



HAL
open science

Évaluation du thermogramme du dos du cheval après une séance d'ostéopathie

Camille Lalanne

► **To cite this version:**

Camille Lalanne. Évaluation du thermogramme du dos du cheval après une séance d'ostéopathie. Sciences du Vivant [q-bio]. 2022. <dumas-03714536>

HAL Id: dumas-03714536

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03714536v1>

Submitted on 5 Jul 2022

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

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



HAL Authorization

ANNEE 2022 - Thèse n°11

Évaluation du thermogramme du dos du cheval après une séance d'ostéopathie

THÈSE

pour l'obtention

du diplôme d'État de

DOCTEUR VÉTÉRINAIRE

présentée et soutenue publiquement devant

l'UFR de Médecine de l'Université de Nantes

le 27/06/2022

par

Camille, Marie LALANNE

Sous la direction de

Gwenola Touzot-Jourde

Président du jury : Monsieur Yassine MALLEM, Professeur en pharmacologie et toxicologie à ONIRIS

Membres du jury : Madame Gwenola TOUZOT-JOURDE, Maître de conférence en Anesthésie à ONIRIS

Madame Caroline TESSIER, Maître de conférence en chirurgie et orthopédie équine à ONIRIS

Membres invités : Madame Isabelle BURGAUD, Vétérinaire praticienne et ostéopathe au Cadre Noir

ANNEE 2022 - Thèse n°11

Évaluation du thermogramme du dos du cheval après une séance d'ostéopathie

THÈSE

pour l'obtention

du diplôme d'État de

DOCTEUR VÉTÉRINAIRE

présentée et soutenue publiquement devant

l'UFR de Médecine de l'Université de Nantes

le 27/06/2022

par

Camille, Marie LALANNE

Sous la direction de

Gwenola Touzot-Jourde

Président du jury : Monsieur Yassine MALLEM, Professeur en pharmacologie et toxicologie à ONIRIS

Membres du jury : Madame Gwenola TOUZOT-JOURDE, Maître de conférence en Anesthésie à ONIRIS

Madame Caroline TESSIER, Maître de conférence en chirurgie et orthopédie équine à ONIRIS

Membres invités : Madame Isabelle BURGAUD, Vétérinaire praticienne et ostéopathe au Cadre Noir

LISTE DES ENSEIGNANTS-CHERCHEURS ET ENSEIGNANTS D'ONIRIS à la date du 6 avril 2022

Département **BPSA** Biologie, Pathologie et Sciences de l'Aliment

Responsable : Emmanuel JAFFRES – Adjointe : Frédérique NGUYEN		
Nutrition et Endocrinologie		
Pharmacologie et Toxicologie	Jean-Claude DESFONTIS (Pr) Yassine MALLEM (Pr) Hervé POULIQUEN (Pr)	Antoine ROSTANG (MC) Meg-Anne MORICEAU (CERC)
Physiologie fonctionnelle, cellulaire et moléculaire	Lionel MARTIGNAT (Pr) Julie HERVE (MC HDR) Grégoire MIGNOT (MC) Adélie SALIN (CERC)	
Histologie et anatomie pathologique	Marie-Anne COLLE (Pr) Jérôme ABADIE (MC)	Laetitia JAILLARDON (MC) Frédérique NGUYEN (MC)
Pathologie générale, microbiologie et immunologie	Hervé SEBBAG (MC)	
Biochimie alimentaire industrielle	Joëlle GRUA (MC) Carole PROST (Pr) Florence TEXIER (MC)	Clément CATANEO (MC) Alix KHALIL (CERC) Laurent LE THUAUT (MC)
Microbiotech	Hervé PREVOST (Pr) Géraldine BOUE (MC) Nabila HADDAD (MC)	Emmanuel JAFFRES (MC) Mathilde MOSSER (MC) Boris MISERY (CERC) Raouf TAREB (MC)

Département **SAESP** Santé des Animaux d'Élevage et Santé Publique

Responsable : Raphaël GUATTEO – Adjoint : Jean-Michel CAPPELIER		
Élevage, nutrition et santé des animaux domestiques	Nathalie BAREILLE (Pr) François BEAUDEAU (Pr) Christine FOURICHON (Pr) Lucile MARTIN (Pr)	Juan Manuel ARIZA CHACON (CERC) Ségoène CALVEZ (MC) Aurélien MADOUASSE (MC) Nora NAVARRO-GONZALES (MC)
Infectiologie	Alain CHAUVIN (Pr) François MEURENS (Pr) Emmanuelle MOREAU (Pr) Nathalie RUVOEN-CLOUET (Pr)	Albert AGOULON (MC) Suzanne BASTIAN (MC) Léa LOISEL (CERC) Kenny OBERLE (CERC) Nadine RAVINET (MC)
Médecine des animaux d'élevage	Catherine BELLOC (Pr) Christophe CHARTIER (Pr) Raphaël GUATTEO (Pr) Anne RELUN (MC)	Sébastien ASSIE (MC) Isabelle BREYTON (MC) Mily LEBLANC MARIDOR (MC) Maud ROUAULT (AERC)
Hygiène et qualité des aliments	Jean-Michel CAPPELIER (Pr) Michel FEDERIGHI (Pr) Bruno LE BIZEC (Pr) Marie-France PILET (Pr)	Éric DROMIGNY (MC HDR) Fanny RENOIS-MEURENS (MC HDR) Sofia STRUBBIA (CERC)

Département **DSC** Sciences Cliniques

Responsable : Catherine IBISCH – Adjoint : Olivier GAUTHIER		
Anatomie comparée	Éric BETTI (MC) Claude GUINTARD (MC) Margarida RIBEIRO DA SILVA NEUNLIST (CERC)	
Pathologie chirurgicale et anesthésiologie	Éric AGUADO (Pr) Olivier GAUTHIER (Pr) Éric GOYENVALLE (MC HDR)	Pierre MAITRE (MC) Caroline TESSIER (MC) Gwénola TOUZOT-JOURDE (MC)
Dermatologie, parasitologie des carnivores et des équidés, mycologie	Jacques GUILLOT (Pr) Emmanuel BENSIGNOR (Pr Ass)	
Médecine interne, imagerie médicale et législation professionnelle vétérinaire	Anne COUROUCE (Pr) Jack-Yves DESCHAMPS (Pr) Françoise ROUX (Pr) Juan HERNANDEZ-RODRIGUEZ (Pr Ass) Nora BOUHSINA (MC)	Nicolas CHOUIN (MC) Amandine DRUT (MC) Marion FUSELLIER-TESSON (MC) Catherine IBISCH (MC) Aurélia LEROUX (MC) Odile SENECAT (MC)
Biotechnologies et pathologie de la reproduction	Jean-François BRUYAS (Pr) François FIENI (Pr)	Djemil BENCHARIF (MC HDR) Lamia BRIAND (MC HDR)

Département **GPA** Génie des Procédés Alimentaires

Responsable : Sébastien CURET-PLOQUIN – Adjointe : Vanessa JURY		
Lionel BOILLEREAUX (Pr)	Alain LEBAIL (Pr)	Jean-Yves MONTEAU (MC HDR)
Sébastien CURET-PLOQUIN (Pr)	Olivier ROUAUD (Pr)	Eve-Anne NORWOOD (MC)
Marie DE LAMBALLERIE (Pr)	Kévin CROUVISIER-URION (MC)	Raphaël PORYLES (MC)
Francine FAYOLLE (Pr)	Vanessa JURY (MC HDR)	Laurence POTTIER (MC)
Michel HAVET (Pr)	Emilie KORBEL (MC)	Cyril TOUBLANC (MC)

Département **MSC** Management, Statistiques et Communication

Responsable : Samira ROUSSELIERE – Adjointe : Evelyne VIGNEAU		
Mathématiques, statistiques, informatique	El Mostafa QANNARI (Pr) Chantal THORIN (Pr Ag) Evelyne VIGNEAU (Pr)	Véronique CARIOU (MC HDR) Philippe COURCOUX (MC) Benjamin MAHIEU (MC) Michel SEMENOU (MC)
Economie, gestion, législation	Jean-Marc FERRANDI (Pr) Pascal BARILLOT (MC) Ibrahima BARRY (MC) Florence BEAUGRAND (MC)	Sibylle DUCHAINE (MC) Sonia MAHJOUR (MC) Samira ROUSSELIERE (MC)
Langues et communication	Marc BRIDOU (PLPA) David GOYLER (Ens. Cont.) Patricia JOSSE (Ens. Cont.)	Shaun MEEHAN (Ens. Cont.) Linda MORRIS (PCEA) Ian NICHOLSON (ENS. Cont.)

Pr Ag : Professeur Agrégé, Pr : Professeur, MC : Maître de Conférence, MCC : MC contractuel,
 PLPA : Professeur Lycée Professionnel Agricole, PCEA : Professeur Certifié Enseignement Agricole,
 HDR : Habilité à Diriger des Recherches, CERC : Chargé d'Enseignement et de Recherche Contractuel,
 Ens. Cont. : Enseignant Contractuel

La reproduction d'extraits de cette thèse est autorisée avec mention de la source. Toute reproduction partielle doit être fidèle au texte utilisé. Cette thèse devra donc être citée en incluant les éléments bibliographiques suivants :

- **Nom et prénoms de l'auteur** : Camille, Marie, Lalanne
- **Année de soutenance** : 2022
- **Titre de la thèse** : Évolution du thermogramme du dos du cheval après une séance d'ostéopathie
- **Intitulé du diplôme** : Thèse de doctorat vétérinaire
- **Université de soutenance** : Faculté de médecine de Nantes
- **École de soutenance** : Oniris : Ecole Nationale Vétérinaire, Agroalimentaire et de l'Alimentation Nantes Atlantique
- **Nombre de page** : 105 pages

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	6
TABLE DES MATIERES.....	5
TABLE DES FIGURES	7
TABLE DES TABLEAUX	9
TABLE DES ABRÉVIATIONS	9
LEXIQUE	10
INTRODUCTION	11
PREMIÈRE PARTIE : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE	12
1. ÉMISSION DE RAYONNEMENTS THERMIQUES	12
1.1. LE RAYONNEMENT INFRAROUGE.....	12
1.2. LA THERMOREGULATION.....	15
1.2.1. Perception et intégration d'un écart de température	15
1.2.2. Mécanismes d'augmentation de la température corporelle	16
1.2.3. Mécanismes de diminution de la température corporelle	16
2. LA THERMOGRAPHIE.....	19
2.1. HISTOIRE DE LA THERMOGRAPHIE.....	19
2.2. ACQUISITION D'UN THERMOGRAMME	19
2.2.1. Détection du rayonnement infrarouge	20
2.2.2. Influence de l'environnement cutané et sous cutané.....	21
2.2.3. Influence de l'environnement extérieur	22
2.2.4. Positionnement et angulation de la caméra par rapport à la zone d'intérêt	22
2.3. ANALYSE DU THERMOGRAMME	23
2.3.1. Thermogramme normal	23
2.3.2. Critères d'interprétation.....	24
2.4. APPLICATION DE LA THERMOGRAPHIE	28
2.4.1. Avantages et limites de la caméra thermique.....	28
2.4.2. Applications non médicales.....	28
2.4.2.1. Usages industriels et urbains	28
2.4.2.2. Les usages de la technologie infrarouge dans les services publics.....	30
2.4.3. Applications en médecine humaine	31
2.4.3.1. Prévention et dépistage : exemple du cancer du sein.....	31
2.4.3.2. Diagnostic : exemple du phénomène de Raynaud	32
2.4.3.3. Suivi et évaluation de la réponse aux traitements : exemple de l'arthrose	33
2.4.4. Médecine vétérinaire	33
2.4.4.1. Applications dans le domaine équin	33
2.4.4.2. Médecine vétérinaire bovine.....	34
2.4.4.3. Médecine vétérinaire avicole.....	34
2.4.4.4. Médecine vétérinaire canine	36
2.4.4.5. Recherche fondamentale.....	37
2.4.4.6. Écologie et surveillance des espèces sauvages.....	39
2.5. CONCLUSION	39
3. L'OSTEOPATHIE.....	40
3.1. LA PHILOSOPHIE DE L'OSTEOPATHIE.....	40
3.1.1. Histoire de l'ostéopathie	40
3.1.2. Principes de l'ostéopathie	41
3.1.3. Définition de l'ostéopathie	41
3.1.4. Dysfonction ostéopathique	42
3.1.5. Importance de la colonne vertébrale	44
3.2. LE TONUS MUSCULAIRE	47
3.2.1. Fuseau neuro musculaire.....	47
3.2.2. Réflexe myotatique et boucle de régulation γ	49
3.2.3. Point de tension.....	50
3.2.4. Notion de barrière motrice.....	52

3.3.	<i>DIAGNOSTIC</i>	55
3.3.1.	Principe général	55
3.3.2.	Établissement d'une chaîne de dysfonctions	56
3.3.3.	Exemples de test diagnostiques	56
3.3.3.1.	Test du garrot	57
3.3.3.2.	Test de la jonction thoraco-lombaire	58
3.3.3.3.	Test du sacrum	59
3.3.3.4.	Test des coxaux	60
3.4.	<i>APPROCHE THERAPEUTIQUE</i>	61
3.4.1.	Techniques structurelles	61
3.4.2.	Ostéopathie fasciale	61
3.4.3.	Ostéopathie viscérale	62
3.4.4.	Ostéopathie crâniosacrée	63
3.5.	<i>CONCLUSION</i>	64
DEUXIÈME PARTIE : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE		65
1.	INTRODUCTION	65
2.	MATERIEL ET METHODES	65
2.1.	<i>POPULATION</i>	65
2.2.	<i>MATERIEL</i>	66
2.2.1.	Description de l'environnement des prises de mesure	66
2.2.2.	Le système de thermographie	66
2.3.	<i>METHODE</i>	67
2.3.1.	Préambule	67
2.3.2.	Conditions de réalisation	67
2.3.3.	Prise d'images	68
2.3.4.	Analyse des images	68
2.4.	<i>ANALYSE DES DONNEES</i>	70
2.4.1.	Analyse descriptive	70
2.4.2.	Analyse multivariée	70
2.4.3.	Pertinence de la valeur de la température discriminante choisie dans la présentation des résultats	73
3.	RESULTATS	74
3.1.	<i>DESCRIPTION DE LA POPULATION</i>	74
3.2.	<i>BILAN DES ASYMÉTRIES RELEVÉS ET DE LEURS ÉVOLUTIONS</i>	76
3.3.	<i>INFLUENCE DES DIFFÉRENTS FACTEURS</i>	81
3.3.1.	Analyse globale	81
3.3.2.	Analyse séparée des lots traités et témoins	82
3.4.	<i>CHOIX DE LA TEMPÉRATURE DISCRIMINANTE</i>	84
4.	DISCUSSION	86
4.1.	<i>BILAN DES RESULTATS</i>	86
4.2.	<i>LIMITES DE L'ÉTUDE</i>	87
4.2.1.	Critique du design expérimental	87
4.2.2.	Critique de l'analyse des images	88
4.2.3.	Critique statistique	89
4.3.	<i>PERSPECTIVES</i>	90
CONCLUSION		91
ANNEXE : INDICATION DES TECHNIQUES MUSCULAIRES SELON LA STRUCTURE DYSFONCTION		92
BIBLIOGRAPHIE		94

