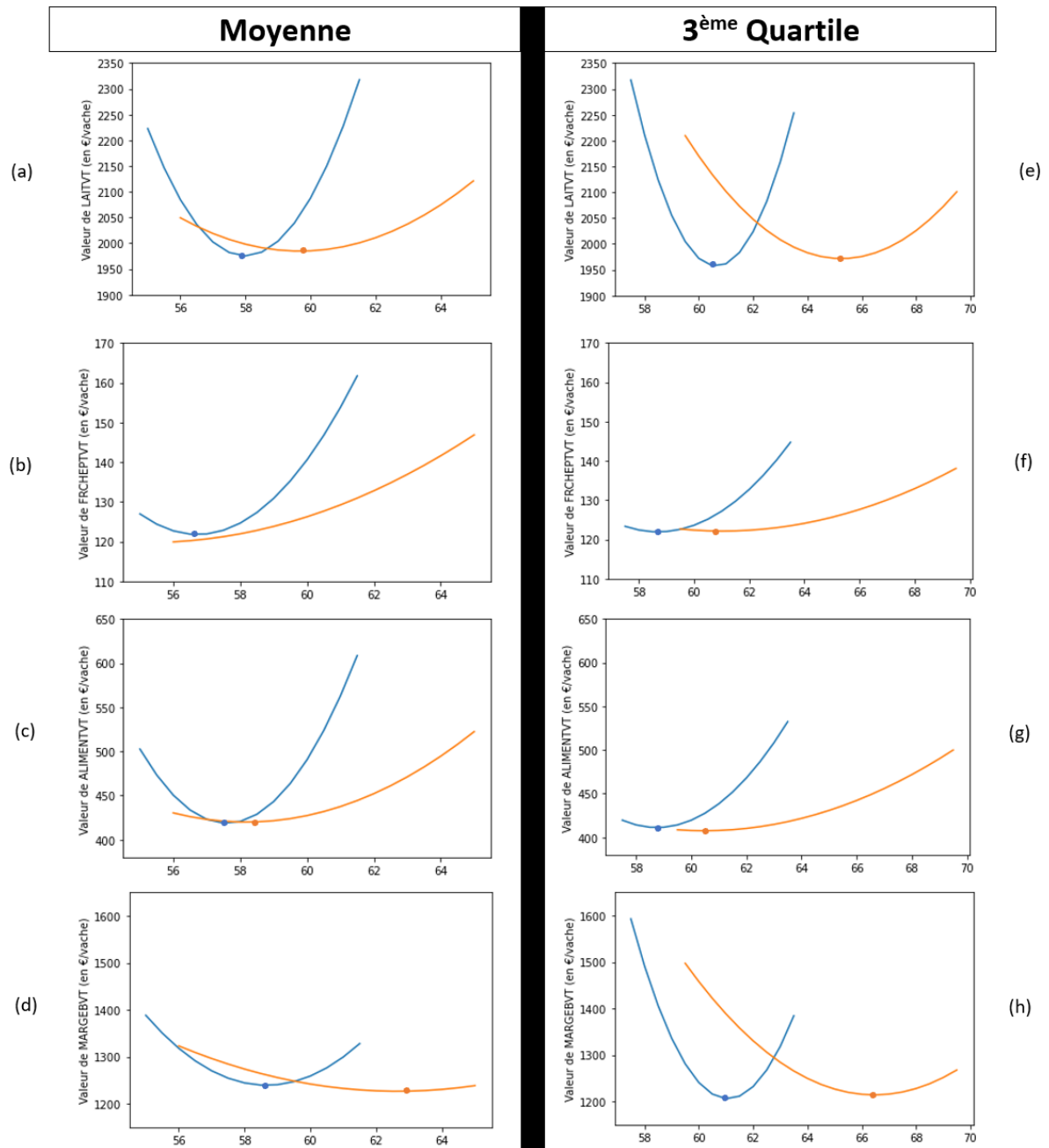


Figure 14 : Evolution théorique de LAITVT (a et e), FRCHEPTVT (b et f), ALIMENTVT (c et g) et MARGEBVT (d et h) en fonction des indicateurs de THI (en bleu) et de THIadj (en orange). Le point de rupture équivalent au point d'inflexion est illustré par un point.

Premièrement, la représentation de l'évolution théorique pour un paramètre économique donné n'est ni strictement une représentation linéaire, ni strictement une représentation quadratique, il s'agit plutôt d'une représentation nécessitant à la fois les coefficients de régression linéaire et quadratique. D'ailleurs, elles expriment chacune des réalités bien distinctes compte tenu des différentes zones de rupture clairement visibles, sauf pour

FRCHEPTVT avec $THI_{adj_{moy}}$ (Figure 14 b) où le point de rupture n'est pas inclus dans l'intervalle d'étude (Annexe 1). Les points de rupture illustrés en Figure 14 pourraient être considérés comme un nouveau seuil spécifique au paramètre économique étudié pour une exploitation. Il est normal que ces seuils changent car la littérature sur les seuils de THI et THI_{adj} ne se basaient que sur des observations liées à la vache et plus spécifiquement, à la production.

Concernant le THI, que ce soit avec la THI_{moy} et le THI_{quart3} , chacune des courbes théoriques (LAITVT, FRCHEPTVT, ALIMENTVT et MARGEBVT) montre que leur point de rupture se situe au niveau de la zone thermoneutrale des bovins laitiers étant donné qu'ils sont décelés avant le seuil fixé à 62 par Hammami *et al.* (2013). On peut donc scinder ces courbes théoriques en deux catégories distinctes : la première regroupant celles dont le point de rupture est aux environs de 58 (inférieur à 60) (les courbes théoriques de LAITVT, de FRCHEPTVT, d'ALIMENTVT et de MARGEBVT avec le THI_{moy} (Figure 14 a ; 14 b ; 14 c ; 14 d) et les courbes théoriques de FRCHEPTVT et d'ALIMENTVT avec le THI_{quart3} (Figure 14 f ; 14 g)) et la seconde centralisant celles dont le point de rupture est compris entre 60 et 62 (les courbes théoriques de LAITVT et de MARGEBVT avec le THI_{quart3} (Figure 14 e ; 14 h)). Si la première catégorie ne semble dépasser aucun des seuils définis dans la littérature actuelle, la seconde catégorie outrepassé le seuil de 60 retenu pour le climat tempéré en Allemagne (Brügemann *et al.*, 2011; Gorniak *et al.*, 2014; Lambertz *et al.*, 2014).

En revanche, pour le THI_{adj} , seules les courbes théoriques de $THI_{adj_{moy}}$ et du $THI_{adj_{quart3}}$ d'ALIMENTVT (Figure 14 c ; 14 g), la courbe théorique du $THI_{adj_{quart3}}$ de FRCHEPTVT (Figure 14 f) ainsi que la courbe théorique de LAITVT avec le $THI_{adj_{moy}}$ (Figure 14 e) montrent que le point de rupture s'établit sous le seuil fixé à 64 par Hammami *et al.* (2013). Effectivement, les courbes prédictives de LAITVT et de la MARGEBVT avec le $THI_{adj_{quart3}}$ démontrent une avancée du point de rupture, se positionnant après le seuil. De ce fait, il apparaît que le seuil d'Hammami *et al.* (2013) reste majoritairement valide, à l'exception de LAITVT et de la MARGEBVT avec le $THI_{adj_{quart3}}$. Or, à l'heure actuelle, le THI_{adj} n'admet qu'un autre seuil de 74 défini initialement par Mader *et al.* (2006). De plus, comme le soulignent Hammami *et al.* (2013), le seuil de Mader *et al.* (2006) s'appuie sur les conditions climatiques du Nebraska (USA) et non aux conditions des régions tempérées de l'Europe occidentale. Il est dès lors complexe d'imaginer l'intégration de ce seuil dans notre étude basée sur les conditions climatiques tempérées de la Région wallonne.

Par conséquent, dans cette zone thermoneutrale, les conditions climatiques relevées au cours de la saison culturale sont favorables à une bonne productivité. De cette façon, la prédiction de la valeur LAITVT (Figure 14 a ; 14 e) tend à descendre en dessous des 2.000 €/vache, accentuée par la volatilité des prix. En outre, il n'est pas nécessaire d'obligatoirement compléter la ration des bêtes mises en pâturage. D'ailleurs, les courbes théoriques d'ALIMENTVT (Figure 14 b ; 14 f) illustrent la situation et de fait, montrent un coût d'achats d'alimentation atteignant un peu plus de 400 €/vache, que ce soit pour le THI et le THladj. Par ailleurs, on peut également remarquer que pour les deux indicateurs, les FRCHEPTVT (Figure 14 b ; 14 f) semblent osciller aux alentours de 125 €/vache en moyenne. Pour finir, la MARGEVT est influencée à la fois positivement par LAITVT (O'Brien *et al.*, 2015) et négativement par ALIMENTVT (Britt *et al.*, 2018). Dès lors, au niveau du point de rupture, les prédictions de MARGEVT pour le THI et le THladj restent aux alentours des 1.250 €/vache mais elles croissent avec la réduction du THI durant les périodes plus froides comme le démontrent les Figures 14 d et 14 h.

Malencontreusement, le changement climatique tend de plus en plus à nous faire sortir de la zone thermoneutrale entraînant d'importants stress thermiques pour l'animal. Il en résulte donc une croissante perte de rendement laitier, protéique et de matières grasses à chaque unité de THI supplémentaire (Amamou *et al.*, 2019). Ainsi, les valeurs théoriques de LAITVT (Figure 14 a ; Figure 14 d) vont croître dû au déséquilibre engendré par une offre inférieure à la demande et attisé par la volatilité des prix. Cependant, en vue de tenter de maintenir une production élevée, malgré une réduction de l'ingestion due au stress thermique (Renaudeau *et al.*, 2012; Sejian *et al.*, 2018), une modification de la ration habituelle par une ration plus énergétique (contenant davantage de concentrés) peut être opérée (Beede and Collier (1986); Renaudeau *et al.*, 2012) mais cela mène donc à un accroissement des coûts d'ALIMENTVT comme l'illustrent les Figures 14 c et 14 g. Partant de là, à chaque unité supplémentaire pour l'un ou l'autre indicateur, le coût d'achat d'alimentation s'envole fortement avec leur moyenne et dans une moindre mesure, avec leur troisième quartile. D'ailleurs, si on s'intéresse plus spécifiquement au THladj_{quart3} (Figure 14c ; 14 g), un effet « retard » est observable entre LAITVT et ALIMENTVT. En effet, le point de rupture pour ALIMENTVT se situe à une valeur inférieure de celle de LAITVT. Cela pourrait éventuellement provenir de la complémentation anticipative de la ration, en fonction de la disponibilité en

herbes dans les pâturages. De cette manière, la hausse d'ALIMENTVT va progressivement s'intensifier avant de voir remonter la valeur de production du lait dès le point de rupture dépassé.

A cela s'ajoute également un accroissement des FRCHEPTVT (notamment les soins vétérinaires) (Figure 14 b ; 14 f) étant donné que le stress thermique influence négativement l'état général de l'animal (de Andrade Ferrazza *et al.*, 2017).

Ensuite, il semble que la hausse des paramètres économiques LAITVT, FRCHEPTVT, ALIMENTVT et MARGEBVT soit plus conséquente pour la moyenne que pour le 3^{ème} quartile des indicateurs. Cependant, les courbes théoriques avec le THI_{moy} doivent être critiquées car notre travail a estimé précédemment que la valeur moyenne la plus haute du THI étaient de 59,46. De ce fait, la forte pente prise après cette valeur et ce, jusqu'à la fin de leur intervalle d'étude (Annexe 1), apparaît nettement influencée par les très hautes valeurs de l'intervalle et ne reflète donc que partiellement la réalité. De plus, au regard des résultats obtenus par Yan *et al.* (2020), le THI_{adj} semble bien avoir une meilleure efficacité prédictive, ce qui pourrait dès lors expliquer que la prédiction des paramètres économiques avec le THI n'a guère plus la même robustesse après le point de rupture, contrairement au THI_{adj} . D'ailleurs, la performance accrue de THI_{adj} grâce à l'ajout de paramètres environnementaux relevée par Wang *et al.* (2018) et Ouellet *et al.* (2019) ainsi que les limites théoriques du THI soulignées par Li *et al.* (2009) et Hammami *et al.* (2013), tendent à confirmer le postulat de Yan *et al.* (2020).

Finalement, l'utilisation du THI_{adj} comme indicateur préférentiel pour les régions tempérées semble suivre la théorie développée par Hammami *et al.* (2013). De cette manière, l'emploi de $THI_{adj_{moy}}$ ou $THI_{adj_{quart3}}$ tend à dépendre de l'objectif de recherche ciblé. Dans notre cas, la recherche cible les conditions chaudes, soit hors de la zone thermoneutrale des troupeaux laitiers wallons. C'est pourquoi le $THI_{adj_{quart3}}$ a été plébiscité pour la suite de l'étude en raison de son intervalle d'étude (Annexe 1), contrairement à celui du $THI_{adj_{moy}}$ se prêtant mieux à une évaluation au niveau de la zone thermoneutrale.

5.3. Variabilité du point de rupture par ferme

Sur base des résultats obtenus, il apparaît qu'en moyenne les paramètres économiques des fermes laitières wallonnes soient influencés partiellement par les conditions climatiques. Comme mentionné dans l'état de l'art, le point de rupture pour une ferme peut vraisemblablement être influencé par des éléments endogènes (génétiques) ou exogènes (configuration de la ferme, orientation spatiale). C'est pourquoi une étude a été menée pour estimer le point de rupture par ferme.

Le Tableau 3 reprend la variabilité temporelle de l'indicateur $THI_{adj_{quart3}}$ des stations météorologiques affiliées aux fermes laitières significatives (c'est-à-dire dont les coefficients de régression linéaire et quadratique des paramètres économiques sont significativement différents de 0). La régression effectuée est similaire à la précédente étude mais n'a plus intégré l'effet fixe *CFERME* (car seules les données relatives à une seule ferme ont été utilisées).

Ainsi, on dénombre 28 fermes significatives sur les 143 fermes répondant à la nouvelle condition d'au moins 8 années comptables. Il en résulte qu'en modélisant individuellement les fermes, les conditions climatiques n'impactaient significativement qu'une ferme étudiée sur 5. Les fermes significatives sont affiliées à des stations météorologiques (station 10, 14, 23, 24, 25, 33 et 42) se situant majoritairement en province de Liège (Annexe 2). Ces résultats montrent une variabilité spatio-temporelle non négligeable pour ces stations. Dès lors, l'influence des conditions climatiques locales et du relief belge sur l'exploitation laitière est bien confirmée. D'ailleurs, on remarque que les stations 23, 24 et 25 (Cantons de l'Est) précédemment mises en avant pour leur différence moyenne de T_{sa} de 2 à 3 °C regroupent ainsi des fermes significatives.

En outre, chaque station météorologique regroupe un nombre différent de fermes significatives, notamment la station 42 qui en compte le plus (10 fermes significatives). Ainsi, comme l'illustre la Figure 6, le fait que la station 42 en dénombre plus peut être lié au nombre élevé de fermes potentiellement étudiables initialement. Cela suggère dès lors une grande diversité de profils d'exploitations. C'est pourquoi, la *Ferme E* et la *Ferme I* ont été sélectionnées dans la station 42 afin d'avoir une ferme significative produisant près de 6.000kg de lait (Chapaux *et al.*, 2013) (ferme ayant un profil plutôt extensif) et une autre avec une

production proche des 10.000 kg de lait (Chapaux *et al.*, 2013) (ferme ayant un profil plutôt intensif).

Tableau 3 : Tableau résumant la variabilité temporelle du $THladj_{\text{Quart3}}$ des stations significatives regroupant les exploitations laitières wallonnes présentant au moins 8 années comptables au cours de la période d'étude s'étalant de 2006 à 2018.