TABLE DES FIGURES

FIGURE 1 : PLUSIEURS INTERACTIONS SONT POSSIBLES LORSQU'UN RAYONNEMENT INCIDENT RENCONTRE UN CORPS : LA REFLEXION ET LA TRANSMISSION, L'ABSORPTION ET L'EMISSION (HYLL 2012)	12
FIGURE 2 : EMISSION ELECTROMAGNETIQUE A L'EQUILIBRE THERMIQUE ISSUE D'OBJET ASSIMILABLE A UN CORPS NOIR ILLUSTRANT LA LOI DE PLANCK : A UNE TEMPERATURE DONNEE D'UN CORPS CORRESPOND A UNE LONGUEUR D'ONDE DONT L'INTENSITE D'EMISSION EST MAXIMALE (USAMENTIAGA 2014)	13
FIGURE 3 : RAYONNEMENT DU CORPS NOIR SELON LA LOI DE PLANCK (TATTERSALL 2016)	14
FIGURE 4 : DOMAINES SPECTRAUX DU RAYONNEMENT ELECTROMAGNETIQUE (DALIBART, SERVANT 2000).....	15
FIGURE 5 : PRINCIPALES ADAPTATIONS PHYSIOLOGIQUES DU CHEVAL DANS LE CADRE DE LA THERMOREGULATION (DAVIES 2017)	18
FIGURE 6 : POSITIONNEMENT IDEAL DE LA CAMERA THERMIQUE PAR RAPPORT A LA ZONE D'INTERET	23
FIGURE 7 : THERMOGRAMME NORMAL DU DOS ET DE LA CROUPE DE CHEVAUX MONTES (TUNLEY, HENSON 2004)	24
FIGURE 8 : THERMOGRAMME DU DOS D'UN CHEVAL NORMAL (KOLD, CHAPPELL 1998)	24
FIGURE 9 : DYSFONCTIONNEMENT SUR UN CONTACTEUR PROBABLEMENT LIE A UN FIL INSUFFISAMMENT SERRE, CE QUI ENTRAINE LA SURCHAUFFE DES COMPOSANTS (FLIR SYSTEMS AB, INFRAREDTRAINING CENTER 2012)	29
FIGURE 10 : DETECTION D'UNE PERSONNE PAR UNE CAMERA INFRAROUGE, UN FACTEUR DE SECURITE QUI PREND DE L'IMPORTANCE A L'ERE DU DEVELOPPEMENT DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE (TELEDYNE FLIR LLC 2021)	29
FIGURE 11 : L'UTILISATION DE CAMERAS INFRAROUGES EN MER AMELIORE LA VISIBILITE DES EMBARCATIONS A PROXIMITE (TELEDYNE FLIR LLC 2021)	30
FIGURE 12 : THERMOGRAMME MAMMAIRE COMPATIBLE AVEC LA PRESENCE D'UNE TUMEUR MAMMAIRE (KHAN, ARORA 2021)	31
FIGURE 13 : THERMOGRAMME D'UN PATIENT PRESENTANT UN PHENOMENE DE RAYNAUD (STERNBERSKY, TICHY, ZAPLETALOVA 2021).....	32
FIGURE 14 : EXEMPLE DU THERMOGRAMME DES PANNEAUX D'UNE SELLE, ENREGISTRE APRES LE TRAVAIL ET DECOUPE EN 6 REGIONES D'INTERETS (SOROKO ET AL. 2018).....	34
FIGURE 15 : INTERET DE LA THERMOGRAPHIE DANS LA GESTION DE L'AMBIANCE DES BATIMENTS AVICOLES (LAGOUTTE, CORRAND, GUERIN 2009)	35
FIGURE 16 : ESTIMATION DE LA TEMPERATURE CORPORELLE DES VOLAILLES GRACE A LA THERMOGRAPHIE (LAGOUTTE, CORRAND, GUERIN [2009])	35
FIGURE 17 : THERMOGRAMME ET PHOTOGRAPHIE NUMERIQUE DE LA REGION ANALE D'UN CHIEN ATTEINT D'UN CIRCUMANALOME (ZANUTO ET AL. 2021)	36
FIGURE 18 : THERMOGRAMME AVANT (A) ET 120 MINUTES APRES (B) UNE SEANCE DE RADIOTHERAPIE SUR UNE TUMEUR INTRA-NASALE CHEZ UN CHIEN : LA TEMPERATURE DE LA TRUFFE AUGMENTE AU-DELA DE 40°C A L'ISSUE DU TRAITEMENT (SAEKI ET AL. 2021)	37
FIGURE 19 : THERMOGRAMME D'UN CROTALE CASCABELLE ILLUSTRANT LE GRADIENT THERMIQUE LIE AU REFROIDISSEMENT DES VOIES RESPIRATOIRES. (TATTERSALL 2016)	38
FIGURE 20 : BIOMECHANIQUE VERTEBRALE, ILLUSTRATION DES MOUVEMENTS VERTEBRAUX (VIKTORIYA KABANOVA, 2019)	44
FIGURE 21 : EXEMPLE D'UNE DYSFONCTION VERTEBRALE ASSOCIANT PLUSIEURS MOUVEMENTS VERTEBRAUX (CLEMEDECINE 2017)	45
FIGURE 22 : MORPHOLOGIE DES DIFFERENTES VERTEBRES LE LONG DE LA COLONNE VERTEBRALE (PUSEY, BROOKS, JENKS 2010).....	45
FIGURE 23 : COUPE TRANSVERSALE DE LA MOELLE EPINIÈRE ET DE SES ENVELOPPES MENINGEES (COLLIN 2010)	46
FIGURE 24 : VUE DORSALE DE LA PORTION TERMINALE DE LA MOELLE EPINIÈRE ET DE SES MENINGES, APRES OUVERTURE DU CANAL VERTEBRAL (COLLIN 2010)	46
FIGURE 25 : ORGANISATION DU FUSEAU NEUROMUSCULAIRE (ELLOWAY, TAYLOR, DURBABA 2015)	48
FIGURE 26 : PHYSIOLOGIE DU REFLEXE MYOTATIQUE (DOLBOW, THROCKMORTON 2022)	49
FIGURE 27 : LES POINTS DE TENSIONS RESULTENT DU RACCOURCISSEMENT PERENNE D'UN PETIT NOMBRE DE SARCOMERES. CE RACCOURCISSEMENT EST INDUIT EGLEMENT A L'ETIREMENT DES SARCOMERES EN AMONT ET EN AVAL DU POINT DE TENSION (SHAH ET AL. 2015)	51
FIGURE 28 : LOCALISATION DES POINTS DE TENSION LES PLUS COURANTS CHEZ LE CHEVAL D'APRES MEAGHER (ESER, PRUDHOMME 2013) ...	52
FIGURE 29 : BALANCE A PLATEAU ILLUSTRANT LE CONCEPT DE DYSFONCTION OSTEOPATHIQUE : UN OBSTACLE S'EST FORME ENTRE LE FLEAU ET LE POINT D'EQUILIBRE. LE FLEAU NE PEUT PLUS REVENIR A CET ETAT D'EQUILIBRE, MALGRE LA MISE EN JEU DE FORCES QUI VONT DANS CE SENS.....	53
FIGURE 30 : REPRESENTATION DE L'AMPLITUDE ET DE LA TENSION DANS UNE SITUATION PHYSIOLOGIQUE : LE POINT NEUTRE EST POSITIONNE ENTRE LES DIFFERENTES BARRIERES PHYSIOLOGIQUES ELASTIQUES ET ANATOMIQUES. LA TENSION REPRESENTEE PAR LA COURBE ROUGE AUGMENTE DE FAÇON EXPONENTIELLE A L'APPROCHE DES DIFFERENTES BARRIERES (GETM ASETHEMA 2013)	54
FIGURE 31 : RESTRICTION DE MOBILITE EN CAS DE DYSFONCTION : SUR LE SCHEMA DE GAUCHE, L'AMPLITUDE ARTICULAIRE EST QUANTITATIVEMENT ALTEREE ; SUR CELUI DE DROITE, ELLE EST QUALITATIVEMENT MODIFIEE (GETM ASETHEMA 2013)	54
FIGURE 32 : PRINCIPALES CHAINES MUSCULAIRES DU CHEVAL (NEVIN, COLLES, TOZZI 2020)	56
FIGURE 33 : POSITIONNEMENT DE L'OSTEOPATHE POUR TESTER LA FLEXION DU GARROT (ESER, PRUDHOMME 2013).....	57
FIGURE 34 : POSITION DES MAINS DE L'OSTEOPATHE POUR TESTER LA FLEXION ET LA ROTATION DES VERTEBRES THORACIQUE (ESER, PRUDHOMME 2013)	59
FIGURE 35 : POSITIONNEMENT DE L'OSTEOPATHE POUR TESTER LA MOBILITE DES COXAUX (ESER, PRUDHOMME 2013)	60

FIGURE 33 : INTERIEUR D'UN BOX UTILISE LORS DE L'EXPERIMENTATION (©B. LEMAIRE)	66
FIGURE 34 : FRISE CHRONOLOGIQUE ILLUSTRANT LE DEROULEMENT DU PROTOCOLE	68
FIGURE 35 : EXEMPLE DE REALISATION D'UN CLICHE (©B. LEMAIRE)	68
FIGURE 36 : EXEMPLE DU THERMOGRAMME D'UN CHEVAL DE L'ETUDIE	69
FIGURE 37 : DIFFERENTES POSSIBILITES DE COURBES ROC ET LEUR INTERPRETATION	73
FIGURE 38 : REPARTITION DES CHEVAUX TRAITES ET TEMOINS PAR RACES	74
FIGURE 39 : REPARTITION DES CHEVAUX TRAITES ET TEMOINS PAR CLASSES D'AGES	74
FIGURE 40 : REPARTITION DES CHEVAUX TRAITES ET TEMOINS EN FONCTION DE LEUR UTILISATION	75
FIGURE 41 : REPARTITION DES CHEVAUX TRAITES ET TEMOINS EN FONCTION DE LA DISCIPLINE PRATIQUEE	75
FIGURE 42 : DIAGRAMME DE TUKEY RESUMANT, POUR CHAQUE LOT, LE NOMBRE D'ASYMETRIES RESOLUES ENTRE LES DIFFERENTS CLICHES...	78
FIGURE 43 : DIAGRAMME DE TUKEY RESUMANT, POUR CHAQUE LOT, LE NOMBRE D'ASYMETRIES MAINTENUES ENTRE LES DIFFERENTS CLICHES	79
FIGURE 44 : DIAGRAMME DE TUKEY RESUMANT, POUR CHAQUE LOT, LE NOMBRE D'ASYMETRIES APPARUES ENTRE LES DIFFERENTS CLICHES .	79
FIGURE 45 : DIAGRAMME DE TUKEY RESUMANT, POUR CHAQUE LOT, LE NOMBRE GLOBAL D'ASYMETRIES SELON LEUR EVOLUTION (APPARUES, MAINTENUES, RESOLUES)	80
FIGURE 46 : COURBE ROC ASSOCIEE A LA REGRESSION LOGISTIQUE, APPLIQUEE A L'ENSEMBLE DES DONNEES RECUEILLIES LORS DU PROTOCOLE	82
FIGURE 47 : COURBE ROC ASSOCIEE A LA REGRESSION LOGISTIQUE, APPLIQUEE A L'ENSEMBLE DES DONNEES DU GROUPE DES CHEVAUX TEMOINS	83
FIGURE 48 : COURBE ROC ASSOCIEE A LA REGRESSION LOGISTIQUE, APPLIQUEE A L'ENSEMBLE DES DONNEES DU GROUPE DES CHEVAUX TRAITES	84

TABLE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : COMPARATIF DE SIX PUBLICATIONS UTILISANT LA THERMOGRAPHIE EQUINE	27
TABLEAU 2 : LISTE DES POINTS DE TENSIONS LES PLUS COURANTS ET DE LEUR LOCALISATION CHEZ LE CHEVAL D'APRES MEAGHER, CORRESPONDANT A CEUX PLACES SUR LE CHEVAL DE LA FIGURE PRECEDENTE (ESER, PRUDHOMME 2013).....	52
TABLEAU 3 : EXEMPLE DU RELEVÉ DES TEMPERATURES DU THERMOGRAMME D'UN CHEVAL.....	70
TABLEAU 4 : TABLEAU DE CONTINGENCE COMPARANT LES PREDICTIONS DU MODELE A LA REALISATION DES EVENEMENTS DANS LE PROTOCOLE	72
TABLEAU 5 : RESUME DE L'ÉVOLUTION DES ASYMETRIES ENTRE LES CLICHES 1 ET 2 POUR LES CHEVAUX TEMOINS.....	76
TABLEAU 6 : PARAMETRES DESCRIPTIFS DE L'ÉVOLUTION DES ASYMETRIES RESOLUES SELON LES CLICHES ET LES LOTS. LIGNES BLEUES : LOT DES TEMOINS – LIGNES VERTES : LOT DES TRAITES	77
TABLEAU 7 : PARAMETRES DESCRIPTIFS DE L'ÉVOLUTION DES ASYMETRIES MAINTENUES SELON LES CLICHES ET LES LOTS. LIGNES BLEUES : LOT TEMOIN – LIGNES VERTES : LOT TRAITE	77
TABLEAU 8 : PARAMETRES DESCRIPTIFS DE L'ÉVOLUTION DES ASYMETRIES APPARUES SELON LES CLICHES ET LES LOTS.....	78
TABLEAU 9 : RESULTATS DES DIFFERENTS TESTS DE KRUSKAL-WALLIS	80
TABLEAU 10 : ESTIMATION DES EFFETS FIXES OBTENUE APRES L'APPLICATION D'UNE REGRESSION LOGISTIQUE A L'ENSEMBLE DES DONNEES RECUEILLIES LORS DU PROTOCOLE.....	81
TABLEAU 11 : TABLEAU DE CONTINGENCES ASSOCIEES A LA REGRESSION LOGISTIQUE, APPLIQUEES A L'ENSEMBLE DES DONNEES RECUEILLIES LORS DU PROTOCOLE	82
TABLEAU 12: ESTIMATION DES EFFETS FIXES OBTENUS APRES L'APPLICATION D'UNE REGRESSION LOGISTIQUE AUX DONNEES DU GROUPE DES CHEVAUX TEMOINS.....	82
TABLEAU 13 : TABLEAU DE CONTINGENCES ASSOCIEES A LA REGRESSION LOGISTIQUE, APPLIQUEES AUX DONNEES DU GROUPE DES CHEVAUX TEMOINS	83
TABLEAU 14 : ESTIMATION DES EFFETS FIXES OBTENUS APRES L'APPLICATION D'UNE REGRESSION LOGISTIQUE AUX DONNEES DU GROUPE DES CHEVAUX TRAITES	83
TABLEAU 15 : TABLEAU DE CONTINGENCES ASSOCIEES A LA REGRESSION LOGISTIQUE, APPLIQUEES AUX DONNEES DU GROUPE DES CHEVAUX TRAITES.....	84
TABLEAU 16 : COMPARAISON DES MODELES EN FAISANT VARIER LA TEMPERATURE SEUIL, C'EST A DIRE LA DIFFERENCE DE TEMPERATURE A PARTIR DE LAQUELLE ON CONSIDERE QU'IL Y A UNE ASYMETRIE	85
TABLEAU 17 : IMPACT D'UNE SEANCE D'OSTEOPATHIE SUR LES ASYMETRIES THERMIQUES DORSALES MESUREES 2 HEURES ET 7 JOURS APRES, SUR LES CHEVAUX TRAITES	86

TABLE DES ABRÉVIATIONS

T : vertèbre thoracique
L : vertèbre lombaire
S : vertèbre sacrée
Cx : vertèbre coccygienne

Lexique

Bolomètre : détecteur convertissant l'énergie d'un rayonnement incident en énergie thermique qu'il mesure (Camus 2002).

Bruit : ensemble de perturbations aléatoires se superposant au signal utile (Larousse 2022).

Corps noir : corps idéal qui absorbe la totalité des rayons incidents, qu'il convertit en énergie thermique sans émettre d'énergie lumineuse, que cela soit par diffusion ou réflexion (UVED (Université Virtuelle Environnement et Développement durable 2008).

Corps gris : corps qui émet uniformément chaque longueur d'onde (Tattersall 2016).

Domaines de rayonnements infrarouges :

- **SWIR** (« *Short Wavelength Infrared* ») : rayonnement infrarouge dont les longueurs d'ondes se situent entre 0,75 et 2,5 micromètres,
- **MWIR** (« *Medium Wavelength Infrared* ») : rayonnement infrarouge dont les longueurs d'ondes se situent entre 2,5 et 5 micromètres,
- **LWIR** (« *Large Wavelength Infrared* ») : rayonnement infrarouge dont les longueurs d'ondes se situent entre 8 et 13,5 micromètres.

Émittance : capacité propre à chaque corps non idéal d'absorber et d'émettre des rayonnements (Le Robert 2022, Tattersall 2016).

Émissivité : capacité propre à chaque corps gris, idéal, d'absorber et d'émettre des rayonnements. Il est d'usage en thermographie d'utiliser ce terme pour des corps qui ne le sont pas (Le Robert 2022).

Luminance énergétique (« *Spectral radiance* ») : intensité lumineuse émise par unité de surface apparente de la source (Le Robert 2022).

NETD (« *Noise Equivalent Thermal Difference* ») : différence de température, en millième de Kelvin ou millième de degré Celsius, nécessaire pour observer un signal équivalent au bruit interne. Il est habituellement mesuré à 30°C. (Moineau Instrument - IHM 2020).

Rayonnement : ensemble des radiations émises par une source sous forme d'ondes électromagnétiques ou de particules ((UVED (Université Virtuelle Environnement et Développement durable) 2008) :

- **incident** : rayonnement issu de la source qui rencontre une surface,
- **réfléchi** : renvoi d'un rayonnement par une surface sans changement de fréquence des radiations monochromatiques qui le composent,
- **absorbé** : rayonnement converti par un corps en énergie interne,
- **transmis** : rayonnement qui passe au travers un milieu.

INTRODUCTION

L'ostéopathie est une discipline thérapeutique à laquelle il est aujourd'hui courant de recourir dans le cadre du suivi médical des chevaux de selle au travail. Néanmoins, sa popularisation grandissante a conduit à un besoin d'encadrement réglementaire afin de s'assurer de pérenniser la qualité des soins à leurs bénéficiaires. Pour cette raison, depuis le 21 juillet 2017, un décret paru au Journal Officiel impose aux conseils régionaux de l'Ordre des vétérinaires de tenir à jour des listes d'ostéopathes non vétérinaires ayant satisfait à une épreuve d'aptitude.

En parallèle, la médecine vétérinaire, sous l'angle de la médecine fondée sur les preuves, s'intéresse de près à l'ostéopathie pour tenter d'expliquer les mécanismes physiologiques mis en œuvre dans cette thérapie manuelle. En effet, cette dernière fondée par Andrew Taylor Still s'est initialement appuyée essentiellement sur le ressenti, la connaissance anatomique et l'empirisme.

Cette thèse tente de concilier d'une part une approche thérapeutique individualisée et d'autre part une approche scientifique systématique. Pour ce faire, cette étude se focalise la thermographie, qui se place alors comme un lien possible entre les deux. Ainsi, l'objectif est d'évaluer, à l'aide de la thermographie, l'impact d'un traitement ostéopathique sur la symétrie dorsale des chevaux au travail.

Pour répondre à cette problématique, 24 chevaux du Cadre Noir de Saumur ont été examinés. Après le recueil d'un premier thermogramme, une partie d'entre eux a été traitée par Isabelle Burgaud, vétérinaire ostéopathe de l'institution. Enfin, deux autres thermogrammes de tous les chevaux ont été enregistrés à court et moyen terme. C'est ensuite le dénombrement des asymétries thermiques par thermogramme espacés dans le temps qui a permis d'apprécier l'évolution de la symétrie dorsale et d'en déduire le possible impact de l'ostéopathie.

La première partie, bibliographique, expose les principes de base de la thermographie et de l'ostéopathie. Le but n'est pas de faire une revue exhaustive de ces deux disciplines mais d'en offrir une approche permettant d'aborder la seconde partie, expérimentale, en pleine connaissance de cause. Cette dernière présente l'étude réalisée en juillet 2021 au Cadre Noir de Saumur, qui a consisté à examiner, après une séance d'ostéopathie, l'évolution du nombre d'asymétries thermiques identifiables sur le dos des chevaux.

PREMIÈRE PARTIE : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Émission de rayonnements thermiques

1.1. LE RAYONNEMENT INFRAROUGE

On définit trois interactions différentes entre la matière et le rayonnement : l'absorption, l'émission ainsi que la diffusion :

- L'absorption se produit lorsque le niveau d'énergie de l'onde incidente correspond à la différence entre deux niveaux d'énergie de la molécule touchée. Les photons seront alors absorbés et non transmis. L'intensité du rayonnement diminue alors tandis que la matière convertit l'énergie absorbée du rayonnement en énergie interne,
- La diffusion, qui inclut la réflexion et la transmission, est caractérisée par le renvoi du rayonnement de la matière par la paroi, sans modification de la longueur d'onde,
- L'émission, à l'équilibre thermique, correspond à la production par tout corps d'un rayonnement. La longueur d'onde de ce rayonnement est fonction de sa température car l'énergie interne du corps est convertie en rayonnement thermique (Vincent 2003; Tattersall 2016).

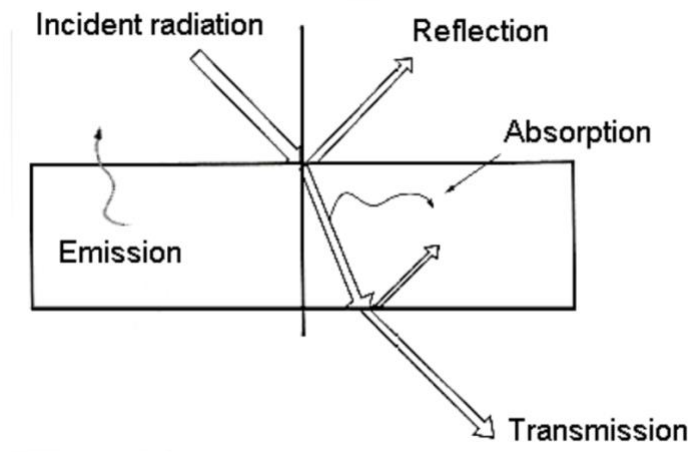


Figure 1 : plusieurs interactions sont possibles lorsqu'un rayonnement incident rencontre un corps : la réflexion et la transmission, l'absorption et l'émission (Hyll 2012)

D'après la seconde loi de Kirschoff, le rayonnement incident sur un corps correspond à la somme des rayonnements absorbés, émis et diffusés. Cependant la plupart des matériaux, dont les corps biologiques, ne transmettent pas les rayonnements. L'équation peut donc être simplifiée en considérant que le rayonnement incident est la somme du rayonnement diffusé et émis. Or, d'après la loi de conservation de l'énergie, un corps à l'équilibre thermodynamique retransmet l'énergie qu'il a reçu, sans quoi il voit sa température augmenter (Tattersall 2016). Le corps noir est défini comme étant un radiateur idéal qui absorbe la totalité des rayons incidents et la convertit en énergie thermique, par diffusion ou réflexion, sans émettre d'énergie lumineuse. Sa température pourrait donc théoriquement augmenter indéfiniment.

La loi de Planck définit le rayonnement du corps noir comme assimilable à un multiple du quantum d'énergie d'un photon, dont la valeur s'obtient par la formule suivante : $E = hc/\lambda$, considérant que E caractérise l'énergie en joules, h la constante de Planck en joules.seconde, c la vitesse de la lumière

en mètres/seconde et λ la longueur d'onde en mètres (Bonnet 2005). L'énergie électromagnétique est alors considérée comme un phénomène discret et non continu, comme constaté auparavant. Le spectre obtenu contient un pic correspondant à la longueur d'onde caractéristique de la température de ce corps, exprimée en kelvins (Tattersall 2016).

Ce phénomène est illustré sur le graphique de la figure ci-après : chaque température fixée correspond un rayonnement d'intensité maximale unique, caractérisé par une longueur d'onde. Les longueurs d'onde de ces rayonnements se distribuent alors selon une fonction inverse : plus la température est élevée, plus la longueur d'onde associée au rayonnement d'intensité maximal est courte.

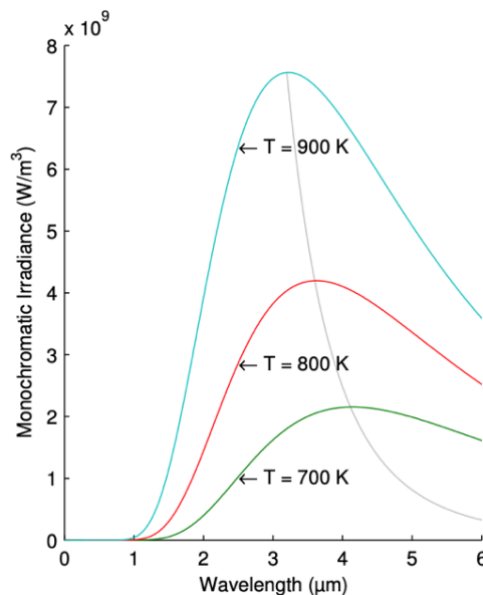


Figure 2 : émission électromagnétique à l'équilibre thermique issue d'objet assimilable à un corps noir illustrant la loi de Planck : à une température donnée d'un corps correspond à une longueur d'onde dont l'intensité d'émission est maximale (Usamentiaga 2014)

Pour conclure sur la loi de Planck, qui donne l'intensité lumineuse du rayonnement émis par un corps noir à une longueur d'onde et une intensité donnée (Tattersall 2016), elle pourrait être illustrée et résumée selon la formule suivante :

$$I(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \times \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

- I : énergie émise par unité de temps et de surface
- h : constante de Planck
- c : célérité de la lumière
- λ : longueur d'onde du rayonnement
- T : température du corps
- k : constante de Boltzman

La loi Wien découle de la loi de Planck. Elle affirme que tout corps chauffé émet un rayonnement électromagnétique caractérisé par une densité d'énergie et un spectre : plus la température augmente, plus l'énergie associée au rayonnement est importante, tout comme sa fréquence. Ainsi, la longueur d'onde d'intensité maximale λ_{\max} émise par un corps est inversement proportionnelle à la température de ce corps : plus la température d'un corps augmente, plus son énergie augmente, plus la longueur d'onde émise est courte. La loi de Wien permet donc d'obtenir la courbe liant la

densité d'énergie d'un corps noir, soit la longueur d'onde à la température de ce corps noir qui répond à la formule suivante :

$$\lambda_{\max} = h c / (4,965 kT)$$

λ_{\max} : longueur d'onde d'intensité maximale en nm

h : constante de Planck : $6\,625 \cdot 10^{-34}$ J.s

c : célérité de la lumière : $299\,792\,458$ m.s⁻¹

k : constante de Boltzmann : $1,3806503 \cdot 10^{-23}$ J.K⁻¹

T : température du corps opaque en k

La figure suivante illustre le rayonnement du corps noir selon cette équation. Les courbes colorées représentent l'émission du rayonnement d'un corps noir à une température donnée en Kelvin K. MWIR et LWIR correspondent au domaine du moyen et lointain infrarouge défini ci-après. Les intensités de rayonnement maximal se répartissent alors selon une droite affine conformément à la loi de Wien.

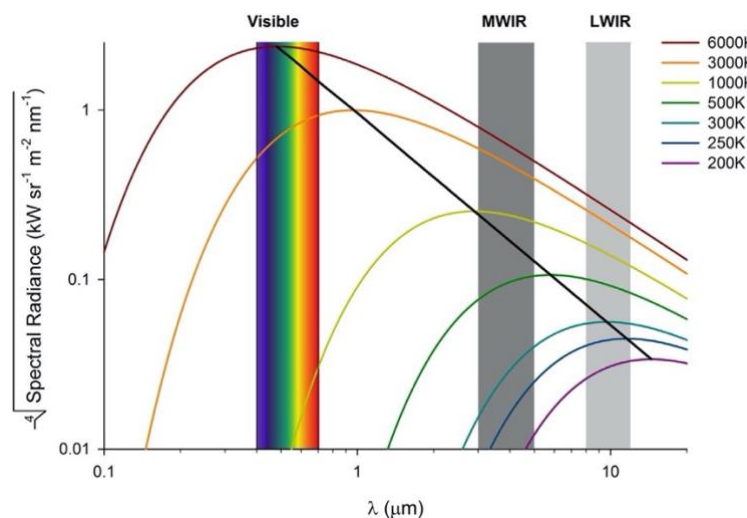


Figure 3 : rayonnement du corps noir selon la loi de Planck (Tattersall 2016)

On observe donc qu'un corps à l'équilibre thermique émet un spectre qui lui est propre pour chaque température (De Sousa Menenses 2021). À température ambiante ordinaire, le rayonnement maximal est un rayonnement infrarouge. Seule l'énergie rotationnelle et vibrationnelle des molécules est modifiée. Le rayonnement n'est pas suffisant pour modifier l'énergie électronique des molécules (Dalibart, Servant 2000).

Au sein du rayonnement infrarouge, trois domaines sont distinguables :

- le proche infrarouge SWIR (*Short Wavelength Infrared*) : les longueurs d'ondes de ces rayonnements se situent entre 0,75 et 2,5 micromètres. Considérés comme les plus énergétiques et les plus proches du domaine visible, ils correspondent à la réflexion du rayonnement solaire,
- le moyen infrarouge MWIR (*Medium Wavelength Infrared*) : les longueurs d'ondes se situent entre 2,5 et 5 micromètres. Ces rayons correspondent principalement au rayonnement émis par des corps plus chauds que la température ambiante. Ces longueurs d'ondes intéressent particulièrement les militaires,
- le lointain infrarouge LWIR (*Large Wavelength Infrared*) : ces rayonnements sont les moins énergétiques et les plus proches de l'énergie hertzienne. Leurs longueurs d'ondes se situent entre 8 et 13,5 micromètres. La majorité des objets inertes réfléchissent des ondes appartenant à ce domaine (Wala 2014).

La figure 4 ci-après en montre une représentation visuelle :

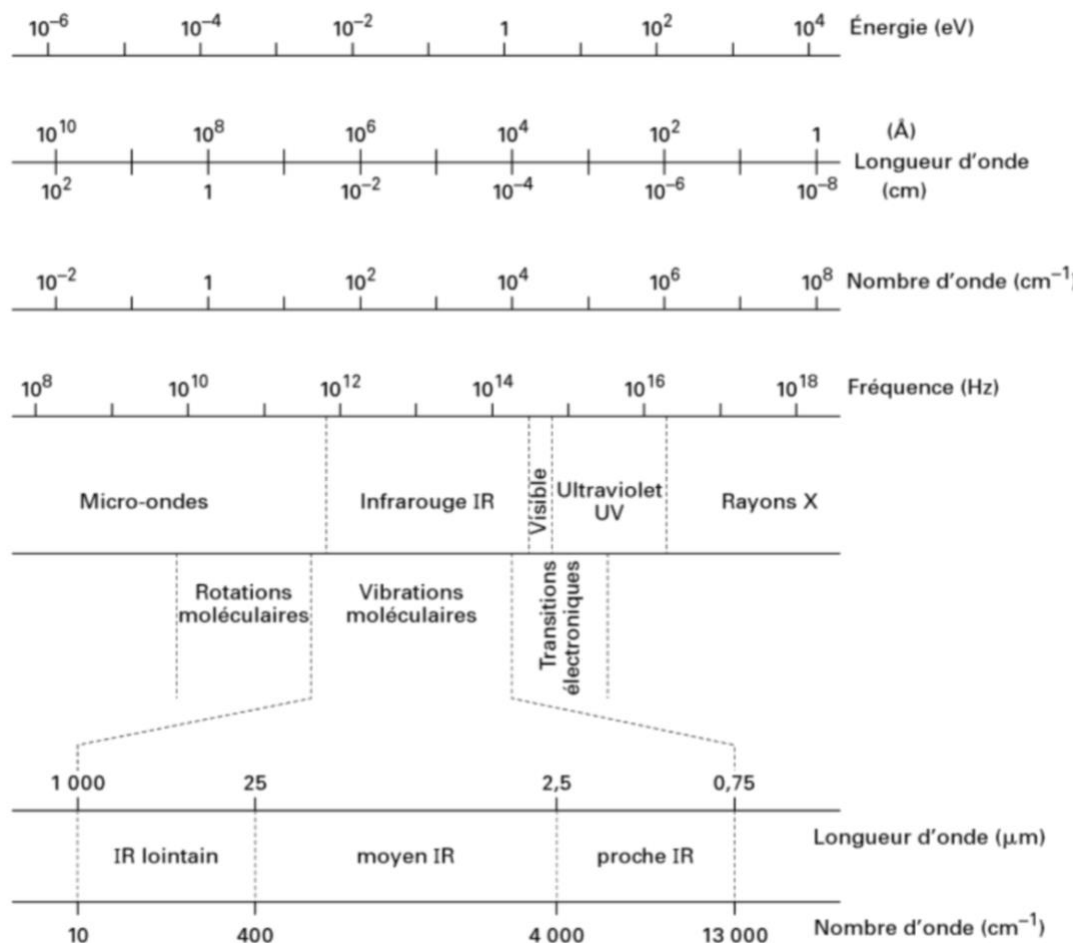


Figure 4 : domaines spectraux du rayonnement électromagnétique (Dalibart, Servant 2000)

1.2. LA THERMOREGULATION

1.2.1. Perception et intégration d'un écart de température

La thermorégulation est le mécanisme par lequel les animaux homéothermes maintiennent leur température corporelle centrale, dans un intervalle restreint adapté au fonctionnement optimal de leur métabolisme. Cette thermoneutralité, dont la mesure se situe autour de 38°C, est permise par la mise en place d'un mécanisme d'évacuation ou d'accumulation de chaleur. La température centrale est celle des organes internes du corps. Elle s'oppose à la température périphérique, plus basse, des enveloppes corporelles.

Le centre de contrôle de la température est situé dans l'hypothalamus. Alors que son aire pré-optique antérieure est riche en thermorécepteurs sensibles au chaud, les récepteurs sensibles aux températures froides se situent principalement dans la peau mais aussi dans des tissus plus profonds comme les viscères abdominaux, la moelle osseuse ou certaines grosses veines. Cependant, il existe également des thermorécepteurs sensibles au chaud dans la peau. Ces informations sont ensuite transmises à l'hypothalamus postérieur qui agit comme un thermostat. À partir des retours sur la température centrale du corps et sur la température extérieure, il va déclencher divers mécanismes nerveux et hormonaux afin d'élever, d'abaisser ou de maintenir la

température corporelle. Ces mécanismes dépendent des quatre modes de transferts thermiques possibles d'un corps chaud vers un corps plus froid :

- la conduction : le transfert thermique s'effectue sans déplacement macroscopique de matière. La chaleur diffuse de proche en proche. Elle est proportionnelle au gradient de température entre les deux corps. L'intensité de cet échange est limitée par rapport aux autres modes d'échanges,
- la convection : la chaleur est véhiculée par un fluide en mouvement. Par exemple, le sang diffuse une partie de la chaleur des tissus les plus chauds vers les tissus les plus froids,
- la radiation : l'énergie est propagée par les ondes électromagnétiques sans support matériel nécessaire. La longueur d'onde de ce rayonnement dépend de la température du corps chaud. C'est lui qui est étudié en thermographie grâce à la loi de Wien,
- l'évaporation : la perte de chaleur est liée à la vaporisation de l'eau, un changement d'état endodermique. Ce phénomène est observé sur la peau ou bien au niveau des voies respiratoires (Hinchcliff, Kaneps, Geor 2008; Davies 2017; Reed, Bayly, Sellon 2018).

1.2.2. Mécanismes d'augmentation de la température corporelle

D'une part, la thermogénèse participe à l'augmentation de la température de l'organisme. La production d'un travail musculaire est un des principaux moyens d'y parvenir, qu'il s'agisse de mouvements volontaires ou non tels que le frissonnement. Une partie du travail fourni par la contraction des muscles squelettiques est convertie en énergie thermique. En effet, l'efficacité de conversion de l'énergie chimique stockée en énergie mécanique est de 75 à 80 %, ce qui implique une perte thermique de 20 à 25 %. De plus, un environnement froid, un travail, un stress, la libération de catécholamines ou bien la consommation d'aliments augmentent l'activité métabolique à l'origine de la thermogénèse. Sur un temps plus long, le taux métabolique de base peut également être augmenté en réponse à la production d'hormones thyroïdiennes. Enfin, il ne faut pas négliger l'importance de l'environnement extérieur. Par exemple, le rayonnement solaire peut apporter jusqu'à 15 % du gain de chaleur d'un cheval au travail, alors qu'un courant d'air aura tendance à favoriser la perte de chaleur. Le comportement du cheval peut donc fortement influencer l'intensité des différents échanges thermiques.

D'autre part, le cheval peut également mettre en place des procédés de conservation de la chaleur c'est-à-dire de réduction des échanges thermiques. La vasoconstriction cutanée en est un exemple. La thermolyse par convection est amoindrie car une fraction réduite du volume sanguin entre en contact avec un milieu de faible température. De plus, la diminution du flux sanguin superficiel diminue la température cutanée : le gradient de température entre la température de surface et celle du milieu extérieur s'amenuisant, les pertes par rayonnement et par conduction sont limitées. Enfin, la formation d'un pelage épais associé à la contraction des muscles érecteurs du poil participent à la formation d'une couche d'air isolante (Hinchcliff, Kaneps, Geor 2008; Davies 2017; Reed, Bayly, Sellon 2018).

1.2.3. Mécanismes de diminution de la température corporelle

La masse corporelle du cheval est importante par rapport à sa surface, ce qui favorise la conservation de la chaleur et non son élimination. En outre, le taux métabolique peut considérablement s'intensifier au travail. Lors d'un effort où la consommation d'oxygène est maximale, c'est-à-dire lorsqu'elle a atteint la VO₂max, le taux métabolique est compris entre 40 et 60 fois le taux métabolique du cheval au repos. Par exemple, pour un cheval de 500 kg avec une

VO₂max de 80 L/min, la production de chaleur est estimée à 400 kcal/min soit, en l'absence de thermorégulation, une augmentation de la température corporelle de 1°C/min.

La convection est l'un des premiers mécanismes d'évacuation de la chaleur chez le cheval. Il dépend notamment de la vitesse de renouvellement de l'air. En effet, l'échange de l'air réchauffé par de l'air plus frais augmente le gradient de température entre l'air et la peau ou le tractus respiratoire, ce qui favorise la dissipation de la chaleur. La vasodilatation cutanée favorise également cette déperdition de chaleur : consécutivement à l'augmentation du flux, un plus grand volume sanguin chaud entrera en contact avec la peau refroidie par l'air ambiant. Davantage de chaleur sera alors transmise à la peau et dispersée dans l'environnement. De plus, il est important de noter que la circulation sanguine est le principal vecteur de la chaleur des sites de production vers les sites de thermolyse que sont la peau et les poumons.

Lorsque la convection, associée à une vasodilatation périphérique, ne suffit plus à la thermolyse, la sudation se met en place. La perte de chaleur repose alors sur l'évaporation de l'eau et dépend principalement de la pression de vapeur saturante de l'eau. De ce fait, ce mécanisme est limité lorsque l'atmosphère est humide. A l'inverse, il est amplifié lorsque le renouvellement de l'air est important, afin d'éliminer l'air chargé d'eau au contact de la peau. Ce mécanisme très efficace peut représenter jusqu'à 65% de la thermolyse pendant l'exercice. L'évaporation d'un litre de sueur équivaut à la chaleur produite en 2 minutes de travail intense ou 6 minutes de travail modéré. Ce phénomène est présent sans obligatoirement observer de sueur. En effet, un cheval en été peut perdre six litres par jour, sans humidité visible sur la peau. Même si les chevaux n'halètent pas, ce qui limite son efficacité, l'évaporation de l'eau issue du tractus respiratoire évacue également une partie de la chaleur excédentaire.

Enfin, sur le long terme, la régulation des hormones thyroïdiennes limite le métabolisme basal et donc la thermogénèse (Hinchcliff, Kaneps, Geor 2008; Davies 2017; Reed, Bayly, Sellon 2018). Le schéma ci-après synthétise les mécanismes de thermorégulation chez le cheval.