THladj _{Quart3}								
Année \ Station	10	14	23	24	25	33	42	
2006	66,2 ± 8,5	68,5 ± 9,1	65,1 ± 9,6	/	63,8 ± 9,3	68,9 ± 8,2	/	
2007	63,1 ± 5,4	63,4 ± 6,0	61,5 ± 6,4	64,6 ± 5,4	60,7 ± 6,8	66,3 ± 5,7	/	
2008	62,1 ± 7,7	65,1 ± 7,1	61,7 ± 7,8	63,5 ± 6,7	60,9 ± 8,2	65,7 ± 7,1	/	
2009	64,7 ± 6,2	68,1 ± 6,0	63,5 ± 6,8	64,7 ± 5,7	62,5 ± 6,8	67,1 ± 5,8	/	
2010	64,8 ± 8,0	65,6 ± 7,9	61,2 ± 8,3	64,6 ± 8,2	62,0 ± 9,4	66,5 ± 8,3	62,7 ± 5,0	
2011	64,1 ± 5,5	65,4 ± 5,5	62,2 ± 6,0	64,5 ± 5,3	61,6 ± 6,5	65,9 ± 5,4	64,8 ± 5,7	
2012	63,9 ± 7,8	65,2 ± 7,9	61,2 ± 8,9	64,1 ± 7,6	61,0 ± 9,0	66,2 ± 7,9	65,2 ± 8,4	
2013	/	65,4 ± 8,4	61,9 ± 9,8	65,8 ± 8,5	62,6 ± 10,1	66,5 ± 8,8	64,9 ± 9,1	
2014	63,5 ± 6,1	65,0 ± 6,3	63,5 ± 9,6	63,1 ± 6,0	61,5 ± 6,9	66,5 ± 5,9	63,5 ± 6,8	
2015	64,3 ± 7,9	66,3 ± 7,9	63,3 ± 8,3	64,5 ± 7,9	62,5 ± 8,8	67,7 ± 7,5	65,9 ± 8,1	
2016	63,8 ± 8,0	67,2 ± 7,7	63,1 ± 8,8	65,2 ± 7,4	63,4 ± 9,0	67,7 ± 7,1	67,6 ± 8,4	
2017	64,9 ± 7,8	67,6 ± 7,8	63,8 ± 8,1	66,3 ± 7,9	62,5 ± 8,4	68,1 ± 7,1	67,7 ± 8,0	
2018	/	69,5 ± 6,9	66,5 ± 8,0	67,9 ± 6,8	66,0 ± 8,2	71,1 ± 6,8	68,6 ± 7,7	
Nombre de fermes significatives/station	1	2	7	1	3	4	10	
TOTAL des fermes significatives (avec au moins 8 années compta.)								28
TOTAL des fermes ayant au moins 8 années compta.								143

Similairement à l'étude des indicateurs sur les paramètres économiques (c'est-à-dire en partant des solutions des modèles de régression développés), il a été possible de faire des représentations théoriques de l'évolution des paramètres économiques des deux fermes étudiées en fonction de l'indicateur $THladj_{\text{Quart3}}$ (Figure 15). L'inspection visuelle de ces graphiques a également permis de déceler aisément les points de rupture.

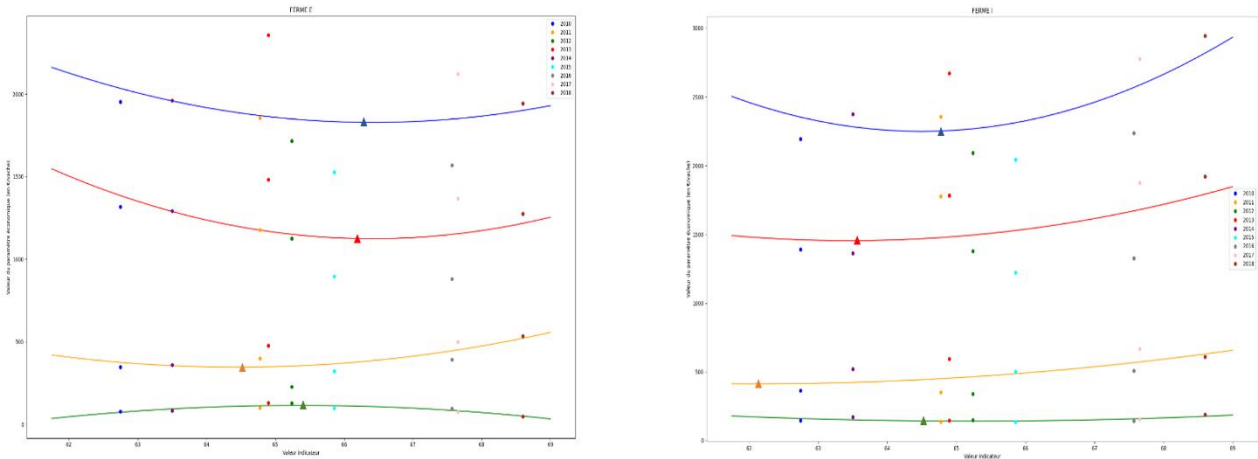


Figure 15 : Evolution théorique de LAITVT (en bleu), FRCHEPTVT (en vert), ALIMENTVT (en orange) et MARGEBVT (en rouge) en fonction de l'indicateur $THladj_{Quart3}$ pour la Ferme E (à gauche) et la Ferme I (à droite). Les points de couleurs illustrent les valeurs moyennées sur la saison culturale de 2010 à 2018. Le point de rupture équivalant au point d'inflexion est illustré par un triangle.

Tout d'abord, similairement aux représentations théoriques mises en place pour la recherche des points de rupture moyens, l'évolution théorique des paramètres économiques des deux fermes nécessite une représentation mêlant à la fois les coefficients de régression linéaire et quadratique issus de la nouvelle régression (soit n'est ni strictement une représentation linéaire, ni strictement une représentation quadratique). En outre, les points représentant les saisons culturales de 2010 à 2018, autour de chacune des évolutions théoriques, tendent à démontrer que les valeurs de R^2 obtenues sont assez élevées. Similairement à la précédente régression, il apparaît que les R^2 sont supérieurs pour les coûts variables (ALIMENTVT et FRCHEPTVT) et de fait, cela suggère que les changements de $THladj_{Quart3}$ expliqueraient plus les coûts variables. Par ailleurs, quelle que soit l'évolution théorique, il s'avère que les points se scindent en deux groupes différents. Le premier groupe (plutôt à gauche) reprend les saisons culturales de 2010 à 2015 ainsi que le point de rupture de la ferme tandis que le second groupe (plutôt à droite) compte les saisons culturales de 2016 à 2018, soit les saisons culturales présentant de nombreuses périodes de stress.

Ainsi, comme soupçonné au départ de cette étude, les deux fermes sélectionnées et résumées par la Figure 15, traduisent des réalités bien distinctes compte tenu de leurs différentes zones de rupture clairement visibles sur l'intervalle d'étude du $THladj_{Quart3}$. De ce fait, le point de rupture décelé pourrait être considéré comme le seuil spécifique à la ferme

étudiée, basé sur ces paramètres économiques. Dès lors, pour le LAITVT et FRCHEPTVT des deux fermes (*Ferme E* et *Ferme I*) ainsi que pour la MARGEBVT de la *Ferme E*, leurs points de rupture outrepassent le seuil fixé de 64 par Hammami *et al.* (2013). En revanche, ce seuil (basé sur l'animal) semble rester cohérent pour ALIMENTVT au niveau des deux fermes ainsi que pour la MARGEBVT de la *Ferme I*.

Par ailleurs, on constate que les points de rupture des FRCHEPTVT des deux fermes sont plus élevés que le point de rupture moyen trouvé précédemment. Cela pourrait s'expliquer au regard des taux moyens de réforme de la *Ferme I* et de la *Ferme E* (26,7% et 28,8% respectivement) supérieurs à celui de toutes les exploitations (26,2%). Ainsi, la *Ferme E* présente donc un pourcentage plus élevé de primipares dans son troupeau que la *Ferme I*. Dès lors, cette différence pourrait exprimer le recul plus important du seuil de la *Ferme E*. En effet, comme l'indiquent Bernabucci *et al.* (2014), les vaches primipares présentent une sensibilité moindre au stress thermique puisqu'elles génèrent moins de chaleur métabolique que les vaches multipares. De ce fait, l'effet du stress thermique serait un peu plus atténué lors de la hausse du THI_{adj} et expliquerait le point de rupture des deux fermes au-delà du point de rupture moyen.

Enfin, l'effet « retard » exprimé entre l'ALIMENTVT et le LATVT dans la recherche du point de rupture moyen se retrouve également dans les points de rupture des deux fermes. Cependant, il semble qu'il soit plus réduit pour la *Ferme E* que pour la *Ferme I*. Dès lors, il pourrait potentiellement traduire une anticipation plus accrue de la *Ferme I* que de la *Ferme E*, en complétant plus rapidement la ration avec des aliments achetés en fonction de la disponibilité en herbes dans les pâturages.

Ensuite, concernant les valeurs des paramètres économiques, la valeur prédite de LAITVT décroît jusqu'au niveau de son point de rupture et tend à atteindre les 2.250 €/vache pour le *Ferme I* et les 1.800 €/vache pour le *Ferme E*. Après le point de rupture, la hausse de la valeur de production de lait de la *Ferme I* est légèrement plus conséquente que pour la *Ferme E*. De cette manière, cette hausse pourrait notamment s'expliquer par l'augmentation de la quantité de lait standardisé produite en été durant la période de 2016 à 2018. En effet, le volume est passé de 3.931 L/vache à 5.349 L/vache, soit un net accroissement de 36%. Or, les Holstein Pie noire présentes sur l'exploitation sont, par définition, très sensibles et suivent théoriquement une relation antagoniste entre la tolérance au stress thermique et la

production (Bernabucci *et al.*, 2014; Carabaño *et al.*, 2014, 2019; Amamou *et al.*, 2019). Partant de là et au regard des jours de stress thermique décelés par le THIadj (80 en 2016, 74 en 2017 et 86 en 2018), il apparaît plutôt que l'apport massif d'aliments complétant la mise en pâture (Shalloo *et al.*, 2004; Hanrahan *et al.*, 2018) soit le facteur assurant cette hausse des volumes produits. Ainsi, on peut noter que l'éleveur de la *Ferme I* a donné jusqu'à 1.572 kilogrammes (kg) de concentrés par vache durant la saison culturale de 2018 alors qu'il en a donné annuellement aux alentours de 800 kg de concentrés par vache durant les saisons culturales de 2006 à 2016. Sur les deux dernières saisons culturales, les vaches laitières de la *Ferme I* ont donc vu leur quantité de concentrés fortement augmenter afin de permettre une hausse de leurs volumes estivaux. L'éleveur de la *Ferme E* a, quant à lui, également opté pour l'achat d'aliments afin d'assurer ces volumes estivaux de production. En revanche, ce dernier a complété la ration de 1.054 kg de concentrés par vache durant la saison culturale de 2018 tandis qu'il en donnait, en moyenne, 850 kg durant les saisons culturales de 2006 à 2016. Dès lors, sur les deux dernières saisons culturales, on constate donc une augmentation de 20% des concentrés donnés aux vaches laitières de la *Ferme E*. Par conséquent, tous deux ont vu une explosion des coûts d'achats d'alimentation. Ainsi, en 2018, ces coûts d'achats d'alimentation ont donc atteint une valeur maximale jamais enregistrée sur l'ensemble de la période d'étude, soit à 610,30 €/vache pour la *Ferme I* et, à 533,80 €/vache pour la *Ferme E*. Le SPW (2020) résume dès lors la situation en classant les coûts d'achats d'alimentation comme le premier poste de dépenses des exploitations laitières.

Ensuite, le second coût variable, FRCHEPTVT, tend légèrement à s'accroître pour la *Ferme I* atteignant en 2018 les 162,35 €/vache (la valeur maximale enregistrée sur l'ensemble de la période d'étude) alors qu'il oscillait en-dessous des 150 €/vache pendant les autres saisons culturales. Ainsi, comme le soulignent Lebacqz *et al.* (2015), la valeur des frais d'élevage engendrés tend à la hausse avec une gestion poussée du troupeau. C'est pourquoi les FRCHEPTVT de la *Ferme I* sont assez élevés de manière générale mais ils sont probablement accentués par la hausse des frais vétérinaires suite au stress thermique impactant l'état général de l'animal (de Andrade Ferrazza *et al.*, 2017). Par contre, la *Ferme E* présente des FRCHEPTVT évalués à 48,45 €/vache en 2018 contre 130,05 €/vache en 2013 (année avec le plus de FRCHEPTVT). Dès lors, il semblerait que l'éleveur ait opté pour une stratégie réductrice des FRCHEPTVT et ce, même en période de stress thermique (63% de réduction entre 2013 et 2018). Cette stratégie de gestion des FRCHEPTVT pourrait par exemple s'expliquer par une

remise des vaches laitières au taureau plutôt que de passer par l'insémination artificielle (dont le prix varie en fonction du classement des semences mâles mises au catalogue). De ce fait, en 2018, les 48,45€ de FRCHEPTVT pourraient provenir principalement des soins vétérinaires en raison de l'impact négatif du stress thermique sur l'état général de l'animal (de Andrade Ferrazza *et al.*, 2017). Par conséquent, quelle que soit la stratégie de gestion des FRCHEPTVT, ce poste de dépenses n'est pas à négliger comme le souligne le SPW (2020) en le classant au 4^{ème} rang des plus importants postes de dépenses.

Finalement, la MARGEBVT résultante de la valeur de production LAITVT et des coûts variables (ALIMENTVT et FRCHEPTVT) tend, au niveau du point de rupture, vers 1.450 €/vache pour la *Ferme I* contre 1.120 €/vache pour la *Ferme E*. De plus, si on compare par rapport à la valeur de la MARGEBVT estimée par le point de rupture moyen, la MARGEBVT de la *Ferme I* est supérieure de près de 200 €/vache alors que celle de la *Ferme E* est inférieure de près de 130 €/vache. Du coup, la MARGEBVT de la *Ferme I* est bien supérieure à la MARGEBVT de la *Ferme E* malgré que les frais variables engagés par la *Ferme I* soient plus élevés. Les résultats de notre travail à propos de la MARGEBVT sont donc confirmés par le postulat fait par Chapaux *et al.* (2013) et Dalcq (2020).

De surcroît, afin d'affiner la réflexion sur les résultats de la MARGEBVT des deux fermes, il est intéressant d'employer l'approche marginale des coûts et revenus (C_{ma} et R_{ma} respectivement). Ainsi, au cours de la période critique où l'on a décelé le plus de jours de stress thermique (de 2016 à 2018), la *Ferme E* présente un C_{ma} (0,311 €/litre) supérieur à son R_{ma} (0,306 €/litre) (c'est-à-dire qu'après l'optimum économique, chaque litre de lait supplémentaire coûte plus cher à produire que ce qu'il ne va rapporter). Cela pourrait ainsi éclairer sur le fait que l'éleveur a plutôt complété la ration en concentrés durant l'été afin d'assurer ces volumes de production et non, de produire plus tel que l'a fait l'éleveur de la *Ferme I*. En effet, ce dernier présente un léger profit marginal lui permettant de maintenir sa MARGEBVT élevée alors que ses coûts variables s'envolent à chaque unité supplémentaire de THladj. Cependant, si la stratégie de la *Ferme I* venait à se généraliser, ce léger avantage pourrait rapidement changer et tendre dès lors vers un net désavantage au regard de l'augmentation continue des prix des aliments accentuée par une demande de plus en plus forte d'aliments. Ainsi, cette différence au niveau des profits marginaux entre les deux fermes pourrait potentiellement traduire la divergence des points de rupture pour la MARGEBVT.

Par conséquent, malgré la divergence de MARGE_{BVT}, la viabilité économique des deux exploitations s'avère semblable en raison du contexte socio-économique actuel puisque leurs profils sont inclus entre les deux systèmes extrêmes de production analysés par Dalcq (2020). En effet, chacune des deux fermes a mis en place une stratégie spécifique en fonction de leurs conditions de production et des conditions climatiques locales.

6. Conclusion et perspectives

Ce travail avait pour principal objectif de contribuer à l'évaluation de la résilience économique des exploitations laitières wallonnes face aux changements climatiques sur base des données technico-économiques des comptabilités de gestion d'Elevéo et des données météorologiques du réseau PameSeb collectées sur une période s'étalant de 2006 à 2018.

Dans le secteur laitier wallon, et particulièrement sous les conditions climatiques chaudes en raison du changement climatique, l'une des principales difficultés est de pouvoir mitiger le stress thermique afin d'y exploiter correctement les facteurs de production et d'être résilient économiquement. En effet, comme présenté dans ce mémoire, la variabilité temporelle des indicateurs météorologiques a démontré que les bovins laitiers ont été fortement impactés par le stress thermique durant les saisons culturales de 2006, 2016, 2017 et 2018. La saison culturale 2018 est considérée pour les indicateurs THI et THladj comme la plus impactée en raison du plus grand nombre de jours décelant un stress thermique. En outre, la variabilité spatiale entre les mesures météorologiques est très hautement significative et de fait, indique une nette influence des conditions locales sur l'exploitation agricole.

Ensuite, la MARGEBVT et ses composantes (LAITVT, FRCHEPTVT et ALIMENVVT) ont témoigné chacune d'une importante variabilité temporelle illustrée par de larges amplitudes, voire également des espaces interquartiles croissants. La modélisation incluant toutes les données disponibles a montré que la relation liant les paramètres économiques aux indicateurs de stress étudiés combinait une composante linéaire et quadratique. En effet, les coefficients de régression de ces composantes pour MARGEBVT, LAITVT et ALIMENVVT étaient tous significativement différents de 0. Seul FRCHEPTVT avait une significativité changeante en fonction de l'indicateur utilisé. De plus, les valeurs de R^2 suggéraient que les changements de THI et THladj expliqueraient plus les coûts variables.