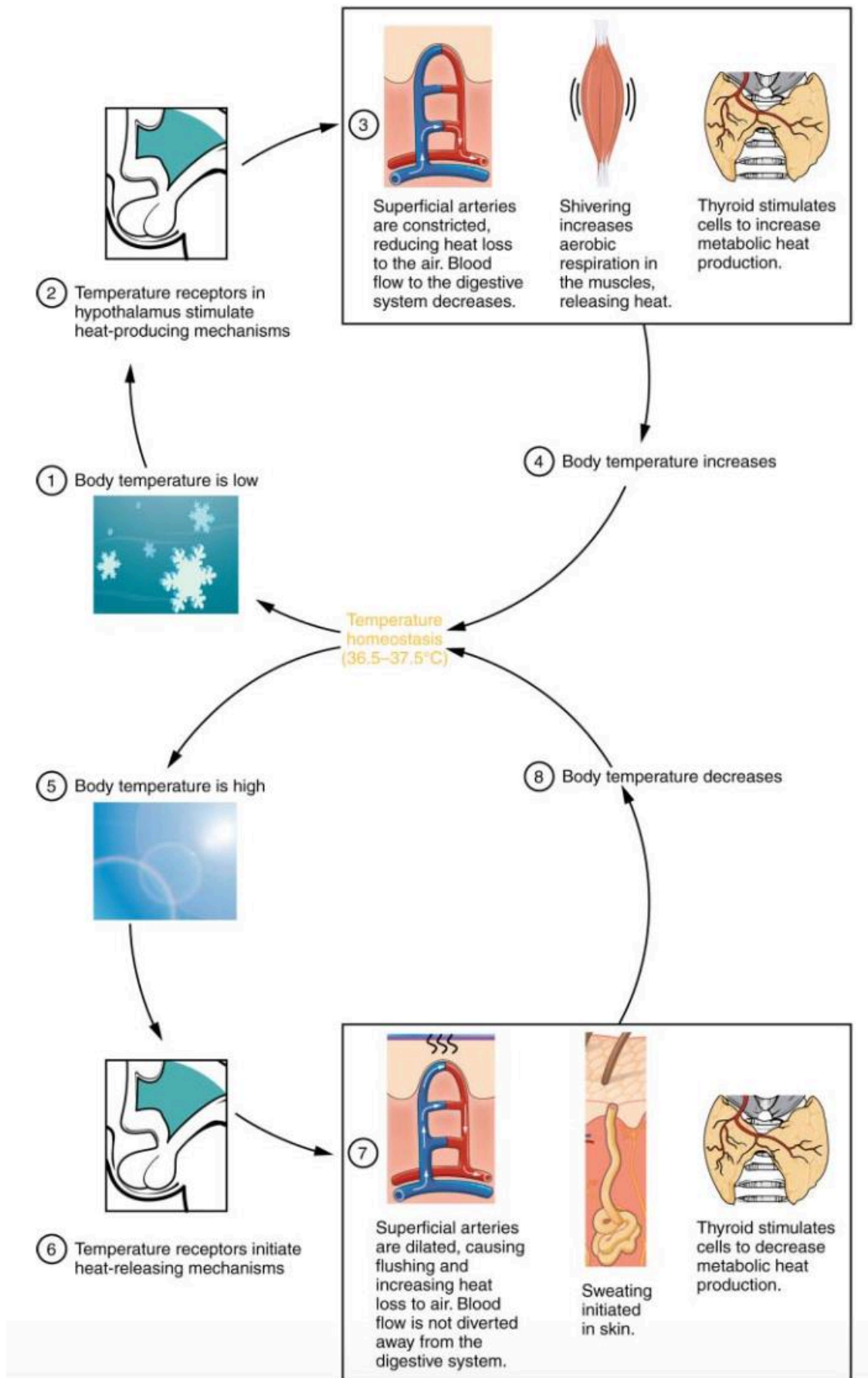


Figure 5 : principales adaptations physiologiques du cheval dans le cadre de la thermorégulation (Davies 2017)

2. La thermographie

2.1. HISTOIRE DE LA THERMOGRAPHIE

Le rayonnement infrarouge a été découvert par le physicien Frederick William Herschel le 11 février 1800. Ce dernier découvre que la décomposition du rayonnement solaire en un spectre ne s'arrête pas au domaine du visible. Pour étayer cela, il mène une expérience consistant à mesurer la température de chaque domaine de couleur du spectre issu du passage du rayonnement solaire au travers d'un prisme. W. Herschel montre alors que le point où la température est la plus haute se situe à côté de la couleur rouge, au-delà du domaine du visible : cette chaleur est issue du rayonnement infrarouge. Ces rayons, alors nommés « *calorific rays* », possèdent les mêmes propriétés que les rayons visibles. Une vingtaine d'année plus tard, Thomas Johan Seebeck met en lumière l'existence de la thermoélectricité, caractérisée par la présence d'un courant électrique entre deux matériaux conducteurs à des températures différentes. Il permet ainsi d'objectiver l'existence d'un lien entre chaleur et lumière. Quelques années plus tard, M. Melloni réussit à détecter la chaleur émanant d'une personne à une distance de 30 pieds, grâce à un thermocouple réalisé à l'aide de bismuth et de cuivre. Les thermopiles ont ensuite été améliorés en jouant sur les matériaux et la manière de les assembler.

A la fin du XIXème siècle, la découverte de la photoconductivité soulève un réel engouement scientifique. A cette époque, les projets traitant du rayonnement infrarouge sont portés par l'astrologie pour mesurer le rayonnement. En 1887, Hertz découvre le principe de la photoémission : un conducteur irradié par un rayonnement ultraviolet émet des particules chargées négativement. Le développement de cette technologie est ensuite soutenu par les militaires, à l'affut d'avantages techniques exploitables sur le terrain, au cours de la première comme de la seconde guerre mondiale. L'entre-deux guerres est donc marqué par le développement de la détection de photons et la conversion de ce signal en images. Le premier photoconducteur a été mis au point en 1917 aux États-Unis pour l'armée américaine.

A partir des années 1930, en parallèle de la conception d'un convertisseur électro-optique et de l'amélioration de la précision des caméras, la création du National Defense Research Committee permet d'accélérer le développement d'outils utilisant le rayonnement infrarouge. Le concept se rapproche alors de celui que l'on connaît aujourd'hui.

Dans les années 1990, la technologie infrarouge fait un nouveau bond en avant dans son développement, lorsque les États-Unis dévoilent les avancées faites sous contrats militaires pendant la seconde guerre mondiale. Depuis lors, il existe des capteurs non refroidis capables d'imager des scènes à température ambiante.

Aujourd'hui, des microbolomètres qui conjuguent faible coût et haute qualité sont produits. Cette technologie devient alors accessible à de nouveaux champs d'applications non militaires tels que la surveillance, l'aide à la conduite ou la médecine.

2.2. ACQUISITION D'UN THERMOGRAMME

La thermographie permet de mesurer la température de surface d'un corps. Son intérêt diagnostic concerne avant tout les structures internes. Il est donc essentiel, pour pouvoir interpréter les clichés, de ne pas modifier artificiellement et localement la température de la peau. De plus, toute

inhomogénéité de la peau, comme par exemple une cicatrice, transmet différemment les ondes et s'observe sur le thermogramme, en raison de sa constitution différente. De ce fait, un contrôle strict de l'ensemble des conditions environnementales est nécessaire avant tout examen thermographique. Les clichés sont alors répétables pendant au moins 7 jours (Tunley, Henson 2004).

2.2.1. Détection du rayonnement infrarouge

Lorsqu'un utilisateur manipule une caméra thermique, il cherche à déterminer la température de l'objet d'intérêt. Or celle-ci ne perçoit que des rayons infrarouges et non une température directement. Il lui appartient donc de convertir la longueur d'onde d'intensité maximale de ce rayonnement mesuré en température. Cependant, les performances de la caméra sont mises à mal par un certain nombre de difficultés techniques : elle reçoit non seulement les rayons infrarouges émis par l'objet d'intérêt mais aussi les rayons que ce dernier reflète et transmet. Son capteur perçoit également l'ensemble des rayonnements émis, transmis et réfléchis par l'environnement de l'objet y compris l'atmosphère. On comprend ainsi l'intérêt de simplifier et standardiser au maximum l'environnement des objets d'intérêts, tout comme l'importance de disposer de caméras dotées d'algorithmes. Cependant, les capteurs des caméras ne sont sensibles qu'à des intervalles de longueur d'ondes relativement étroits, associés à des plages de températures restreintes ayant des caractéristiques similaires. Pour un usage sur un animal tel que le cheval, la bande passante est réglée sur le lointain infrarouge, entre 8 à 14 micromètres. C'est grâce à un étalonnage empirique et un logiciel d'analyse conçus par le fabricant via la relation de Planck modifiée, que le lien entre le rayonnement perçu par la caméra thermique et la température de l'objet d'intérêt peut être déterminé (Tattersall 2016).

L'un des facteurs influençant le plus l'image thermique obtenue grâce à la caméra est l'émissivité (Turner 2001). Cette dernière, spécifique à chaque matériau, se définit comme l'efficacité avec laquelle un objet émet des rayonnements infrarouges (FLIR Systems AB, InfraredTraining Center 2012). L'émissivité est aussi influencée par les propriétés physiques du corps choisi, telle que sa forme et donc pas seulement par la seule nature du matériel le composant. Dans ce contexte, il serait donc plus pertinent de parler d'émittance et non d'émissivité, car ce dernier terme est plus approprié à l'usage d'un rayonnement infrarouge appliqué à un matériel idéal. Le terme émissivité est cependant davantage utilisé lorsque l'on désigne des caméras infrarouges. De plus, chaque corps peut émettre sélectivement différents rayonnements ; il devrait donc être caractérisé par plusieurs émissivités selon la longueur d'onde choisie. Ainsi, un corps gris est défini comme un corps qui émet uniformément chaque longueur d'onde. Une émissivité unique peut alors être attribuée à ce corps. En thermographie, les corps sont assimilés à des corps gris. Bien que les êtres vivants soient très divers, ils sont tous assimilables à un corps gris composé d'eau et de matière organique. L'émissivité des tissus biologiques est donc conventionnellement fixée entre 0,95 et 0,98. Dans certains cas, il a été démontré qu'une autre valeur est plus adaptée à une espèce ou une région anatomique particulière.

En tant que corps gris, la température mesurée chez des individus comme chez des chevaux, est influencée par son environnement. Il est plus facile d'estimer cette influence lorsqu'on travaille avec des fonds homogènes. Cependant, au vu de l'émissivité du vivant, l'erreur reste raisonnablement faible. En cas d'erreur sur l'émissivité, il y a une erreur systématique sur la température calculée. Si l'émissivité supposée par le logiciel d'analyse est supérieure à l'émissivité réelle de l'objet d'intérêt, alors une partie du rayonnement réfléchi par ce dernier est considérée comme émis dans les calculs. Ainsi, si l'objet d'intérêt est plus chaud que son environnement, la température calculée est systématiquement surestimée par rapport à la température vraie alors qu'à l'inverse, elle est sous-estimée si l'objet est plus froid que son environnement. Cette erreur, pour des objets d'intérêt

vivants, est estimée à 2°C en valeur absolue. Elle peut être amplifiée par l'air ambiant, qui apprécie difficilement sa juste valeur lorsque la caméra et l'objet d'intérêt sont trop éloignés, ou bien en cas d'atmosphères humides : en effet, les températures chaudes conduisent à une surestimation de la réalité, tandis que le froid donne des résultats sous-évalués (Tattersall 2016).

Par ailleurs, avant toute analyse, il est nécessaire de s'intéresser à la précision de la caméra afin de différencier les informations significatives du reste des données. En effet, sur l'image finale, la valeur de chaque pixel en °C est issue du traitement informatique du rayonnement perçu par un bolomètre. Il existe une erreur possible liée à des modifications de sensibilité aléatoires réparties selon une courbe gaussienne. Pour pallier ce problème, la majorité des caméras sont équipées d'une fonction de correction de non uniformité. C'est notamment au regard de ces informations et des possibles erreurs qu'il faut analyser les images par région d'intérêt, grâce à un logiciel spécifique. Il est également important de vérifier que la sensibilité thermique de la caméra est suffisante au regard des objectifs fixés. Dans le domaine vétérinaire il est recommandé d'avoir une sensibilité thermique en deçà de 50 NETD à 30°C (*Noise Equivalent Temperature Difference*). Ce critère évalue la valeur efficace du bruit par rapport à la courbe d'étalonnage de la caméra, autrement dit, la capacité à restituer une valeur quantitative précise d'une différence de température (Tattersall 2016; Turner et al. 2021; Turner 2001).

2.2.2. Influence de l'environnement cutané et sous-cutané

Le poil est un isolant permettant de limiter les déperditions de chaleur de la peau. Ainsi, la présence de la couverture pileuse augmente artificiellement la température de la peau. En revanche, lorsque la longueur des poils est homogène et qu'ils sont aplatis le long du corps, il n'y a pas de modification significative du thermogramme : dans ce cas, on observe seulement une baisse du contraste de l'image. Il n'est donc pas nécessaire de tondre les animaux avant la prise de clichés. Cependant, il est important de cartographier les cicatrices. Leur composition, différente de celle de la peau saine, et leur absence de poil aboutissent à une modification locale du cliché. Afin que la peau ait le temps d'atteindre l'équilibre thermique, les couvertures et bandages doivent être retirés 1 heure avant la prise de clichés. Si le pelage n'est pas propre, un pansage doit être effectué, au plus tard 20 minutes avant le début de l'examen. Tout produit en contact avec la peau du cheval, tel qu'un spray ou une crème, est susceptible d'apporter une modification de celle-ci et doit, pour cette raison, être évité dans la mesure du possible. De même, il est important de ne pas toucher ou manipuler les zones photographiées. En ce sens également, les chevaux ne doivent pas se coucher avant l'examen. Si un examen préalable du cheval est nécessaire, on considère que la peau retrouve son équilibre thermique dans l'heure suivante.

Pour permettre au cheval de s'acclimater au lieu de l'examen et à sa peau d'atteindre son équilibre thermique, une présence anticipée de l'équidé sur place est requise. Ces conditions sont indispensables pour obtenir une mesure fiable à 95 %. Le temps nécessaire est estimé entre 40 et 60 minutes en cas d'exposition au soleil ou aux courants d'air. Cette durée peut être diminuée lorsque l'écart de température entre l'environnement initial et la salle d'examen est faible. Elle est alors fréquemment fixée à 20 minutes, voire supprimée dans certains cas (Tunley, Henson 2004; Turner 2001).

D'autre part, la température de la peau est avant tout influencée par la température du corps et plus particulièrement son environnement sous-jacent direct. Ainsi, l'activité musculaire ou la modification du tonus vasomoteur des vaisseaux superficiels influence la température cutanée. C'est cet effet qui est recherché pour identifier des zones inflammatoires très vascularisées ou au

contraire, des zones « bloquées » froides et peu vascularisées. Pour faire ce lien, le débit de perfusion ne doit pas avoir été influencé par des facteurs extérieurs. De ce fait, il est important de ne pas administrer de stéroïdes, d'agonistes et d'antagonistes sympathiques, d'opiacés, de vasoactifs ni de timbres transdermiques aux chevaux dans les 24 heures précédant les clichés. De même, les traitements par le froid ou le chaud, tout comme l'administration de produits traversant la peau ou l'emploi de techniques d'électrodiagnostic doivent être interrompus 24 heures avant le début de l'examen. Les blocs anesthésiques sont également à éviter durant les 3 jours précédant l'examen. Enfin, le travail des chevaux est proscrit dans les 2 heures précédant la prise de cliché, car l'activité métabolique accrue des muscles augmente le débit de perfusion (Turner et al. 2021).

2.2.3. Influence de l'environnement extérieur

Les chevaux, comme tous les animaux homéothermes, possèdent de nombreux mécanismes d'adaptation et de maintien de sa température corporelle. Certains d'entre eux concernent l'environnement cutané, tels que la modification de pression de perfusion ou la sudation. Or, ces mécanismes perturbent la température de la peau. Ils impactent donc la température de surface perçue et altèrent l'analyse du thermogramme. On note qu'un stress provoque également ces modifications notamment à cause des conséquences de l'agitation du cheval. Pour cette raison, Turner conseille en 2001 de maintenir la température de la pièce dans un idéal entre 20°C et 30°C. En deçà de cette température, on peut considérer que le rayonnement et la convection sont responsables d'une déperdition de chaleur et non la transpiration. En revanche, aucune information n'est précisée quant à l'environnement ou aux caractéristiques de la population de chevaux. Il semble possible que certains chevaux aient chaud et transpirent en deçà de cette température. Par exemple, ils peuvent être accoutumés à des températures inférieures, dans un environnement moins humide ou plus aéré que la salle d'examen. Le stress des chevaux peut également les amener à transpirer (Pavelski et al. 2015; Turner 2001).

D'autres conditions doivent également être respectées. Si le cheval est mis à l'abri pour éviter un contact de sa peau avec les rayons du soleil, il ne doit pas non plus être exposé à ces derniers en intérieur. Il est donc nécessaire que la pièce ne possède pas d'ouverture extérieure ni de vitres par lesquelles le rayonnement solaire pourrait atteindre le cheval. Si tel est le cas, il faut calfeutrer ces dernières. De même, la salle doit être exempte de courants d'air pour ne pas diminuer localement et artificiellement la température cutanée. Ce dernier point est particulièrement important lorsque l'environnement direct de la peau est humide, par exemple en cas de sudation ou d'atmosphère confinée. Enfin, certains matériaux comme le métal réfléchissent considérablement les rayonnements incidents. Leur proximité directe avec le cheval doit être proscrite pour ne pas créer d'images construites sur le thermogramme (Tattersall 2016).

2.2.4. Positionnement et angulation de la caméra par rapport à la zone d'intérêt

Idéalement, comme illustré sur le schéma ci-après, le cheval doit être placé à une distance de 0,8 à 2,5 mètres de la caméra, de sorte que la région étudiée occupe 75 % de l'image. On considère qu'à un angle entre 60° et 120° au sol, la modification de l'émissivité est suffisamment faible pour ne pas être prise en compte. Lorsque l'angle sort de cet intervalle, il est recommandé de corriger les valeurs obtenues lors de l'analyse des clichés (Tattersall 2016). Ainsi, en 2013, Westermann et al. n'ont pas observé pas de différence entre des clichés pris à 70°, 90° et 110° à une distance de 1m ou 1,5m.

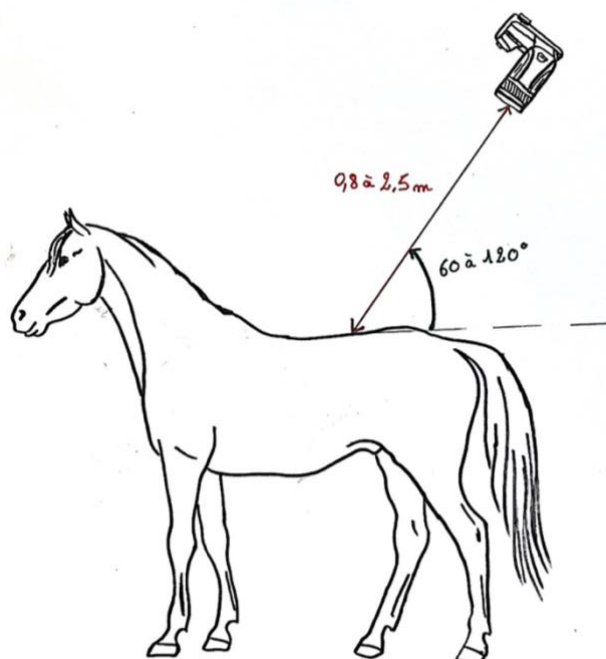


Figure 6 : positionnement idéal de la caméra thermique par rapport à la zone d'intérêt

Lors de la prise de clichés, comme dans les autres techniques d'imagerie, le cadre doit être autant que possible centré sur la zone d'intérêt. Cela permet au focus automatique de la caméra de se faire et facilite aussi l'analyse du cliché dans un second temps. Dans certains cas particuliers, notamment d'objets peu reconnaissables ou très déformés par l'analyse infrarouge, le centrage de l'objet d'intérêt permet de le retrouver plus facilement sur le cliché final. La prise simultanée d'images numériques offerte par certaines caméras trouve également son intérêt dans ces situations (Tattersall 2016).

Enfin, il faut accorder une importance réelle à la netteté du cliché, un objectif parfois difficile à atteindre lorsque les cibles sont en mouvement. En effet, si le cliché est flou et que la différence de température entre l'objet d'intérêt et son environnement est importante, alors les bolomètres des contours de l'objet seront mélangés à ceux de l'environnement. De ce fait, si l'objet est plus chaud que son environnement, il y a une sous-estimation de la température de l'objet qui se confond partiellement à celle du fond du cliché et inversement si la cible est plus froide que son environnement. Ces erreurs peuvent générer un écart de 5°C en valeur absolue s'il y a 20°C de différence entre l'environnement et l'objet d'intérêt.