Par conséquent, il apparaît qu'en moyenne les paramètres économiques des fermes laitières wallonnes sont influencés partiellement par les conditions climatiques. En effet, au-delà des points de rupture moyens, LAITVT semblait croître en suivant un effet retard par rapport à la forte augmentation d'ALIMENVVT. Les FRCHEPTVT augmentaient également probablement suite à l'impact négatif du stress thermique sur l'état général de l'animal. La

MARGEBVT résultante de la valeur de production LAITVT et des coûts variables (ALIMENTVT et FRCHEPTVT) montraient une légère hausse malgré une envolée des coûts variables.

Cependant, lorsque les fermes ont été modélisées individuellement, les conditions climatiques n'impactaient significativement qu'une ferme étudiée sur 5, chacune ayant leur propre point de rupture. Les fermes significatives sont affiliées à des stations météorologiques (station 10, 14, 23, 24, 25, 33 et 42) se situant majoritairement en province de Liège.

Partant de ce constat, une comparaison entre la *Ferme E* et la *Ferme I* affiliée à la station 42 a relaté que leurs zones de ruptures étaient bien distinctes. Le point de rupture décelé pourrait ainsi être considéré comme le seuil spécifique à la ferme étudiée, basé sur ces paramètres économiques.

En conclusion, leur différence de point de rupture attestait d'une stratégie de gestion du troupeau influencée par les conditions climatiques locales et leurs conditions de production. De plus, les résultats de cette étude ont également montré l'intérêt de continuer l'étude de l'influence du $THI_{adj_{\text{quart}3}}$ sur la résilience économique des fermes wallonnes au stress thermique. Enfin, dans l'optique d'affiner la réflexion future, cette étude a mené à proposer quelques perspectives entrevues par ce présent travail.

D'abord, l'ensemble des résultats produits dans ce mémoire proviennent de données s'étalant de 2006 à 2018. L'intégration des données issues des comptabilités de gestion suivantes permettrait d'évaluer la tendance des dernières années. En effet, l'année 2020 a même été qualifiée comme étant la plus chaude jamais enregistrée en Belgique depuis la prise des premières mesures météorologiques (IRM, 2021). De plus, selon Peters *et al.* (2020), les zones européennes durement touchées par les conditions climatiques de 2018 ont connu en 2019 et 2020 de nouveaux épisodes de fortes chaleurs. Dès lors, il est soupçonnable que 2019 et 2020 suivent la tendance exprimée par les années décelées comme fortement impactées par le stress thermique et de fait, confirmerait vraisemblablement l'évolution théorique des paramètres économiques représentée dans ce mémoire. De plus, la tendance soupçonnée conduit vers l'idée de suivre continuellement le stress thermique en vue de conseiller les éleveurs au mieux.

Ensuite, il serait intéressant d'étudier la tendance soupçonnée en caractérisant le changement de comportement dans l'évolution de chacun des paramètres économiques et

d'y détecter le point de rupture spécifique à la ferme. Ainsi, l'une des pistes envisageables serait de suivre la méthode d'estimation des seuils avec une régression en deux phases (Nickerson *et al.*, 1989) employée par Bernabucci *et al.* (2014) pour la détection du seuil de stress thermique des vaches italiennes de la race Holstein. De plus, une enquête auprès des exploitations laitières renseignerait les moyens mis en œuvre pour gérer le stress thermique subi par les animaux et, de fait, pourrait appuyer les interprétations du changement de comportement de l'évolution des paramètres économiques. De cette manière, la situation de résilience économique des exploitations laitières wallonnes pourrait être traduite avec les indicateurs de la volatilité de la production, des coûts variables et de la marge brute, en fonction de leurs seuils spécifiques.

Finalement, une approche plus pratique pour les éleveurs de bovins laitiers peut être intégrée aux perspectives citées dans ce travail de fin d'études. Pour ce faire, le développement d'une application où l'éleveur serait connecté à la station météorologique la plus proche, voire à des capteurs propres à l'étable, pourrait être l'une des premières démarches pour mesurer en temps réel le stress thermique. Une fois mesuré, l'éleveur pourrait identifier le niveau de gravité du stress en calculant la valeur de l'indicateur. De cette façon, l'éleveur pourrait optimiser sa stratégie de gestion en fonction du niveau estimé et ainsi, gérer l'impact maximal du stress thermique pendant les 24 à 48 heures (Spiers *et al.*, 2004) suivant la détection du stress.

7. Bibliographie

- Agritrade (2013) *Secteur laitier - Note de synthèse*. Available at: <http://agritrade.cta.int/> (Accessed: 10 April 2021).
- Alvarez, A. *et al.* (2008) 'Does Intensification Improve the Economic Efficiency of Dairy Farms?', *Journal of Dairy Science*, 91(9), pp. 3693–3698. doi: 10.3168/jds.2008-1123.
- Amamou, H. *et al.* (2019) 'Thermotolerance indicators related to production and physiological responses to heat stress of holstein cows', *Journal of Thermal Biology*, 82, pp. 90–98. doi: 10.1016/j.jtherbio.2019.03.016.
- de Andrade Ferrazza, R. *et al.* (2017) 'Thermoregulatory responses of Holstein cows exposed to experimentally induced heat stress', *Journal of Thermal Biology*, 66, pp. 68–80. doi: 10.1016/j.jtherbio.2017.03.014.
- Armstrong, D. V (1994) *SYMPOSIUM: NUTRITION AND HEAT STRESS Heat Stress Interaction with Shade and Cooling*, *Journal of Dairy Science*. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(94)77149-6.
- Baeta, F. C. *et al.* (1987) 'Equivalent temperature index at temperatures above the thermoneutral for lactating dairy cows', *American Society of Agricultural Engineers (USA)*. Available at: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US8853966> (Accessed: 27 April 2021).
- Beede, D. K. and Collier, R. J. (1986) 'Potential Nutritional Strategies for Intensively Managed Cattle during Thermal Stress', *Journal of Animal Science*, 62(2), pp. 543–554. doi: 10.2527/jas1986.622543x.
- Béné, C. (2013) 'Towards a Quantifiable Measure of Resilience', *IDS Working Papers*, 2013(434), pp. 1–27. doi: 10.1111/j.2040-0209.2013.00434.x.
- Béné C. (2013) *Towards a Quantifiable Measure of Resilience*. Available at: <chrome-extension://dagcmkpagjlhakfdhnbomgmjdpkdklff/enhanced-reader.html?pdf=https%3A%2F%2Fbrxt.mendeley.com%2Fdocument%2Fcontent%2F3a5f349b-1e5e-33b5-b592-b7f30a6cd39a> (Accessed: 7 April 2021).
- Bernabucci, U. *et al.* (2014) 'The effects of heat stress in Italian Holstein dairy cattle', *Journal of Dairy Science*, 97(1), pp. 471–486. doi: 10.3168/jds.2013-6611.
- Bernabucci, U. (2019) 'Climate change: impact on livestock and how can we adapt', 9(1), pp. 3–5. doi: 10.1093/af/vfy039.
- Blanco-Penedo, I. *et al.* (2020) 'Modeling heat stress under organic dairy farming conditions in warm temperate climates within the Mediterranean basin', *Climatic Change*, 162(3), pp. 1269–1285. doi: 10.1007/s10584-020-02818-y.
- Briguglio, L. *et al.* (2009) 'Economic vulnerability and resilience: Concepts and measurements', *Oxford Development Studies*, 37(3), pp. 229–247. doi: 10.1080/13600810903089893.
- Britt, J. H. *et al.* (2018) 'Invited review: Learning from the future—A vision for dairy farms and cows in 2067', *Journal of Dairy Science*, 101(5), pp. 3722–3741. doi: 10.3168/jds.2017-14025.
- Brügemann, K. *et al.* (2011) 'Genetic analyses of protein yield in dairy cows applying random

regression models with time-dependent and temperature x humidity-dependent covariates', *Journal of Dairy Science*, 94, pp. 4129–4139. doi: 10.3168/jds.2010-4063.

Buffington *et al.* (1981) 'Black Globe-Humidity Index (BGHI) as Comfort Equation for Dairy Cows', *Transactions of the ASAE*, 24(3), pp. 711–714. doi: 10.13031/2013.34325.

Van Calker, K. J. *et al.* (2015) 'Identifying and ranking attributes that determine sustainability in Dutch dairy farming'. doi: 10.1007/s10460-004-7230-3.

Carabaño, M. J. *et al.* (2014) 'Modeling heat stress effect on Holstein cows under hot and dry conditions: Selection tools', *Journal of Dairy Science*, 97(12), pp. 7889–7904. doi: 10.3168/jds.2014-8023.