2.3. ANALYSE DU THERMOGRAMME

2.3.1. Thermogramme normal

Le thermogramme de référence d'un cheval monté se caractérise par la présence d'une bande légèrement plus chaude en regard de la colonne vertébrale. La température diminue linéairement à mesure que l'on progresse en direction abaxiale, à l'exception de la jonction lombosacrée où l'on observe une bande de chaleur plus évasée (Tunley, Henson 2004).

Un cheval sain dans des conditions standardisées présente un thermogramme symétrique. Ainsi, toute modification de cette symétrie peut être interprétée comme révélant la présence d'une lésion tissulaire (Pavelski et al. 2015). Les thermogrammes suivants sont considérés comme des thermogrammes de chevaux sains. Sur la figure 7, on observe la décroissance de la température à

mesure que l'on s'éloigne de la ligne du dos. Elle est mesurée le long des lignes 1, 2 et 3. Sur le thermogramme de gauche, la ligne 1 est placée en regard de T9 et la ligne 2 au niveau de T12. La ligne 3 est positionnée par déduction par rapport à la ligne 2, qui doit être équidistante de la ligne 1 et 3. Sur l'image de droite, la ligne 1 est placée en regard de S1 et la ligne 3 au niveau de l'espace sacro-coccygien. La ligne 2 se positionne à mi-distance entre la première et la dernière. La figure 8 donne l'exemple d'un autre thermogramme considéré comme normal.

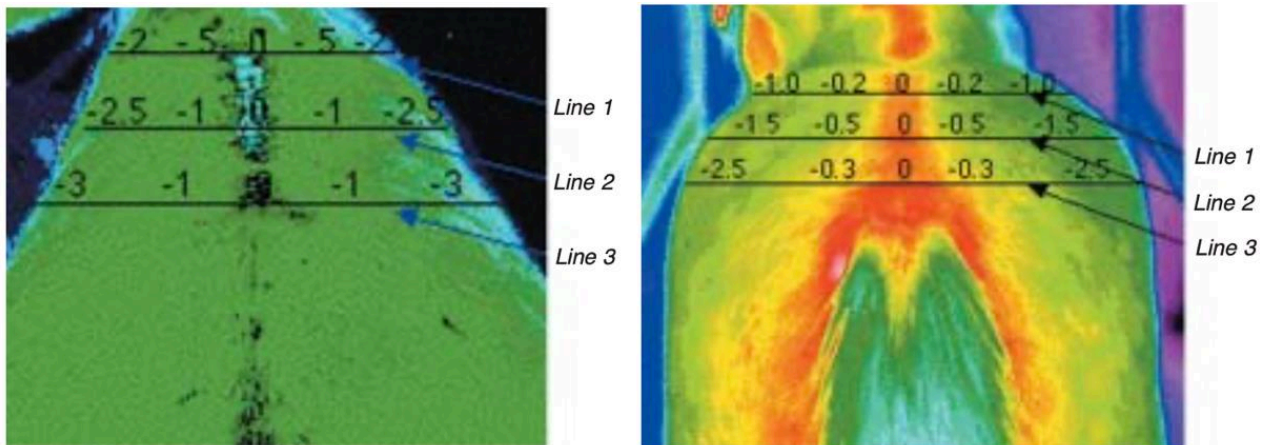


Figure 7 : thermogramme normal du dos et de la croupe de chevaux montés (Tunley, Henson 2004)

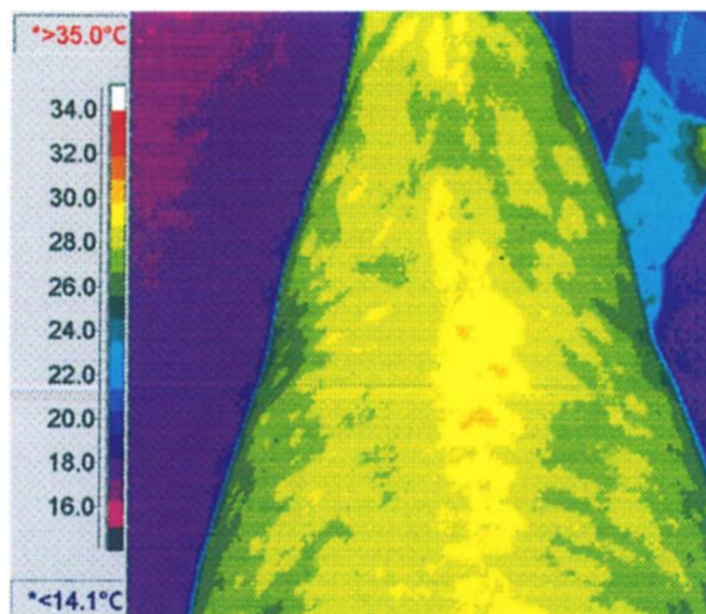


Figure 8 : thermogramme du dos d'un cheval normal (Kold, Chappell 1998)

2.3.2. Critères d'interprétation

La température de la peau résulte de la chaleur apportée par la vascularisation et de l'activité des tissus sous-jacents, mais est aussi influencée par de nombreux facteurs environnementaux. En thermographie, on cherche donc à standardiser tous les paramètres biaisant l'interprétation du thermogramme. L'objectif est que seule l'activité vasculaire et métabolique sous-jacente à la zone cutanée observée influence sa température. Cependant, il faut souligner que la thermographie ne teste pas directement la structure des tissus. Elle reflète le tonus sympathique et l'inflammation des tissus sous-jacents. C'est pourquoi, lors d'une consultation thermographique, il est important de

prendre le temps de recueillir l'anamnèse et les commémoratifs, en portant une attention particulière à toute affection susceptible de modifier le système nerveux autonome ou le tonus vasomoteur.

Lorsque les conditions d'examen sont respectées, l'analyse des clichés thermographiques est possible dans la mesure où les clichés sont répétables à 7 jours d'intervalle (Soroko 2012; Tunley, Henson 2004). Une différence de température de 1°C est interprétée comme une altération suffisante pour suggérer la présence d'une possible pathologie. Cependant, cette valeur doit également prendre en compte le matériel et les conditions expérimentales en vigueur. De plus, une attention particulière doit être portée à la symétrie des individus. Cette dernière est toujours supposée être présente, que ce soit à l'échelle du tronc ou à celle des membres distalement au carpe et au tarse, au repos comme à l'exercice. On note que, pendant un effort, les augmentations de température les plus marquées sont observées sur le dos, le poitrail, les postérieurs et la ligne médiane du ventre du cheval. De plus, une zone de chaleur qui suit un trajet vasculaire sera considérée comme particulièrement suspecte. Enfin, certains auteurs se réfèrent à un thermogramme de référence pour considérer qu'une répartition différente de la chaleur est un indicateur de la présence d'une lésion (Kold, Chappell 1998; Westermann et al. 2013; Tunley, Henson 2004).

L'imagerie thermique est utile pour localiser le siège des lésions, sans toutefois permettre de les identifier. Des examens complémentaires sont souvent nécessaires pour poser un diagnostic précis (Turner et al. 2021). Lors d'une étude portant sur 24 chevaux dorsalgiques, une lésion échographique a été identifiée en dessous de chaque point chaud ou froid observé sur le thermogramme. En revanche, toutes les lésions échographiques n'ont pas pu être liées à des anomalies thermiques. Il est probable que les lésions chroniques inactives ne soient pas systématiquement observables sur des images thermiques. De même, il semblerait que la thermographie ne permette pas non plus de détecter les conflits de processus épineux (Fonseca et al. 2006). Le tableau suivant compare quatre publications scientifiques sur l'utilisation de la thermographie dans le domaine équin :

Auteur et date	Objectif	Population	Protocole	Clichés	Résultats
Soroko et al. 2012	Réponse musculaire du dos des jeunes chevaux de course à l'entraînement	20 chevaux de course non dorsalgiques (12 demi-sang polonais et 6 pur-sang arabes) de 3 ans	VarioCAM En intérieur 10 min d'acclimatation entre le pansage et le début de l'entraînement	Image du dos pendant l'exercice Distance dos - caméra : 1,5 m Découpe du dos en 5 zones	Répétabilité entre les 12 sessions Corrélation entre la température ambiante et cutanée La température cutanée est influencée par l' entraînement
Tunley, Henson 2004	Fiabilité et répétabilité des clichés thermographiques du dos du cheval sain	25 chevaux référés sans affection orthopédique 6 juments montées et 20 juments non débourrées saines, de 4 à 7 ans	ThermaCAM PM280 1 h avant les clichés : Acclimatation , pansage et retrait des bandes. Séchage si nécessaire Dans un travail pendant l'examen	Acquisition toutes les 3 min, pendant 1 h à 2 m du dos, de mesures de température suivant 3 lignes sur chaque cliché	Reproductibilité à 5 min, 5 h, 2 jours et une semaine Le plateau de température est en moyenne atteint en 39 min . Cette durée dépend de la différence entre la température extérieure et celle de la salle d'examen Pas de différence significative entre les thermogrammes des chevaux montés et non montés
Kold, Chappell 1998	Intérêt de la thermographie comme examen complémentaire en orthopédie	Divers cas cliniques rencontrés par l'auteur pendant 6 mois dont des chevaux de course à l'entraînement	ThermaCAM PM250 5-10 min d'acclimatation Acquisition d'images avant tout acte invasif		Bon outil pour détecter l'inflammation des tissus mous, notamment sur la ligne du dos chez les chevaux symptomatiques

Westermann et al. 2013	Effet de la distance et de l'angle sur les thermogrammes	10 chevaux adultes (6 chevaux de selle et 4 trotteurs) sains	VarioCam, Infratec GmbH Chevaux pansés et mis au box la veille Dans un travail pendant l'examen	A 8 h, 12 h et 16 h, acquisition de clichés toutes les 5 min pendant 1 h, avec la caméra à 1 m à 90 ° du membre Acquisition également d'image à 1,5 m ou avec des angles de 70 ° et de 110 °	Clichés reproductibles dans le temps sans différence significative entre 1 m et 1,5 m et entre des angles de 70 °, 90 ° et 110 °
Turner et al. 2021	Consensus proposé par l' Académie Américaine de Thermologie	Tous les animaux, guide non spécifique aux chevaux	Pansage et retrait des bandes 20 min avant l'examen Pas de produit ni de traitement sur la peau Pas de médicaments ayant un effet sur la vascularisation de la peau Pas d'exercice 2h avant l'examen	Émissivité : 1 Spectre : 8 - 14 μm Distance objet – caméra : 1 à 2,4 m (75 % de l'image occupée) Absence de courant d'air et de rayonnements solaire, Température ≤ 30 °C Différence de température significative : ≥ 1 °C	La plage de température étudiée doit s'étendre sur 10 °C et inclure les températures des objets étudiés
Fonseca et al. 2006	Efficacité de la thermographie et de l'échographie dans le diagnostic de lésions thoracolombaire et association de ces lésions avec la discipline pratiquée	24 Quarter horses dorsalgiques au travail de 4 à 8 ans. 4 pratiquent le reining, 9 le cutting et 11 le barrel racing	1 h d'acclimatation Dans un travail pendant l'examen	Différence de température significative : ≥ 1 °C	Sous chaque point chaud ou froid, une lésion échographique est trouvée. La réciroque n'est pas vraie . Visualisation thermographique non systématique des lésions chroniques ou des conflits de processus épineux

Tableau 1 : comparatif de six publications utilisant la thermographie équine

2.4. APPLICATION DE LA THERMOGRAPHIE

2.4.1. Avantages et limites de la caméra thermique

La thermographie connaît un développement dans de nombreux domaines en raison de la multitude d'avantages qu'elle offre. Cette technologie non invasive s'avère utilisable sur courte comme sur longue distance : elle ne nécessite pas de contact, elle est très discrète et non douloureuse. On ne la perçoit pas, à moins d'observer la caméra ou les contraintes environnementales nécessaires à la réalisation de prises de vues. D'autre part, les images, réalisées en deux dimensions, peuvent être perçues en temps réel (Usamentiaga 2014). Par rapport au thermomètre infrarouge, la caméra thermique est capable de couvrir une grande surface et d'avoir une image globale. L'identification et la mesure de l'étendue d'une faille ou d'une lésion sont donc facilitées, tout en restant précises grâce aux très nombreux bolomètres qu'elle possède (FLIR Systems AB, InfraredTraining Center 2012).

Cependant, la technologie infrarouge possède de nombreuses limites, à commencer par les approximations et les contraintes liées aux interférences avec le fond de l'image évoqué préalablement : lors d'un usage sur le terrain, de trop nombreuses interactions avec l'environnement sont malheureusement à déplorer (Tattersall 2016).

De plus, la technologie infrarouge permet seulement de mesurer la température de surface, reflet de la température interne influencée par toute modification locale de la température de la peau (Turner et al. 2021). Or, la peau est très sensible à de nombreux facteurs, internes comme environnementaux.

2.4.2. Applications non médicales

2.4.2.1. Usages industriels et urbains

L'énergie occupe une place centrale dans la vie courante ainsi que dans les chaînes de production. Aujourd'hui, parallèlement aux politiques visant à limiter l'utilisation d'énergies fossiles, des méthodes de production alternatives se mettent en place. L'imagerie thermique a un rôle à jouer dans l'évaluation de ces flux d'énergie. L'analyse des images thermiques identifie par exemple les panneaux solaires défectueux en production ainsi que les zones de fuites de chaleur des bâtiments à l'origine d'excès de consommation. Déterminer ces zones de fuites de chaleur permet non seulement de localiser les défauts d'isolation thermique ou d'infiltration d'eau, mais encore de suivre les réseaux d'eau chaude, par exemple pour identifier une fuite. Par exemple, la figure ci-dessous présente l'image thermique d'un tableau électrique, pour lequel la surchauffe de certains composants, probablement liée à un fil insuffisamment serré. Cette situation n'est pas détectable par les disjoncteurs situés en amont et à risques d'incendie. Elle est donc particulièrement dangereuse. L'imagerie thermique révèle alors ce que l'œil humain ne peut pas détecter (FLIR Systems AB, InfraredTraining Center 2012).

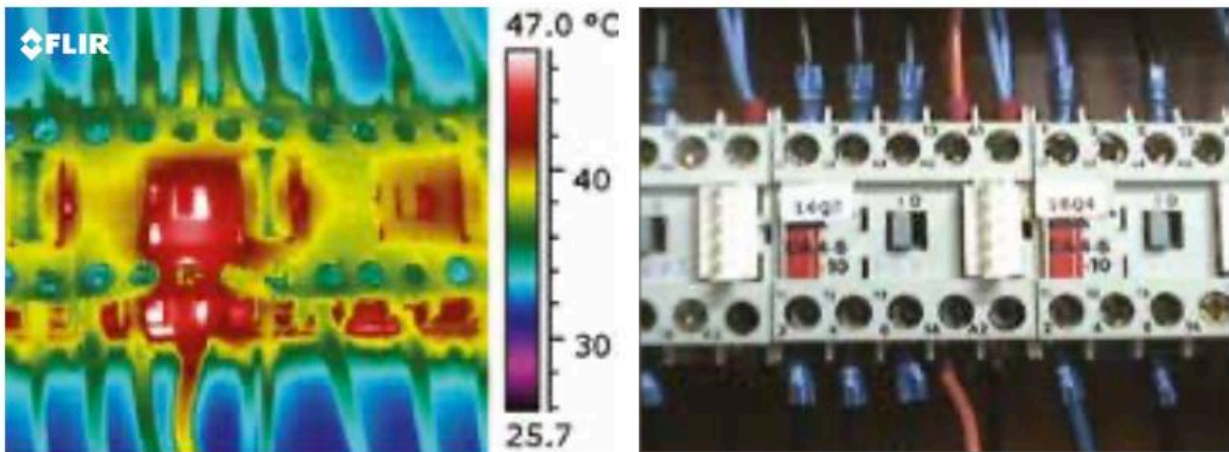


Figure 9 : dysfonctionnement sur un contacteur probablement lié à un fil insuffisamment serré, ce qui entraîne la surchauffe des composants (FLIR Systems AB, InfraredTraining Center 2012)

Les usages industriels de la technologie infrarouge ont pour but de répondre aux besoins humains, d'aider à la compréhension, au suivi et au soutien des activités des hommes. Par exemple, l'installation d'un dispositif dans une boutique rend possible le comptage des clients, la description de leurs comportements d'achat et de leur évolution au sein de l'espace commercial. Dans un autre contexte tel que celui de grands rassemblements, le suivi du déplacement des individus et leur dénombrement sont pertinents d'un point de vue sécuritaire et médiatique. La détection d'individus ou d'êtres vivants suscite également un intérêt croissant à l'ère du développement des systèmes avancés d'aide à la conduite et des véhicules autonomes. La technologie infrarouge permet de détecter des êtres vivants quatre fois plus loin que des phares, comme l'illustre la figure 10. Selon le même principe, les caméras thermiques améliorent nettement la vision en mer comme en atteste la figure 11, permettant ainsi de sécuriser et d'optimiser les déplacements, de nuit comme par temps d'orage, de brume ou de moindre visibilité (Teledyne FLIR LLC 2021).



Figure 10 : détection d'une personne par une caméra infrarouge, un facteur de sécurité qui prend de l'importance à l'ère du développement de l'intelligence artificielle (Teledyne FLIR LLC 2021)

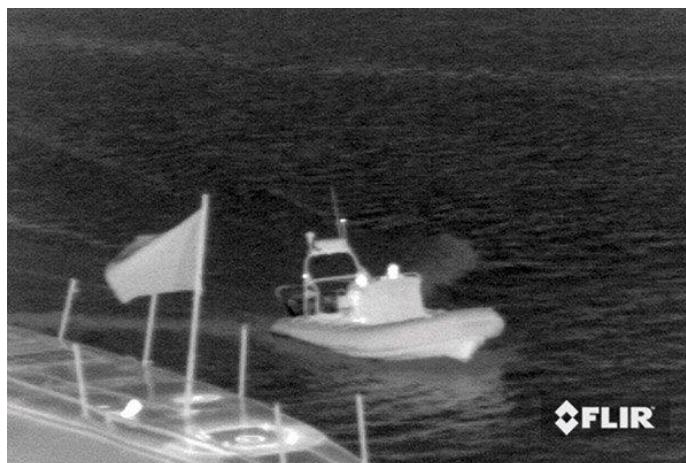


Figure 11 : l'utilisation de caméras infrarouges en mer améliore la visibilité des embarcations à proximité (Teledyne FLIR LLC 2021)

2.4.2.2. Les usages de la technologie infrarouge dans les services publics

Les domaines d'usages possibles de la technologie infrarouge sont multiples du point de vue des services publics, par exemple en matière de sécurité publique ou pour l'armée. En effet, son recours permet de monitorer les grands rassemblements mais aussi de détecter des incidents et incendies, ou encore d'étudier des flux de circulation. Dans le cadre de la pandémie de COVID19 actuelle et de la recherche de solutions en matière de sécurité sanitaire, des caméras reposant sur cette technologie ont été développées pour mesurer la température corporelle et détecter les individus malades. Cependant, on retrouve les mêmes contraintes d'usage que dans un contexte vétérinaire : pour être fiables, l'utilisation de caméras infrarouges exige un protocole relativement rigide : pas d'exposition au soleil, pas d'effort physique, etc. Il est intéressant de noter que le cadre de missions de service public a conduit à la réalisation d'études portant sur la performance des thermomètres infrarouges sans contact, ayant pour objectif de limiter la dissémination d'une maladie d'un pays à l'autre. Avec une prévalence de fièvre à 1 %, la valeur prédictive positive variait de 3,5 % à 65,4 % alors que la valeur prédictive négative était de 99 %. L'efficacité de cette méthode s'avère ainsi limitée, d'autant que, dans ce contexte, d'autres facteurs aggravants sont intervenus : certaines personnes en incubation n'avaient pas encore déclaré une fièvre pourtant latente, tandis que d'autres l'avaient masquée intentionnellement, grâce à la prise d'antipyrétiques par exemple (Bitar 2009).