Carabaño, M. J. *et al.* (2019) 'Selecting for heat tolerance', *Animal Frontiers*, 9(1), pp. 62–68. doi: 10.1093/af/vfy033.

Carter, M. R. *et al.* (2007) 'Poverty Traps and Natural Disasters in Ethiopia and Honduras', *World Development*, 35(5), pp. 835–856. doi: 10.1016/j.worlddev.2006.09.010.

CBL (2020) *Rapport annuel CBL 2020*.

Chapaux *et al.* (2013) *Fécondité des vaches et troupeaux laitiers wallons. Effet du management*. Available at: https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/147158/1/Art_elevages_belges_fecondite_trp_laitiers_2013.pdf (Accessed: 10 April 2021).

Cook, B. I. *et al.* (2014) 'Global warming and 21st century drying', *Climate Dynamics*, 43(9–10), pp. 2607–2627. doi: 10.1007/s00382-014-2075-y.

Coppock, C. E. *et al.* (1982) 'Lactating Dairy Cow Responses to Dietary Sodium, Chloride, and Bicarbonate During Hot Weather', *Journal of Dairy Science*, 65(4), pp. 566–576. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(82)82234-0.

Cowley, F. C. *et al.* (2015) 'Immediate and residual effects of heat stress and restricted intake on milk protein and casein composition and energy metabolism', *Journal of Dairy Science*, 98(4), pp. 2356–2368. doi: 10.3168/jds.2014-8442.

CRA-W/Réseau Pameseb (2021) *Pameseb asbl - Le réseau Pameseb*. Available at: https://www.pameseb.be/meteo_intro/reseau_pameseb.html (Accessed: 11 March 2021).

Dai, A. (2011) 'Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index during 1900-2008', *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 116(12). doi: 10.1029/2010JD015541.

Dalcq, A.-C. (2020) 'Caractérisation de la diversité des stratégies conçues par les producteurs laitiers wallons : déterminants socio-économiques et dynamique d'adaptations face aux enjeux passés, présents et futurs'. Available at: <https://orbi.uliege.be/handle/2268/251058> (Accessed: 24 February 2021).

Deng *et al.* (2015) 'CFD simulation of temperature and humidity distribution in low profile cross ventilated dairy cattle barn', *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 31(9), pp. 209–214. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.09.032.

Döring, T. F. *et al.* (2014) 'Resilience as a universal criterion of health', *Journal of the Science*

of *Food and Agriculture*, 95(3), pp. 455–465. doi: 10.1002/jsfa.6539.

Dormady et al. (2019) 'Economic resilience of the firm: A production theory approach', *International Journal of Production Economics*, 208, pp. 446–460. doi: 10.1016/j.ijpe.2018.07.017.

FAO (1988) *Farm structures in tropical climates*. Available at: <http://www.fao.org/3/s1250e/S1250E00.htm#Contents> (Accessed: 2 March 2021).

FAO (2007) *Perspectives alimentaires, juin 2007*. Available at: <http://www.fao.org/3/ah864f/ah864f10.htm> (Accessed: 10 April 2021).

FAOSTAT (2019) 'Lait et produits laitiers', 2019. doi: 10.1787/agr-outl-data-fr.

FranceAgriMer (2017) *Éléments d'éclairage sur l'évolution du marché du beurre en 2017*. Available at: https://www.franceagrimer.fr/fam/content/download/54661/document/NCO-LAI-Le_marché_du_beurre_en_2017.docx.pdf?version=5 (Accessed: 13 April 2021).

Gantner, V. et al. (2011) 'Temperature-humidity index values and their significance on the daily production of dairy cattle', *Mljekarstvo*, 61(1), pp. 56–63.

García-Ruiz, A. et al. (2016) 'Changes in genetic selection differentials and generation intervals in US Holstein dairy cattle as a result of genomic selection', *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(28), pp. E3995–E4004. doi: 10.1073/pnas.1519061113.

Gaughan et al. (2010) 'Effect of shade on body temperature and performance of feedlot steers', *Journal of Animal Science*, 88(12), pp. 4056–4067. doi: 10.2527/jas.2010-2987.

Gaughan, J. B. et al. (2008) 'A New Heat Load Index for Feedlot Cattle A New Heat Load Index for Feedlot Cattle A new heat load index for feedlot cattle 1', *Journal of Animal Science*, 86(1), pp. 226–234. doi: 10.2527/jas.2007-0305.

Gauly, M. et al. (2013) 'Future consequences and challenges for dairy cow production systems arising from climate change in Central Europe - A review', *Animal*, 7(5), pp. 843–859. doi: 10.1017/S1751731112002352.

Gollin et al. (2014) 'The agricultural productivity gap', *Quarterly Journal of Economics*, 129(2), pp. 939–993. doi: 10.1093/qje/qjt056.

Gorniak, T. et al. (2014) 'Impact of mild heat stress on dry matter intake, milk yield and milk composition in mid-lactation Holstein dairy cows in a temperate climate', *Archives of Animal Nutrition*, 68(5), pp. 358–369. doi: 10.1080/1745039X.2014.950451.

Gray et al. (2016) 'Plant developmental responses to climate change', *Developmental Biology* 419, pp. 64–77. Available at: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0012160616302640?token=05B45223AD4788B94569EABAFBEC6121DB7803BBB891E75F3AB608A3A3549C1FE770F16E1B01C713C6EB919CFABB2F89&originRegion=eu-west-1&originCreation=20210527023844> (Accessed: 27 May 2021).

Habeeb et al. (2018) 'Temperature-Humidity Indices as Indicators to Heat Stress of Climatic Conditions with Relation to Production and Reproduction of Farm Animals', *International Journal of Biotechnology and Recent Advances*, 1(1). doi: 10.18689/ijbr-1000107.

Hahn, G. L. *et al.* (2009) *Chapter 5: Thermal Indices and Their Applications for Livestock Environments*.

Hammami, H. *et al.* (2013) 'Evaluation of heat stress effects on production traits and somatic cell score of Holsteins in a temperate environment', *Journal of Dairy Science*, 96(3), pp. 1844–1855. doi: 10.3168/jds.2012-5947.

Hanrahan, L. *et al.* (2018) 'Factors associated with profitability in pasture-based systems of milk production', *Journal of Dairy Science*, 101(6), pp. 5474–5485. doi: 10.3168/jds.2017-13223.

Hao *et al.* (2018) 'Seasonal Drought Prediction: Advances, Challenges, and Future Prospects', *Reviews of Geophysics*, 56(1). doi: 10.1002/2016RG000549.

Herbut, P. and Angrecka, S. (2018) 'Environmental parameters to assessing of heat stress in dairy cattle—a review', *International Journal of Biometeorology*, 62(12). doi: 10.1007/s00484-018-1629-9.

Hill *et al.* (2008) *Exploring Regional Economic Resilience*. doi: 10.13140/RG.2.1.5099.4000.

Hoerling, M. *et al.* (2012) 'On the increased frequency of mediterranean drought', *Journal of Climate*, 25(6), pp. 2146–2161. doi: 10.1175/JCLI-D-11-00296.1.

Hoffmann, G. *et al.* (2020) 'Animal-related, non-invasive indicators for determining heat stress in dairy cows', *Biosystems Engineering*. Academic Press, pp. 83–96. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2019.10.017.

Holling *et al.* (2002) *Panarchy : Understanding transformations in human and natural systems*. Available at: <http://faculty.washington.edu/stevehar/Panarchy.pdf> (Accessed: 5 March 2021).

Huart F. (2013) *La crise de la zone euro : quelles sont les solutions durables ? - L'observatoire des politiques économiques en Europe*. Available at: <https://opee.unistra.fr/spip.php?article283> (Accessed: 10 April 2021).

I.P.P.C (2014) *Changement climatique 2014: Rapport de synthèse. Contribution des groupes de travail I, II et III au cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*, *Fourth Assessment Report*. Gian-Kasper Plattner. Available at: <http://www.ipcc.ch>. (Accessed: 23 February 2021).

I.P.P.C (2018) *Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre dans le contexte du renforcement de la parade mondiale au changement climatique, du développement durable et de la lutte contre la pauvreté*. Available at: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/SR15_Summary_Volume_french.pdf (Accessed: 23 February 2021).

I.P.P.C. (2019) *Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre dans le contexte du renforcement de la parade mondiale au changement climatique, du développement durable et de la lutte contre la pauvreté*. Available at: www.environmentalgraphiti.org (Accessed: 9 June 2021).

IRM (2020) *Rapport climatique 2020 DE L'INFORMATION AUX SERVICES CLIMATIQUES*. Available at: www.meteo.be (Accessed: 23 February 2021).