La protection des zones critiques fait également partie des points d'intérêts des caméras thermiques pour l'usage public. Ces dernières permettent facilement de repérer des intrusions dans leur périmètre de surveillance, voire même de suivre des intrus lors de leur déplacement. L'intérêt de la détection des individus et des objets ne se limite pas à la prévention des risques et à la découverte des incidents, mais aussi leur résolution. En effet, la caméra thermique offre la possibilité aux forces de l'ordre de repérer la zone d'intervention et les individus qui s'y trouvent avant d'intervenir. Cet usage est d'autant plus intéressant aujourd'hui avec le développement des drones, puisque la prise d'images n'est plus limitée à un point fixe ou à une origine humaine. Elle peut prendre de la hauteur et une orientation différente via une commande à distance des appareils (Teledyne FLIR LLC, 2021).

2.4.3. Applications en médecine humaine

2.4.3.1. Prévention et dépistage : exemple du cancer du sein

Le cancer du sein, le cancer le plus fréquemment rencontré chez la femme, présente actuellement un taux de mortalité en baisse et un taux de survie en hausse, principalement grâce à des moyens de détection précoces et efficaces, ainsi qu'à une meilleure prise en charge. Le dépistage du cancer du sein, couramment effectué grâce à l'examen complémentaire qu'est la mammographie, se révèle cependant moins sensible lorsque le tissu mammaire est dense, en particulier chez les femmes âgées de moins de 45 ans. De plus, la méthode expose les patientes à des rayonnements ionisants. La thermographie, pour mémoire non invasive, portable et peu coûteuse, présenterait l'avantage d'être accessible aux populations défavorisées implantées dans des territoires isolés, contrairement aux mammographies. La détection se fonde sur l'activité métabolique augmentée des tumeurs, qui se traduit par une production de chaleur et une modification du flux sanguin (angiogenèse) relevables à la thermographie. Ce sont donc des modifications physiologiques et non anatomiques qui sont mises en évidence. La majorité des méthodes de détection des cancers du sein se basent sur des critères statistiques de symétrie entre les seins. La figure 12 ci-après illustre ces caractéristiques en image. On y distingue en effet une asymétrie de répartition de chaleur entre les deux seins, compatible avec la présence d'une tumeur mammaire. L'étude de Khan et Arora en 2021 a permis de comparer l'efficacité de détection de la mammographie par rapport à celle de la thermographie. Lorsqu'il s'agit de différencier les seins sains de ceux cancéreux, l'exactitude de la thermographie est moindre que celle de la mammographie (96,57 % contre 98,11 %), tandis que lorsqu'il s'agit de distinction entre une tumeur maligne et bénigne, l'exactitude de la thermographie l'emporte par rapport à celle de la mammographie (92,70 % contre 82,05 %). On note par ailleurs que lorsque l'on combine les informations obtenues sur le thermogramme avec les données cliniques disponibles, on obtient une exactitude de 97 %, associée à une sensibilité de 83 % et une spécificité de 100 % dans la détection des tumeurs mammaires. L'usage de la thermographie dans le dépistage du cancer du sein pourrait donc se développer dans les années à venir, pour compléter ou remplacer la mammographie selon les circonstances (Sánchez-Cauce, Pérez-Martín, Luque 2021 ; Khan, Arora 2021).

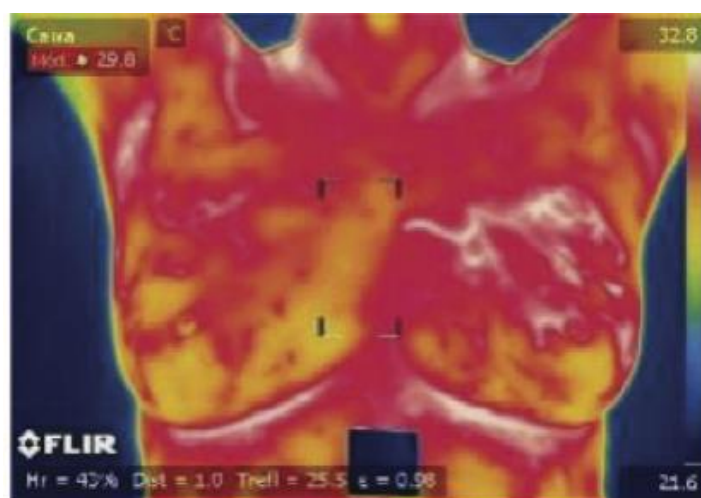


Figure 12 : thermogramme mammaire compatible avec la présence d'une tumeur mammaire (Khan, Arora 2021)

2.4.3.2. Diagnostic : exemple du phénomène de Raynaud

Le phénomène de Raynaud est un dysfonctionnement microvasculaire périphérique qui a une prévalence de 3 à 5 % dans le monde. Ce phénomène se caractérise par des crises triphasiques, le plus souvent déclenchées par le froid ou le stress. Lors d'une crise, les extrémités touchées deviennent d'abord blanches, témoins du phénomène de vasoconstriction intense en train de se jouer. C'est la phase la plus typique du phénomène de Raynaud. Lorsque ce phénomène est intense, il est suivi d'une seconde phase cyanotique, due à une hypoxie tissulaire. Enfin, la dernière phase est constituée par l'hyperhémie de reperfusion tissulaire donnant leur couleur rouge aux tissus.

Parmi le phénomène de Raynaud, on distingue les origines primaires sans signe de maladie sous-jacente, des origines secondaires découlant d'autres maladies comme la sclérodémie systémique ou le lupus érythémateux disséminé. Plus de 80 % des cas de phénomènes de Raynaud sont primaires.

La thermographie infrarouge se placerait alors comme un outil intéressant pour mettre en évidence un trouble de la perfusion des extrémités telles que les doigts, car la température de la peau dépend de la perfusion sanguine locale. Il est possible de faire un test de provocation par le froid en mimant les conditions déclenchant une crise pour évaluer la courbe de réchauffement. L'imagerie infrarouge constitue alors un outil de mesure objectif intéressant. Les études Sternbersky et al. en 2021 et de Martini et al. en 2019 ont montré que cette technologie, éventuellement complétée d'une capillaroscopie, était capable de différencier clairement les patients présentant un phénomène de Raynaud et ceux atteints d'acrocyanose -une hypersensibilité vasculaire des doigts au froid, permanente, bilatérale et non douloureuse-. Le thermogramme suivant est celui d'un patient présentant un phénomène de Raynaud. Trente minutes après un test de provocation, on observe une hypoperfusion du doigt Ar2 de la main droite et des doigts Ar9 et Ar10 de la main gauche (Sternbersky et al. 2021; Martini et al. 2019).

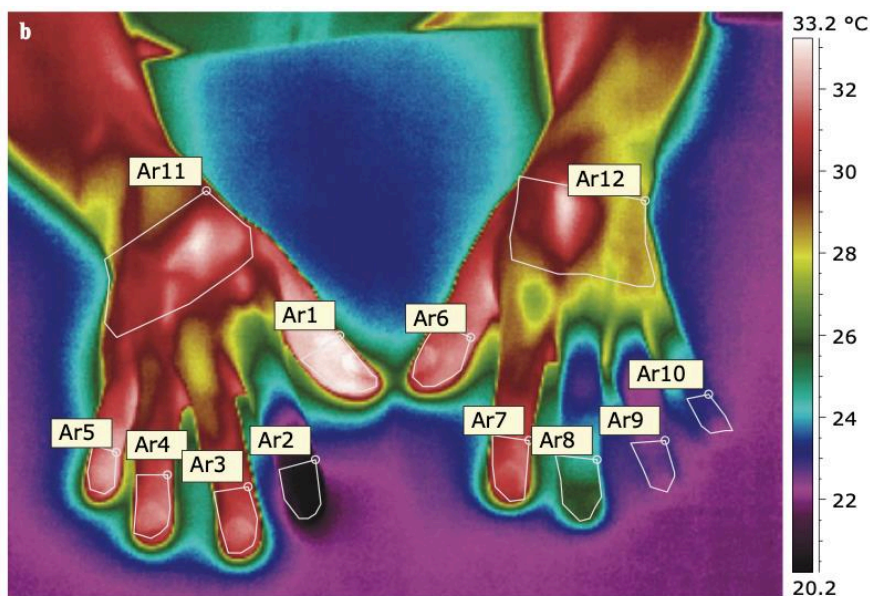


Figure 13 : thermogramme d'un patient présentant un phénomène de Raynaud (Sternbersky, Tichy, Zapletalova 2021)

2.4.3.3. Suivi et évaluation de la réponse aux traitements : exemple de l'arthrose

Au cours de ces dix dernières années, les publications montrent un intérêt croissant pour l'évaluation de l'arthrose et des maladies rhumatismales par thermographie infrarouge, du fait de la place centrale qu'occupe l'inflammation dans cette maladie. L'intérêt est dirigé vers le diagnostic ainsi que vers le suivi et la réponse aux traitements. En effet, la température de surface des articulations révèle que l'inflammation sous-jacente est statistiquement liée à l'évolution de la maladie, à son évaluation clinique et à sa réponse au traitement. Bien que les résultats obtenus ne soient pas systématiquement corrélés avec les seuls scores de douleur donnés par les patients, ils le sont le plus souvent avec les scores cliniques, les marqueurs sériques de l'inflammation et les examens d'imagerie (Fokam, Lehmann 2019; Schiavon et al. 2021).

2.4.4. Médecine vétérinaire

2.4.4.1. Applications dans le domaine équin

La thermographie permet, par exemple, d'évaluer le bien-être des chevaux en mesurant leur niveau de stress. En effet, plusieurs études suggèrent que la température du cantus médial serait positivement corrélée à l'augmentation de la fréquence cardiaque et de la cortisolémie sérique. La mesure de la température du cantus médial par caméra infrarouge se placerait donc comme une méthode d'évaluation non invasive du niveau de stress des chevaux. Ainsi, une étude pilote menée dans le cadre de courses d'endurance propose cette méthode d'évaluation du stress par caméra infrarouge. L'aspect non invasif légitime le recours à ce nouvel outil d'évaluation au regard de trois critères : le bien-être des chevaux, l'accord des cavaliers et le règlement qui s'oppose aux méthodes invasives (Redaelli et al. 2019; Soroko et al. 2021).

De même, la thermographie peut être utilisée pour lutter contre certaines méthodes d'entraînement considérées comme de la maltraitance. Afin de conformer l'allure des chevaux de marche du Tennessee aux critères de notation utilisés en compétition, certains entraîneurs utilisent des topiques irritants ou des chaînes blessantes sur les paturons des chevaux. Le but de ces artifices est de rendre le posé du pied douloureux au sol afin que le cheval lève plus rapidement son membre avec un geste plus relevé. Une augmentation de la température distale des membres suggérant l'application de topique, ou la présence de cicatrices froides car non irriguées, sont recherchées sur les thermogrammes des paturons. La thermographie participe donc à la détection des utilisateurs de ces méthodes peu respectueuses du bien-être animal (Turner et al. 2021).

Enfin, la thermographie est considérée comme un outil efficace pour vérifier l'adéquation du matériel utilisé sur un cheval, tel que ses fers ou sa selle. Dans le cas de la selle par exemple, la méthode permet de mesurer la charge placée sur le dos du cheval ainsi que sa répartition. En effet, un thermogramme du dos du cheval mais aussi de la matelassure de la selle immédiatement après l'effort aide à l'évaluation de la concordance de cette dernière. La figure 14 en est un exemple. Il a été montré que le poids, l'âge du cheval et l'intensité de l'entraînement influent sur la répartition des charges bilatérales et longitudinales sur le dos. Cette répartition est cependant aussi influencée par la position et le niveau du cavalier (Soroko et al. 2018).

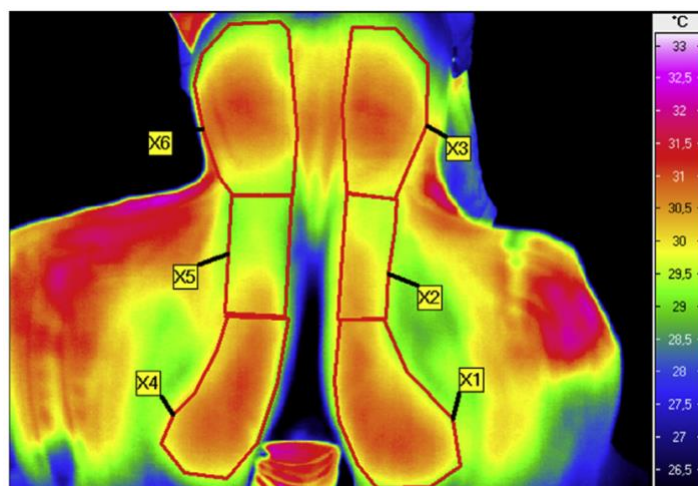


Figure 14 : exemple du thermogramme des panneaux d'une selle, enregistré après le travail et découpé en 6 régions d'intérêts (Soroko et al. 2018)

2.4.4.2. Médecine vétérinaire bovine

Dans les élevages laitiers, les mammites, cliniques ou subcliniques, sont très surveillées car elles impactent défavorablement la qualité du lait et la santé de la vache elle-même. Outre les contrôles macroscopiques de la mamelle et du lait, des évaluations microscopiques mesurant le nombre de cellules et de germes sont également mises en place pour le paiement du lait. Certaines études proposent d'utiliser la thermographie comme outil de détection précoce des mammites. Une première étude a été faite sur 62 vaches brunes sans autre affection apparente. Préalablement à l'examen, elles ont été laissées 30 minutes dans une salle non ensoleillée. Cette étude a comparé la sensibilité et la spécificité de détection des mammites par la mesure de la température de surface de la mamelle à celles du CMT (*California Mastitis Test - CMT*), en se référant au nombre de cellules somatiques dans le lait. L'imagerie infrarouge présente une très bonne sensibilité (95,6 %) et une spécificité plus approximative (93,6%), à l'inverse du CMT qui se révèle plus spécifique (98,9 %) que sensible (88,9 %). La valeur prédictive positive de l'imagerie infrarouge est donc inférieure à celle de CMT alors qu'on observe le rapport inverse pour la valeur prédictive négative (respectivement 95,0 % ; 99,3 % et 93,6 % ; 86,1 %). L'imagerie thermique pourrait donc être un bon outil d'utilisation rapide et non invasif, pour détecter les mammites subcliniques (Zaninelli et al. 2018). D'autres auteurs ont cherché à optimiser cet outil en vue d'épargner du temps de travail à l'éleveur. Dans un premier temps, l'objectif a été d'automatiser la lecture des clichés par un logiciel, pour ensuite développer une prise de cliché autonome. La sensibilité et la spécificité de la mesure de la température de surface ont été déterminées comme étant respectivement de 78,6 % et 77,9 %. Ces valeurs demeurent inférieures aux valeurs obtenues manuellement mais restent encourageantes en raison des perspectives qu'elles laissent envisager (Zaninelli et al. 2018).

2.4.4.3. Médecine vétérinaire avicole

Outre son impact sur les performances d'élevage, l'ambiance des bâtiments d'élevages avicoles fait partie de la grille d'évaluation du bien-être EBENE. Plusieurs paramètres de température doivent s'adapter au fil du temps, afin de répondre aux besoins des animaux qui évoluent au cours de leur élevage. Par exemple, lors de l'arrivée de canards de 1 à 3 jours, la température doit être de 35 °C sous les radiants pour une ambiance de 28 °C, alors qu'elle n'est plus que de 25 °C sous les radiants et de 15 °C en ambiance à 15 jours d'âge. Plus tard, à l'âge de 3 semaines, il est même conseillé d'arrêter le chauffage. L'ambiance est donc un paramètre dont il faut avoir une maîtrise totale par

différents moyens, comme celui de la conception des bâtiments ou de la mise en place de ventilation et de sources de chaleurs. Or, pour maîtriser un paramètre, il faut pouvoir le mesurer. S'il est possible d'observer le comportement des oiseaux (respiration, répartition dans le bâtiment) ou de mesurer des températures d'ambiance ponctuellement, la technologie infrarouge se place comme une solution avantageuse, car elle permet d'accès à la prise de température corporelle des oiseaux elle-même. Cette information est au cœur de leur bien-être thermique. De plus, cette technologie offre la possibilité d'optimiser l'utilisation des bâtiments par la mise en évidence de zones d'inconfort ou d'altération de certains matériaux à l'origine d'un défaut d'isolation (Lagoutte, Corrand, Guerin 2009 ; Laval 2020; Créach, Warin, et al. 2019).

Le thermogramme suivant est un exemple de l'utilisation de cette technologie. On observe facilement la répartition des animaux, les zones de froid ainsi que les zones de pertes de chaleur, le long des murs et dans les espaces de convection sous les toits.

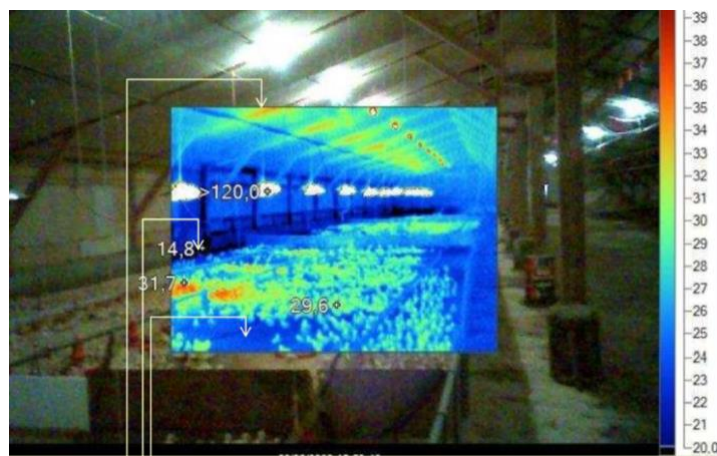


Figure 15 : intérêt de la thermographie dans la gestion de l'ambiance des bâtiments avicoles (Lagoutte, Corrand, Guerin 2009)

La température de surface des oiseaux ne correspond pas à leur température corporelle en raison de leur plumage. En revanche, certaines zones comme les caroncules, la crête ou les pattes permettent de déterminer des valeurs approchant leur température réelle. Dans les bâtiments d'élevage en particulier, il est possible d'estimer la température corporelle des volailles à partir de la température du point le plus chaud, c'est à dire à proximité des yeux ou des oreilles et ainsi de modifier l'ambiance du bâtiment pour maximiser le confort de la bande et donc sa croissance.

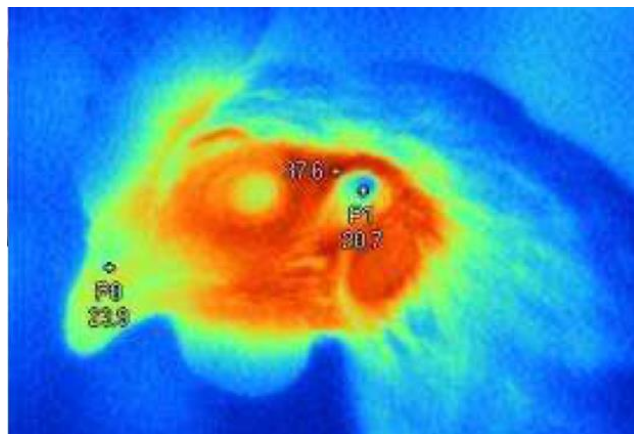


Figure 16 : estimation de la température corporelle des volailles grâce à la thermographie (Lagoutte, Corrand, Guerin [2009])

De plus, la technologie infrarouge permet d'évaluer l'effet d'une modification de la température d'incubation des œufs et d'éclairer les éleveurs sur les meilleurs choix d'ambiance de leurs bâtiments. En effet, il a été constaté que les futurs individus incubés sous températures chaudes préfèrent rester sous les lampes chauffantes plutôt que de se déplacer pour manger ou boire. Ils sont ainsi significativement plus légers que leurs congénères incubés à des températures inférieures (Hulet et al. 2007). À l'inverse, un œuf soumis à une courte période de refroidissement durant les 5 derniers jours d'incubation, lorsque l'embryon passe d'un comportement ectothermique à endothermique, serait à l'origine d'une meilleure tolérance aux basses températures du futur individu (Yahav, Giloh 2012).

2.4.4.4. Médecine vétérinaire canine

L'imagerie infrarouge est également utilisée en médecine vétérinaire canine. Elle est par exemple utilisée pour délivrer un diagnostic initial ou de suivi en cas de douleurs, comme pour améliorer le bien-être des canidés au cours d'un traitement.

Les circumanalomes sont les troisièmes tumeurs les plus fréquentes chez le chien. Elles sont qualifiées soit d'adénome, cas le plus fréquent et de bon pronostic, soit de carcinome, caractérisé par leur fort taux de rechute et la fréquence de leurs métastases. Les articles scientifiques divergent aujourd'hui quant à leur incidence et leur prévalence (Zanuto et al. 2021). Ce constat encourage à mener de nouvelles études et à chercher de nouvelles méthodes de diagnostic telles que la thermographie. Comme lors du dépistage de tumeur mammaire chez la femme, il sera recherché une augmentation anormale de température, signe révélateur d'une angiogenèse et à l'activité métabolique intense d'une tumeur. Ces mécanismes restent cependant encore non complètement élucidés, certains tissus tumoraux ayant une température inférieure aux tissus sains environnants. Le recours aux thermogrammes a permis de mettre en évidence que les tumeurs des glandes hépatoïdes font partie des tumeurs plus froides que les tissus environnants. Des anomalies vasculaires à l'origine d'une diminution de vascularisation, ou bien la vascularisation intense de la région anale sont des hypothèses avancées pour expliquer ce phénomène. Bien que la cytologie reste l'examen de référence pour diagnostiquer un circumanalome avec une efficacité de 90 %, la thermographie est un examen non invasif à résultat immédiat, qui pourrait renforcer une suspicion clinique en première intention. Son efficacité est estimée entre 84 à 90 % selon les études (Zanuto et al. 2021).

Les images ci-après illustrent le cas d'un chien atteint d'un circumanalome : l'espace périanal, dont la température est diminuée, localise et suggère la présence de la tumeur.

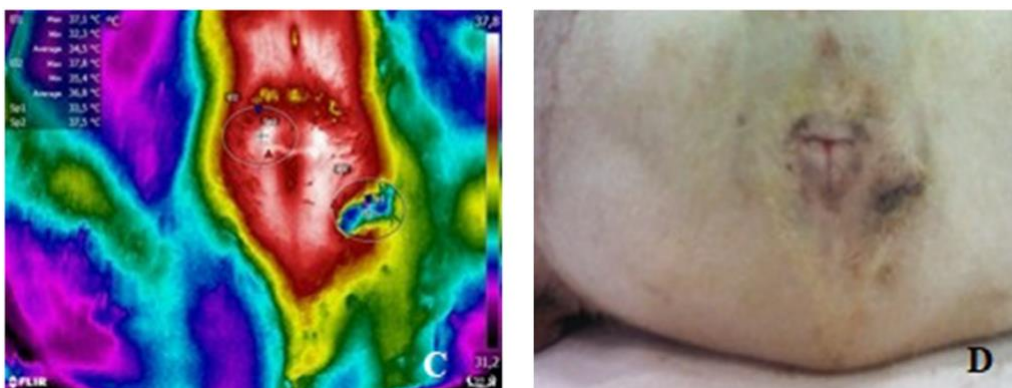


Figure 17 : thermogramme et photographie numérique de la région anale d'un chien atteint d'un circumanalome (Zanuto et al. 2021)

Certaines tumeurs chez le chien sont traitées par radiothérapie. Or chez l'homme, ce rayonnement est à l'origine d'une dilatation des capillaires et d'une inflammation ayant pour effet direct d'augmenter la température de la peau. La thermographie peut alors être proposée comme outil de mesure objectif d'augmentation de température et associée à des évaluations plus subjectives du bien-être comme des changements de comportement ou des scores de douleur. Lors du traitement par radiothérapie d'une tumeur intra-nasale chez un chien, ce dernier ne montre aucune modification de comportement, son score de douleur est resté entre 0 et 1 et sa température corporelle est restée stable, même après le traitement. En revanche, la température de sa truffe a augmenté de 2 à 4 °C dans les heures qui ont suivi l'irradiation, avec un point le plus chaud à 42 °C. Chez l'homme, les patients traités par radiothérapie rapportent une douleur et une détresse psychologique à partir d'une augmentation de 1 °C des tissus irradiés par rapport aux tissus sains. La thermographie invite donc alors à remettre en question l'évaluation de la douleur dans le cadre de la radiothérapie, un traitement dont il est difficile d'évaluer la gêne et l'inconfort immédiat. Il ne s'agit cependant que d'une première étude effectuée sur un individu unique (Saeki et al. 2021).

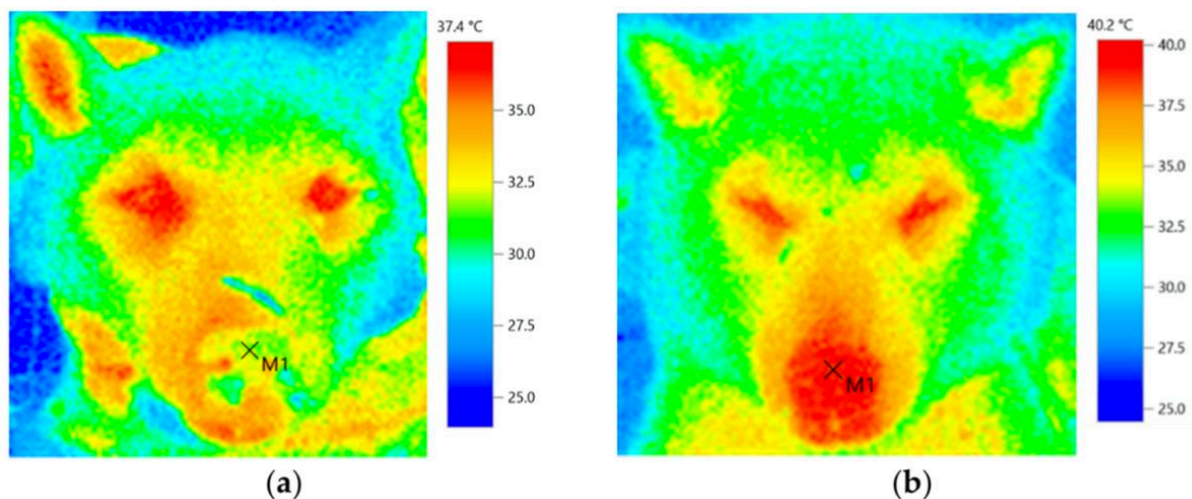


Figure 18 : thermogramme avant (a) et 120 minutes après (b) une séance de radiothérapie sur une tumeur intra-nasale chez un chien : la température de la truffe augmente au-delà de 40°C à l'issue du traitement (Saeki et al. 2021)

2.4.4.5. Recherche fondamentale

Sur les animaux de taille conséquente, la température mesurée grâce à la technologie infrarouge est différente de la température centrale de l'organisme, à l'inverse des petits organismes ectothermes tels que le lézard. Pour ces petits animaux, la mesure de la température de surface via une caméra thermique, en plus d'être non invasive, permet d'étudier leurs préférences thermiques et les particularités de leur thermorégulation. Dans le cas de geckos de Madagascar par exemple, cette technologie a permis de définir leur température d'évitement supérieur et inférieur, tout comme l'influence de la température d'incubation sur leurs préférences futures. Ainsi, une température d'incubation supérieure induit une préférence thermique plus élevée. De même, certains mécanismes de la physiologie de la thermorégulation peuvent être élucidés.

Dans le cas des reptiles, la technologie infrarouge a par exemple montré que le refroidissement de leur tête est corrélé à leur cycle respiratoire : habitués à marquer un temps de pause après avoir inspiré, les tissus de leur appareil respiratoire s'équilibrent thermiquement avec l'air ambiant. Ce mécanisme permet d'abaisser la température de la surface du rostre jusqu'à 5 °C de moins que celle du reste du corps. Le crotale procède de cette manière pour diminuer celle de ses fosses nasales.

Cela améliore la détection thermique des proies en perfectionnant la distinction des images dans le temps, c'est-à-dire en limitant le flou cinétique entre une perception et la suivante. L'imagerie infrarouge s'est révélée une aide précieuse dans la découverte de ce mécanisme car une observation à distance du crotale était nécessaire pour ne pas perturber son comportement normal. Elle a également permis de trouver une origine digestive et non musculaire à la thermogénèse des serpents.

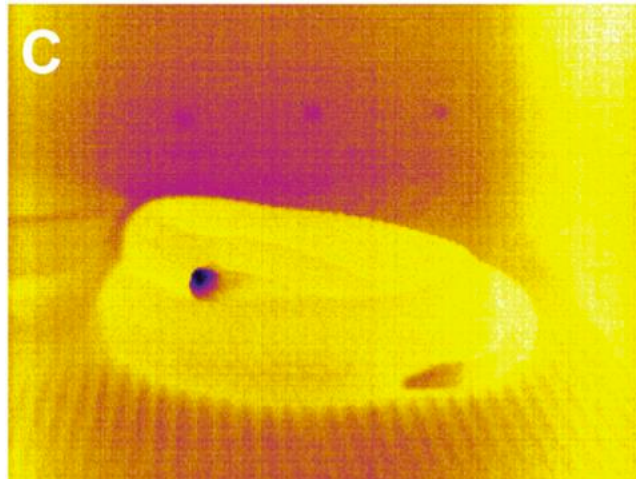


Figure 19 : thermogramme d'un crotale cascabelle illustrant le gradient thermique lié au refroidissement des voies respiratoires. (Tattersall 2016)

Les abeilles ont fréquemment été étudiées avec la thermographie du fait de leur taille, de leur mode de vie actif et de la facilité d'imagerie de cette technique. La méthode a ainsi permis de montrer que leur thermogénèse est essentiellement fondée sur le métabolisme aérobie des muscles de leur thorax. L'efficacité de ce mécanisme est donc sensible au niveau d'oxygène et à la qualité de l'alimentation ingérée. De la même manière, elle a permis de dévoiler que, lorsque des abeilles géantes se préparent à une augmentation d'activité, la température de leurs muscles thoraciques et du nid s'élève également. Enfin, ce matériel a permis de localiser leurs nids plus facilement et de mettre en évidence leur circuit thermique, car ces derniers sont souvent affectés d'une température différente du mur ou du support auquel ils sont attenants (Tattersall 2016 ; Kastberger, Stachi 2003).

Dans le cas des espèces animales homéothermes, sujettes à des mécanismes d'isolation thermique, l'utilisation de la thermographie est plus délicate. Cette dernière aide à identifier les zones de déperdition de chaleur et celles de meilleure isolation, bien qu'elle permette seulement, dans le meilleur des cas, d'émettre des estimations de leur capacité d'isolation ou de thermorégulation. En revanche, cette technologie participe à l'identification des comportements liés à la thermorégulation ainsi que des mécanismes physiologiques de surface mis en place. Ainsi, certaines zones ont été appelées fenêtres cutanées. Particulièrement riches en anastomose artérioveineuses, elles jouent un rôle essentiel dans la préservation ou, au contraire, dans l'évacuation de la chaleur. Le pavillon de l'oreille est l'un des sites de prédilection de ce mécanisme. On y observe une vasodilatation en réponse au réchauffement de l'hypothalamus et, au contraire, une vasoconstriction lorsque ce dernier se refroidit. Par exemple, la vasodilatation, associée au mouvement des oreilles, permet une évacuation de 100 % de la chaleur produite au repos. En revanche, il faut rester vigilant et discerner les phénomènes observés de simple conséquence d'un autre comportement comme un comportement sensoriel ou social (Tattersall 2016).

2.4.4.6. Écologie et surveillance des espèces sauvages

Le rayonnement infrarouge permet une interaction discrète avec la faune sauvage, en réponse à divers objectifs. Il peut s'agir d'étudier des populations via le déclenchement automatique de prises de vue au passage d'animaux, de les détecter dans leur milieu naturel au cours de missions, ou bien de les recenser afin de réguler leur nombre grâce à des lunettes de visée thermique de moyenne portée. Dans le cas de l'écureuil roux dans le nord de l'Angleterre au XIX^{ème} siècle par exemple, un couple d'écureuils gris a été ramené des États-Unis. Le développement de l'espèce s'est opéré au détriment des écureuils roux endémiques qui se sont réfugiés en Ecosse. On estime aujourd'hui la population d'écureuils gris à 5 000 000 d'individus contre 150 000 écureuils roux. Selon les dires de l'un des gardes forestiers anglais de Winfield Forest, les caméras infrarouges sont des outils précieux, qui facilitent grandement leur travail de repérage et de régulation de la population d'écureuil gris. Ainsi, en 2013, une étude a mis en évidence une augmentation de 5 % de la population d'écureuil roux, une information appréciée dans le cadre de la préservation de l'espèce (Teledyne FLIR LLC 2021).

Par ailleurs, les caméras thermiques sont très utilisées par les photographes et les réalisateurs de documentaires. Elles permettent d'observer la vie sauvage sans la perturber. Elles détectent aussi les jeunes animaux présents dans les zones de fauchage et épargnent ainsi leur vie.

Enfin, la thermographie intéresse également les parcs zoologiques. Elle leur permet, sans tranquilliser les animaux, de poser des diagnostics de gestation et de déceler des zones d'inflammation ou de nécrose (Kastberger, Stachl 2003).

2.5. CONCLUSION

L'usage de la thermographie s'avère pertinent dans de nombreuses espèces animales pour détecter des inflammations, mais aussi pour d'autres finalités telles que, l'observation et la compréhension des comportements, la préservation des espèces, etc. Bien que les conditions de réalisation des clichés thermographiques puissent parfois se révéler difficiles, la méthode présente des atouts intéressants, tels que son accessibilité, sa rapidité d'exécution et son caractère non invasif. Elle est avantageuse sur le plan financier, puisque le coût d'une caméra thermique est bien plus abordable que celui d'un matériel radiographique ou échographique, doublé du fait que son utilisation sans contact avec les animaux permet d'éviter en partie des risques de dommages matériels et autres coûts associés.

Cependant, la thermographie est un outil très sensible, qui oblige à de grandes précautions dans l'environnement et la prise des clichés, puis dans l'analyse des images, au risque de mésinterpréter les images construites et d'obtenir des résultats faussés. La pertinence de la méthode peut être amoindrie dans les cas d'inflammation avec une lésion peu active, tels qu'une lésion chronique par exemple. Du point de vue médical, cet outil semble donc plutôt complémentaire du matériel d'imagerie plus classique.

3. L'ostéopathie

3.1. LA PHILOSOPHIE DE L'OSTEOPATHIE

3.1.1. Histoire de l'ostéopathie

Les premiers écrits traitant de manipulation vertébrale sont attribués à Hippocrate, un scientifique vivant au V^{ème} siècle avant Jésus-Christ, considéré comme le père de la médecine. Ce dernier décrit des techniques de manipulations vertébrales pour traiter des affections ostéo-articulaires telles que la scoliose. Cette approche de la médecine s'est transmise au cours des siècles, notamment par Avicenne, docteur des médecins au XI^{ème} siècle, dans « *The Book of Healing* », puis par Ambroise Paré, chirurgien militaire du XVI^{ème} siècle. Au XVII^{ème} siècle, on note un désengouement pour les manipulations vertébrales qui sont perçues comme relevant du domaine des guérisseurs. Un nouvel intérêt pour ces manipulations renaît au XIX^{ème} siècle, porté par exemple par Robert Jones, le fondateur de l'association britannique d'orthopédie nommée British Orthopaedics Association.

Les fondements de l'ostéopathie sont établis par Andrew Taylor Still au XIX^{ème} siècle. Né en 1828, il fait des études de médecine comme apprenti auprès de son père, médecin et pasteur méthodiste. Déjà sceptique sur l'approche médicale de l'école, la perte successive de trois de ses enfants, probablement en raison de méningite virale, puis la perte d'un quatrième enfant causée par une pneumonie et enfin la perte de sa femme en couche, ont achevé de discréditer la médecine conventionnelle à ses yeux. Aidé par ses talents de chasseur et son intérêt pour la dissection et la physique, Andrew Taylor Still compare le corps humain à une machine soumise aux lois de la mécanique : de son point de vue, la santé peut être maintenue et la maladie vaincue en assurant le fonctionnement normal du système musculo-squelettique. Ses idées sont renforcées par des expériences vécues. Dans sa plus tendre enfance par exemple, il réalise que s'endormir la tête entre les racines d'un chêne soulageait ses migraines.

Son approche non médicamenteuse et non invasive de la médecine lui confère rapidement un engouement du grand public et le conduit à former des confrères pour répondre à cette demande grandissante. La fracture entre la vision de Still et celle de la communauté médicale de l'époque lui ferme l'accès aux facultés de médecine. De ce fait, il fonde en 1892 l'American Osteopathic College dans le Missouri. Il positionne ainsi l'ostéopathe comme remplissant la fonction de mécanicien du corps. Son objectif consiste à aider le corps à retrouver son état de fonctionnement initial par la libération de ses structures, grâce à ses connaissances anatomiques et physiologiques précises (Pettman 2007; Tan, Zia 2007).

Quelques années plus tard, William Garner Sutherland, ostéopathe formé à l'école de Still fasciné par l'anatomie crânienne, postule que les os du crâne ne sont pas soudés les uns aux autres mais qu'ils s'articulent entre eux. Lors de palpations, il perçoit des mouvements rythmiques d'expansion et de soulagement de ces os, qu'il considère comme étant une adaptation du crâne aux fluctuations du liquide cérebrospinal. Il baptise ce phénomène « mouvement respiratoire primaire », dont le rythme est compris entre huit et douze pulsations par minute. Ce rythme, associé à la production de liquide céphalorachidien, maintient une pression constante autour du cerveau. Ainsi, lors de phases de production du liquide cérebrospinal, le crâne s'élargit grâce à la flexion des os pariétaux et s'adapte à l'augmentation de volume de son contenu. À l'inverse, lors de phases de résorption, l'extension provoque un rapprochement des os partiels, ce qui diminue l'espace disponible (Jordan 2009; Kenneth 2002; Cayre, Chêne 2008; Eser, Prudhomme 2013).