IRM (2021) *IRM - Atlas climatique*. Available at: <https://www.meteo.be/fr/climat/atlas-climatique/cartes-climatiques/temperature-de-lair/moyenne/annuel> (Accessed: 26 March 2021).

Jamar, D. et al. (2013) *L'autonomie alimentaire : un cadre pour l'accompagnement des éleveurs en transition vers plus d'efficacité systémique*. Available at: www.cebio.be/documents_telechargeables/vetabio_livret_autonomie_FR_web.pdf (Accessed: 12 April 2021).

Ji, B. et al. (2020) 'A review of measuring, assessing and mitigating heat stress in dairy cattle', *Biosystems Engineering*, 199, pp. 4–26. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2020.07.009.

Johnston et al. (2019) 'The impact of field bean inclusion level in dairy cow diets on cow performance and nutrient utilisation', *Livestock Science*, 220, pp. 166–172. doi: 10.1016/j.livsci.2018.12.015.

Joukoff (1991) *Climatologie du rayonnement solaire, Ciel et Terre*. Available at: <http://adsabs.harvard.edu/pdf/1991C%26T...107...59J> (Accessed: 9 March 2021).

Kadzere, C. T. et al. (2002) 'Heat stress in lactating dairy cows: A review', *Livestock Production Science*, 77(1), pp. 59–91. doi: 10.1016/S0301-6226(01)00330-X.

Kang et al. (2009) 'Climate change impacts on crop yield, crop water productivity and food security – A review', *Natural Science*, 19, pp. 1665–1674. Available at: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1002007109002810?token=05893A4F857B388C0D837388819B96A0DF1008075A43DAF9F3C307F84AFA6C4CD32DC27361EBFB90E77A63B195D8A3CD&originRegion=eu-west-1&originCreation=20210527024117>.

Kelly, M. and Gráda, C. Ó. (2013) *NUMERARE EST ERRARE: AGRICULTURAL OUTPUT AND FOOD SUPPLY IN ENGLAND BEFORE AND DURING THE INDUSTRIAL REVOLUTION 1 NUMERARE EST ORARE*. Available at: <https://ssrn.com/abstract=2035354> Electronic copy available at: <https://ssrn.com/abstract=2035354> Electronic copy available at: <https://ssrn.com/abstract=2035354> (Accessed: 5 March 2021).

Köppen-Geiger (2006) *World Maps of Köppen-Geiger climate classification*. Available at: <http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/> (Accessed: 11 March 2021).

Lambertz et al. (2014) 'Climatic effects on milk production traits and somatic cell score in lactating Holstein-Friesian cows in different housing systems', *Journal of Dairy Science*, 97, pp. 319–329. doi: 10.3168/jds.2013-7217.

Lebacqz et al. (2015) 'Role of input self-sufficiency in the economic and environmental sustainability of specialised dairy farms', *Animal*, 9(3), pp. 544–552. doi: 10.1017/S1751731114002845.

Lenton et al. (2019) 'Climate tipping points — too risky to bet against', *Nature*, 575, pp. 592–597. doi: 10.1038/d41586-019-03595-0.

Li, S. et al. (2009) 'Evaluation of thermal stress indices for cattle', in *American Society of*

Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting 2009, ASABE 2009, pp. 2283–2302. doi: 10.13031/2013.27441.

Lin, B. B. (2011) 'Resilience in agriculture through crop diversification: Adaptive management for environmental change', *BioScience*, pp. 183–193. doi: 10.1525/bio.2011.61.3.4.

Lubchenco, J. and Karl, T. R. (2012) 'Predicting and managing extreme weather events', *Physics Today*, 65(3), pp. 31–37. doi: 10.1063/PT.3.1475.

Mader et al. (2010) 'A comprehensive index for assessing environmental stress in animals', *Journal of Animal Science*, 88(6), pp. 2153–2165. doi: 10.2527/jas.2009-2586.

Mader, Terry L *et al.* (2006) 'Environmental Factors Influencing Heat Stress in Feedlot Cattle Environmental Factors Influencing Heat Stress in Feedlot Cattle Environmental factors influencing heat stress in feedlot cattle 1,2', *Journal of Animal Science*, 84(3), pp. 712–719. doi: 10.2527/2006.843712x.

Maggiolino, A. *et al.* (2020) 'Estimation of maximum thermo-hygrometric index thresholds affecting milk production in Italian Brown Swiss cattle', *Journal of Dairy Science*, 103(9). doi: 10.3168/jds.2020-18622.

Meehl, G. A. *et al.* (2000) 'Trends in extreme weather and climate events: Issues related to modeling extremes in projections of future climate change', *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(3), pp. 427–436. doi: 10.1175/1520-0477(2000)081<0427:TIEWAC>2.3.CO;2.

Meuwissen, M. P. M. *et al.* (2019) 'A framework to assess the resilience of farming systems', *Agricultural Systems*, 176. doi: 10.1016/j.agsy.2019.102656.

Meybeck, A. *et al.* (2012) *BUILDING RESILIENCE FOR ADAPTATION TO CLIMATE CHANGE IN THE AGRICULTURE SECTOR Proceedings of a Joint FAO/OECD Workshop 23-24 April 2012 Edited by FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT.*

Morkūnas et al. (2018) 'HOW RESISTANT IS THE AGRICULTURAL SECTOR? ECONOMIC RESILIENCE EXPLOITED', & *Sociology*, 11(3). doi: 10.14254/2071.

Nardone, A. *et al.* (2010) 'Effects of climate changes on animal production and sustainability of livestock systems', *Livestock Science*, 130(1–3), pp. 57–69. doi: 10.1016/j.livsci.2010.02.011.

Nickerson et al. (1989) 'Estimating Physiological Thresholds with Continuous Two-Phase Regression', *Physiological Zoology*, 62(4), pp. 866–887. doi: 10.1086/physzool.62.4.30157934.

NRC (1971) *A guide to environmental research on animals*. Available at: <https://www.worldcat.org/title/guide-to-environmental-research-on-animals/oclc/200069> (Accessed: 4 March 2021).

O'Brien, D. *et al.* (2015) 'Relating the carbon footprint of milk from Irish dairy farms to economic performance', *Journal of Dairy Science*, 98(10), pp. 7394–7407. doi: 10.3168/jds.2014-9222.

OCDE (2017) *RESILIENCE IN A TIME OF HIGH DEBT.*

Ominski, K. H. *et al.* (2002) *Physiological and Production Responses to Feeding Schedule in*

Lactating Dairy Cows Exposed to Short-Term, Moderate Heat Stress, Journal of Dairy Science. American Dairy Science Association. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(02)74130-1.

Ouellet et al. (2019) *Le stress de chaleur chez la vache laitière : effets sur les performances de production des troupeaux laitiers québécois.* Québec.

Pant et al. (2014) 'Static and dynamic metrics of economic resilience for interdependent infrastructure and industry sectors', *Reliability Engineering and System Safety*, 125, pp. 92–102. doi: 10.1016/j.ress.2013.09.007.

Pasqui, M. and Di Giuseppe, E. (2019) 'Climate change, future warming, and adaptation in Europe', *Animal Frontiers*, 9(1), pp. 6–11. doi: 10.1093/af/vfy036.

Peters, W. et al. (2020) 'A historical, geographical and ecological perspective on the 2018 European summer drought'. doi: 10.1098/rstb.2019.0505.

Peyraud, J. L. and Delaby, L. (2005) 'Combiner la gestion optimale du pâturage et les performances des vaches laitières: Enjeux et outils', *Productions Animales*, pp. 231–240. doi: 10.20870/productions-animales.2005.18.4.3529.

Pragna, P. et al. (2017) 'Heat stress and dairy cow: Impact on both milk yield and composition', *International Journal of Dairy Science.* Asian Network for Scientific Information, pp. 1–11. doi: 10.3923/ijds.2017.1.11.

Promket et al. (2020) 'Effects of climate change on milk yield and milk composition in thai crossbred holstein cows', *International Journal of GEOMATE*, 18(67). doi: 10.21660/2020.67.5807.

Quendler et al. (2020) 'Risk and Financial Management The Economic Resilience of the Austrian Agriculture since the EU Accession', *Journal of Risk and Financial Management*, 13(236). doi: 10.3390/jrfm13100236.

Randers, J. and Goluke, U. (2020) 'An earth system model shows self-sustained thawing of permafrost even if all man-made GHG emissions stop in 2020', *Scientific Reports* |, 10(1). doi: 10.1038/s41598-020-75481-z.

Rebetez et al. (2009) 'An analysis of the July 2006 heatwave extent in Europe compared to the record year of 2003', *Theoretical and Applied Climatology*, 95(1–2), pp. 1–7. doi: 10.1007/s00704-007-0370-9.

Règlement UE 1612/2016 (2016) *RÈGLEMENT DÉLÉGUÉ (UE) 2016/ 1612 DE LA COMMISSION - du 8 septembre 2016 - prévoyant une aide pour la réduction de la production laitière.*

Règlement UE 261/2012 (2012) *RÈGLEMENT (UE) N o 261/2012 DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL.*

Renaudeau, D. et al. (2012) 'Adaptation to hot climate and strategies to alleviate heat stress in livestock production', *The Animal Consortium*, 6(5), pp. 707–728. doi: 10.1017/S1751731111002448.

Rojas-Downing, M. M. et al. (2017) 'Climate change and livestock: Impacts, adaptation, and mitigation', *Climate Risk Management.* Elsevier B.V., pp. 145–163. doi: 10.1016/j.crm.2017.02.001.

- Rovelli, G. *et al.* (2020) 'The genetics of phenotypic plasticity in livestock in the era of climate change: a review', *Italian Journal of Animal Science*. Taylor and Francis Ltd., pp. 997–1014. doi: 10.1080/1828051X.2020.1809540.
- Seguin, B. (2010) 'D o s s i e r climatique : conséquences pour les végétaux', pp. 27–40.
- Sejian, V. *et al.* (2018) 'Review: Adaptation of animals to heat stress'. doi: 10.1017/S1751731118001945.
- Seneviratne, S. I. *et al.* (2018) 'The many possible climates from the Paris Agreement's aim of 1.5 °c warming', *Nature*, 558(7708), pp. 41–49. doi: 10.1038/s41586-018-0181-4.
- Shalloo, L. *et al.* (2004) 'The economic impact of cow genetic potential for milk production and concentrate supplementation level on the profitability of pasture based systems under different EU milk quota scenarios', *Journal of Agricultural Science*, 142(3), pp. 357–369. doi: 10.1017/S002185960400437X.
- Shock, D. A. *et al.* (2016) 'Studying the relationship between on-farm environmental conditions and local meteorological station data during the summer', *Journal of Dairy Science*, 99(3). doi: 10.3168/jds.2015-9795.
- Da Silva *et al.* (2015) 'Index of thermal stress for cows (ITSC) under high solar radiation in tropical environments', *International Journal of Biometeorology*, 59(5), pp. 551–559. doi: 10.1007/s00484-014-0868-7.
- SPF Economie (2014) 'Mise À Jour De L'Étude Sur La Filière Laitière'.
- Spiers, D. E. *et al.* (2004) 'Use of physiological parameters to predict milk yield and feed intake in heat-stressed dairy cows', in *Journal of Thermal Biology*. Pergamon, pp. 759–764. doi: 10.1016/j.jtherbio.2004.08.051.
- SPW (2020) *L'agriculture wallonne en chiffre 2020*. Available at: <https://agriculture.wallonie.be/documents/20182/21858/FR-2015.pdf/591e9fba-0df8-43a3-ac3a-042aeb83714c> (Accessed: 24 February 2021).
- St-Pierre *et al.* (2003) 'Economic losses from heat stress by US livestock industries¹', *Journal of Dairy Science*, 86(SUPPL. 1). doi: 10.3168/jds.S0022-0302(03)74040-5.
- Strandén, I. *et al.* (2019) 'Genomic selection strategies for breeding adaptation and production in dairy cattle under climate change', *Heredity*, 123, pp. 307–317. doi: 10.1038/s41437-019-0207-1.
- Termonia, P. *et al.* (2018) 'The CORDEX.be initiative as a foundation for climate services in Belgium', *Climate Services*, 11, pp. 49–61. doi: 10.1016/j.cliser.2018.05.001.
- Thom, E. C. (1959) 'The Discomfort Index', *Weatherwise*, 12(2), pp. 57–61. doi: 10.1080/00431672.1959.9926960.
- Trenberth, K. E. *et al.* (2014) 'Global warming and changes in drought', *Nature Climate Change*. doi: 10.1038/nclimate2067.
- Truvé, A. *et al.* (2017) *Étude sur les mesures contre les déséquilibres de marché: Quelles perspectives pour l'après quotas dans le secteur laitier européen ?*
- Urruty and Huyghe (2017) 'Stability, robustness, vulnerability and resilience of agricultural

- systems. A review', *Agronomy for Sustainable Development*, 36(1), pp. 1–15. doi: 10.1007/s13593-015-0347-5.
- van Doorn and Jongeneel (2020) *Exploring the possibilities for implementation of the Dutch Biodiversity Monitor for farming in the CAP after 2022*. Wageningen.
- Van Vuuren et al. (2011) 'The representative concentration pathways: an overview', *Climatic Change*, 109, pp. 5–31. doi: 10.1007/s10584-011-0148-z.
- Wang, Z. et al. (2018) 'Drying tendency dominating the global grain production area', *Global Food Security*. doi: 10.1016/j.gfs.2018.02.001.
- West et al. (2003) 'Effects of hot, humid weather on milk temperature, dry matter intake, and milk yield of lactating dairy cows', *Journal of Dairy Science*, 86(1). doi: 10.3168/jds.S0022-0302(03)73602-9.
- West, J. W. (1999) 'Nutritional strategies for managing the heat-stressed dairy cow.', *Journal of animal science*, 77 Suppl 2(April), pp. 21–35. doi: 10.2527/1997.77suppl_221x.
- Xu, L., Chen, N. and Zhang, X. (2019) 'Global drought trends under 1.5 and 2 °C warming', *International Journal of Climatology*, 39(4). doi: 10.1002/joc.5958.
- Yan, G. et al. (2020) 'Evaluation of thermal indices based on their relationships with some physiological responses of housed lactating cows under heat stress', *International Journal of Biometeorology*, 64(12), pp. 2077–2091. doi: 10.1007/s00484-020-01999-6.
- Zamani, S. et al. (2016) 'Atmospheric drought in Belgium - statistical analysis of precipitation deficit', *International Journal of Climatology*, 36(8), pp. 3056–3071. doi: 10.1002/joc.4536.
- Zimbelman, R. B. et al. (2009) *A re-evaluation of the impact of temperature humidity index (THI) and black globe humidity index (BGHI) on milk production in high producing dairy cows*, Department of Animal Sciences. Tucson, AZ.

8. Annexes

Annexe 1 : Tableau montrant la variabilité annuelle de la Moyenne et du 3^{ème} Quartile pour le THI et THladj (intervalle d'étude) au cours de la période s'étalant de 2006 à 2018.

Année	THI		THladj	
	Moyenne	3 ^{ème} Quartile	Moyenne	3 ^{ème} Quartile
2006	57,7 ± 1,1	61,0 ± 0,9	58,7 ± 2,6	65,9 ± 2,1
2007	57,2 ± 0,9	59,4 ± 0,8	57,9 ± 2,4	62,7 ± 2,1
2008	56,7 ± 0,9	59,3 ± 0,9	57,4 ± 2,2	62,6 ± 1,8
2009	57,6 ± 0,9	59,9 ± 0,9	59,5 ± 2,3	64,5 ± 1,9
2010	57,6 ± 0,8	59,4 ± 0,5	58,9 ± 1,6	62,9 ± 1,4
2011	58,3 ± 0,8	60,3 ± 0,7	60,5 ± 1,6	64,3 ± 1,3
2012	57,4 ± 0,8	60,3 ± 0,9	58,3 ± 1,8	64,5 ± 1,6
2013	57,3 ± 0,7	60,3 ± 0,7	58,1 ± 1,4	64,7 ± 0,9
2014	57,7 ± 0,7	59,7 ± 0,7	59,4 ± 1,5	63,4 ± 1,3
2015	57,8 ± 0,8	60,6 ± 0,8	59,6 ± 1,6	65,3 ± 1,5
2016	58,6 ± 1,1	61,1 ± 1,0	60,9 ± 2,1	66,3 ± 1,9
2017	58,6 ± 1,1	61,6 ± 1,1	60,6 ± 2,0	66,7 ± 1,8
2018	59,5 ± 0,7	62,4 ± 0,8	62,4 ± 1,6	68,3 ± 1,4

Annexe 2 : Carte de la Région wallonne présentant les différentes stations météorologiques du réseau PameSeb ainsi que leur aire d'influence et indiquant les numéros des stations significatives regroupant des exploitations laitières ayant au moins 8 années comptables sur la période s'étalant de 2006 à 2018.