3.1.2. Principes de l'ostéopathie

La philosophie de l'ostéopathie, telle que conçue par Still, répond à quatre grands principes fondamentaux et à de solides connaissances anatomiques :

- **La structure détermine la fonction, la fonction détermine la structure**

Le fonctionnement d'une structure biologique est conditionné par son intégrité morphologique. Réciproquement, l'absence de lésion d'une structure est confirmée par la perfection de son fonctionnement (Eser, Prudhomme 2013).

- **La règle artérielle**

Toute altération de la circulation des fluides entraîne une souffrance cellulaire à l'origine d'un dysfonctionnement tissulaire aboutissant à une modification morphologique. Ainsi, tout tissu, pour assurer sa fonction, doit être parfaitement alimenté par du sang artériel et drainé de ses impuretés par du sang veineux et de la lymphe. Un organe mal irrigué est affaibli : il ne peut plus assurer sa fonction ou bien tendre à sa protection ou sa guérison. Un des objectifs de l'ostéopathie est de rétablir la circulation de ces fluides là où elle est altérée (Eser, Prudhomme 2013; Giniaux 1992).

« Your duty as a master mechanic is to know that the engine kept is in so perfect a condition that there will be no functional disturbance to any nerve, vein, or artery that supplies and governs the skin, the fascia, the muscle, the blood or any fluid that should freely circulate to sustain life and renovate the system from deposits that would cause what we call disease. » (Andrew Taylor Still 1899) (« Votre devoir en tant que maître mécanicien est de savoir que le moteur conservé est dans un état si parfait qu'il n'y aura aucune perturbation fonctionnelle de tout nerf, veine ou artère qui alimente et gouverne la peau, les fascias, les muscles, le sang ou tout fluide qui devrait circuler librement pour maintenir la vie et rénover le système à partir de dépôts qui causeraient ce que nous appelons la maladie » [traduction libre]).

- **Le corps est une unité**

Conformément aux principes de l'anatomie et de la physiologie, le corps est une unité fonctionnelle qui doit être considérée dans son ensemble. Toute lésion même minime se répercute sur de plus grandes structures, entravant le fonctionnement correct de l'organisme (Eser, Prudhomme 2013; Dagain 2006).

- **Le corps a la capacité d'autorégulation et d'autoguérison**

Le corps dans son ensemble, doté d'un potentiel homéostatique, tend à se réguler et se guérir lui-même. Le rôle de l'ostéopathe est de lui apporter les conditions grâce auxquelles il sera capable de retrouver son état de plénitude. Si un corps perd cette capacité, aucune aide extérieure ne sera en mesure de le guérir (Eser, Prudhomme 2013; Giniaux 1992).

3.1.3. Définition de l'ostéopathie

Il n'existe pas de définition unique de l'ostéopathie. Les différents organismes sont tous à l'origine de leur propre consensus plus ou moins précis pour expliquer ce mot, défini par son fondateur comme une philosophie de traitement et non comme une méthode composée de gestes techniques précis. Le dictionnaire Larousse quant à lui, définit l'ostéopathie comme une « *méthode thérapeutique manuelle utilisant des techniques de manipulations vertébrales ou musculaires* ».

L'OMS affirme en 2010 dans un référentiel de l'ostéopathie que « *Osteopathy (also called osteopathic medicine) relies on manual contact for diagnosis and treatment. It respects the relationship of body, mind and spirit in health and disease; it lays emphasis on the structural and functional integrity of the body and the body's intrinsic tendency for self-healing. Osteopathic practitioners use a wide variety of therapeutic manual techniques to improve physiological function and/or support homeostasis that has been altered by somatic (body framework) dysfunction, i.e. impaired or altered function of related components of the somatic system; skeletal, arthrodiagonal and myofascial structures; and related vascular, lymphatic, and neural elements* » (World Health Organization 2010). (« L'ostéopathie (également nommée médecine ostéopathique) repose sur l'utilisation du contact manuel pour le diagnostic et le traitement. Elle prend en compte les relations entre le corps, l'esprit, la raison, la santé et la maladie. Elle met l'accent sur l'intégrité structurelle et fonctionnelle du corps et la tendance intrinsèque de l'organisme à s'auto-guérir. Les ostéopathes utilisent une grande variété de techniques thérapeutiques manuelles pour améliorer les fonctions physiologiques et/ou soutenir l'homéostasie altérées par des dysfonctions somatiques (les structures du corps), c'est à dire une altération ou une dégradation de la fonction des composantes concernées du système somatique : les structures squelettiques, articulaires, et myofasciales, ainsi que les éléments vasculaires, lymphatiques et neurologiques corrélés » ([Syndicat Français des Ostéopathes, 2016])).

L'Osteopathic International Alliance considère en 2014 dans un document intitulé « *Osteopathy and Osteopathic Medicine* » que « *Osteopathic healthcare offers a system of assessment, diagnosis and management that can be applied across a wide range of medical conditions. It is based on the principle that the structure and functions of the body are closely integrated, and that a person's well-being requires the neurological, musculoskeletal, circulatory and visceral structures to work in balance together. Osteopathic practice aims to restore (and maintain) a person's body to its overall natural state of well-being. This homeostasis is seen as promoting the body's ability to heal and regulate itself. Osteopathic practitioners thus assess and treat the 'whole person', rather than just focusing on specific symptoms or illnesses.* » (Osteopathic International Alliance 2013).

« *Les soins en ostéopathie proposent un système d'évaluation, de diagnostic et de traitement qui peut être appliqué à un large spectre d'états de santé. La prise en charge en ostéopathie est fondée sur le principe que les structures et les fonctions du corps sont étroitement liées, et que le bien-être d'une personne dépend du fonctionnement harmonieux entre les structures neurologiques, musculo-squelettiques, circulatoires et viscérales. La pratique de l'ostéopathie vise à restaurer (et à maintenir) l'organisme d'une personne dans son état de bien-être naturel. Cette homéostasie est considérée comme favorisant la capacité du corps à se soigner et à se réguler lui-même. Les ostéopathes examinent et soignent par conséquent une personne dans son ensemble sans se focaliser sur un symptôme particulier ou une maladie.* » ([Syndicat Français des Ostéopathes, 2016])).

Ces deux définitions sont une fois de plus empreintes des principes fondateurs de la philosophie de l'ostéopathie conçue par Still. Il est donc essentiel de s'y référer constamment lorsqu'on considère cette médecine, pour ne pas en perdre l'essence.

3.1.4. Dysfonction ostéopathique

Initialement, Still désigne comme lésion ostéopathique toute perturbation du passage des fluides ou cause à l'origine de cette perturbation. Le concept de lésion est au cœur des préoccupations au début du développement de l'ostéopathie. C'est ainsi que la prévalence des lésions chez les patients

malades est à l'ordre du jour lors de la 6^{ème} réunion annuelle du comité de l'éducation de l'association américaine pour l'avancement de l'ostéopathie en 1902.

La définition du terme lésion s'est ensuite précisée : Guy Dudley Hulett stipule que l'ensemble des tissus peut être touché par les lésions ostéopathiques et pas uniquement les os. Ce mot se réfère alors à toute modification structurelle qui entretient ou cause une perturbation fonctionnelle. Hulett travaille particulièrement sur le terme de dysfonction vertébrale en tant que discrète subluxation de vertèbres et non comme maladie ou malformation. Cette définition est affinée en 1935, restreinte à la diminution de mouvement articulaire des vertèbres résoluble par ostéopathie.

Parallèlement, la notion de complexe lésionnel est introduite en 1923, afin de lier et inclure les adaptations tissulaires des tissus mous à la lésion initialement présente. Les lésions peuvent alors être divisées en lésions primaires et secondaires. Seules les atteintes ostéo-articulaires sont considérées comme primaires, bien que leur origine puisse être organique ou psychique. La cause de ces lésions, via des lésions secondaires engendrées par un arc réflexe ou par irritation d'un segment de la moelle épinière, engendrerait alors une tension ligamentaire ou musculaire affectant la région vertébrale primaire.

Par opposition à la médecine allopathique qui emploie déjà le terme de lésion pour désigner « *un changement grave produit dans un organe par une maladie ou un accident* » (Le Robert, 2022), le terme de lésion ostéopathique est remplacé par celui de « dysfonctionnement somatique » dans les années 1960, pour en exclure la notion de dégât tissulaire (Liem 2016; Chêne 2013).

Aujourd'hui, une dysfonction ostéopathique est définie comme suit :

« Impaired or altered function of related components of the body framework system: skeletal, arthrodial and myofascial structures, and their related vascular, lymphatic and neural elements. It is characterized by positional asymmetry, restricted range of motion, tissue texture abnormalities, and/ or tenderness. The positional and motion aspects of somatic dysfunction are generally described by: (1) The position of a body part as determined by palpation and referenced to its defined adjacent structure, (2) The direction in which motion is freer, and (3) The direction in which motion is restricted. Somatic dysfunction is treatable using osteopathic manipulative treatment » (Giusti, American Association of Colleges of Osteopathic Medicine, Educational Council on Osteopathic Principles 2017).

« Réduction ou altération de la fonction des composants apparentés au système somatique (de charpente du corps) : structures squelettiques, articulaire et myofasciales, ainsi que leurs éléments vasculaires, lymphatiques et neutres connexes. Elle se caractérise par une asymétrie positionnelle, une amplitude de mouvement restreinte, des anomalies de la texture des tissus et/ou une sensibilité. La position et le mouvement du dysfonctionnement somatique sont généralement décrits par : 1/ la position d'une partie du corps telle qu'elle est déterminée par la palpation et référencée à sa structure adjacente, 2/ la direction dans laquelle le mouvement est plus libre et 3/ la direction dans laquelle le mouvement est limité. La dysfonction somatique peut être traitée à l'aide d'un traitement de manipulation ostéopathique. » [Traduction libre].

La dysfonction somatique est donc diagnostiquée par la présence de deux des quatre signes suivants : sensibilité, asymétrie, amplitude de mouvement anormale, modification de texture. Ces signes sont souvent désignés par l'acronyme TART (*Tenderness, Asymmetry, Range of motion changes, Tissue texture changes*). Résultant d'un dysfonctionnement des récepteurs proprioceptifs,

elle reste discrète, difficilement palpable et non visualisable à l'aide des examens d'imagerie et, tout en étant à l'origine d'une restriction de mouvement entre les tissus (Chêne 2013).

On distingue les dysfonctions primaires et secondaires. Les premières peuvent désigner soit la première dysfonction apparue, soit une dysfonction qui entretient des dysfonctions secondaires avec lesquelles elle forme un complexe. Les dysfonctions secondaires, comme leur nom l'indique, sont des adaptations du corps en réponse à une cause, c'est-à-dire à un dysfonctionnement, primaire (Giusti, American Association of Colleges of Osteopathic Medicine, Educational Council on Osteopathic Principles 2017).

3.1.5. Importance de la colonne vertébrale

La colonne vertébrale, charpente du corps, revêt une importance fondamentale en raison de sa position centrale, de sa grande mobilité et de son rôle protecteur vis-à-vis de la moelle épinière. Elle possède également une multitude d'articulations, ce qui lui confère la possibilité de réaliser des mouvements aussi nombreux que complexes. D'autre part, la moelle épinière a une importance majeure dans la régulation motrice et viscérale et dans l'origine des dysfonctionnements. On s'intéressera, dans les paragraphes suivants, à chacun de ces deux points.

Pour permettre au corps de se rééquilibrer lors d'altération de la mobilité d'une articulation vertébrale, il faut comprendre la mécanique vertébrale à l'origine de ce dysfonctionnement primaire. Chaque vertèbre a trois possibilités de déplacement, qui peuvent se combiner :

- la flexion et l'extension : les processus épineux s'éloignent ou se rapprochent les uns des autres (plan sagittal),
- la latéroflexion : les processus transverses s'éloignent du côté convexe et se rapprochent du côté concave (plan frontal),
- la rotation : l'articulation intervertébrale pivote dans le plan transversal ce qui déplace son processus épineux.

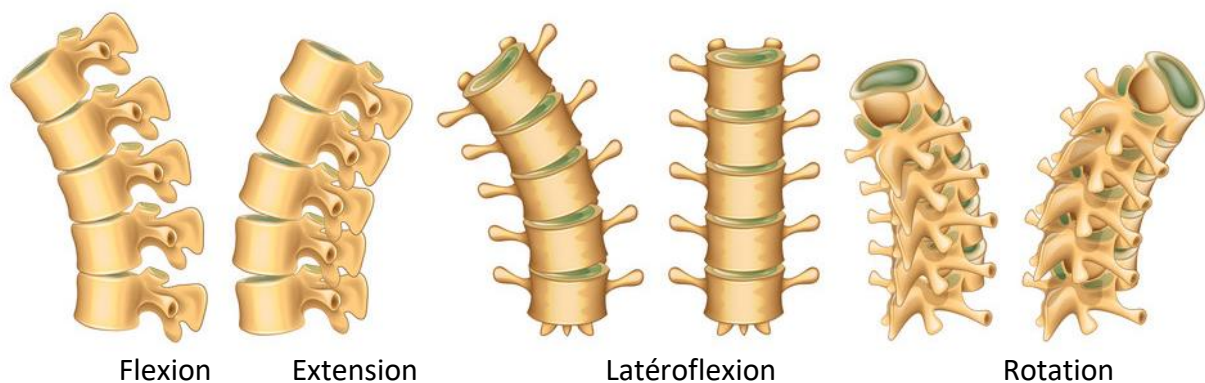


Figure 20 : biomécanique vertébrale, illustration des mouvements vertébraux (Viktoriya Kabanova, 2019)

Pour illustrer ce phénomène, on peut considérer le cas où la vertèbre lombaire L2 est bloquée en flexion, latéroflexion droite et en rotation droite par rapport à la vertèbre suivante L3. Elle ne pourra alors plus réaliser de mouvement inverse, c'est-à-dire une extension, une latéroflexion gauche et une rotation gauche par rapport à L3. En surface, il est alors possible de sentir l'apophyse épineuse de L2 partir vers la gauche en rotation vers la droite.

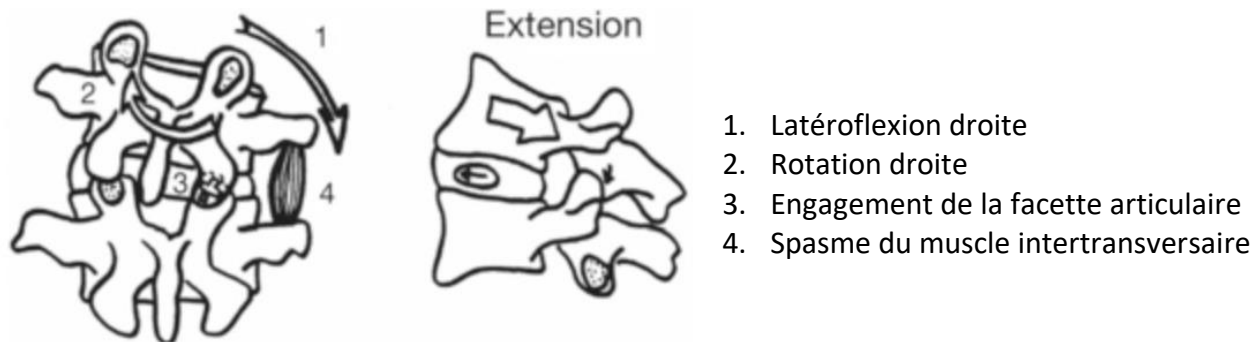


Figure 21 : exemple d'une dysfonction vertébrale associant plusieurs mouvements vertébraux (Clemedecine 2017)

Certaines zones, appelées pivots, soumises à des contraintes particulièrement intenses, sont davantage susceptibles de subir une dysfonction ostéopathique et d'être à l'origine de dysfonctionnements secondaires. Certains auteurs distinguent deux catégories de pivots : ceux dits de gravité, lieu de grande stabilité et ceux de mobilité, soumis à de nombreux mouvements. D'autres auteurs assimilent les pivots aux ceintures de la médecine chinoise. Ils considèrent alors que les zones de transformations morphologiques des vertèbres sont également des pivots. En effet, il se produit alors une modification de la transmission des forces liée au changement de propriétés mécaniques des vertèbres. Ces pivots peuvent alors être assimilés à des fusibles, à l'origine de dysfonctionnements (Brassaud 2006 ; Chêne 2006). Le schéma ci-dessous montre l'évolution morphologique des vertèbres le long de la colonne vertébrale du cheval.

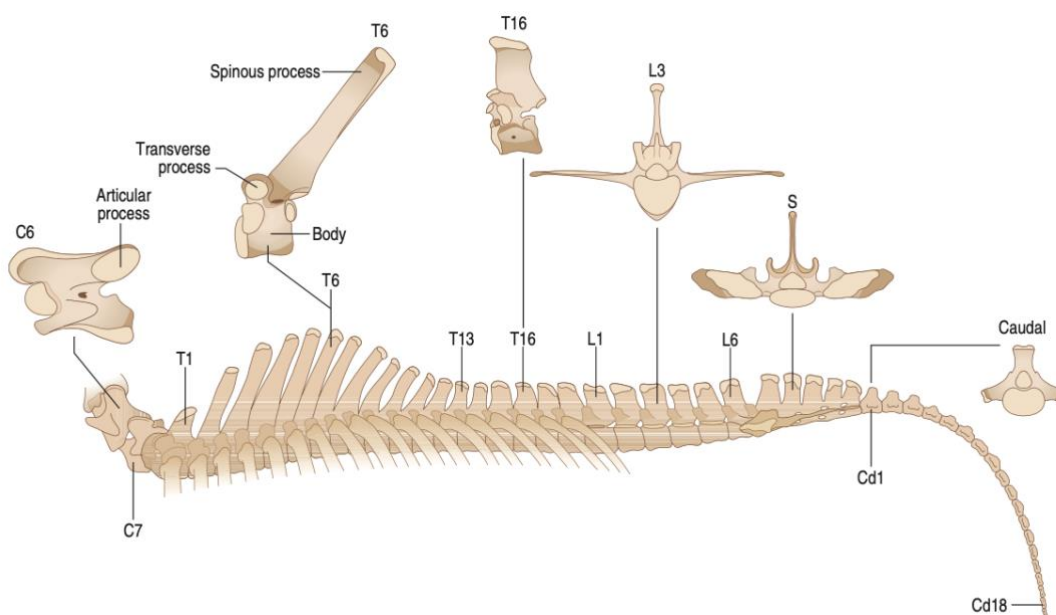


Figure 22 : morphologie des différentes vertèbres le long de la colonne vertébrale (Pusey, Brooks, Jenks 2010)

Les vertèbres ont également un rôle de protection de la moelle épinière, qui passe en leur sein à travers le canal rachidien. L'importance de cette dernière résulte de son triple rôle : elle est le centre de déclenchement de nombreux réflexes, elle prolonge l'encéphale pour transmettre les influx nerveux afférents et efférents via les nerfs spinaux et enfin, elle regroupe la majorité des centres neurovégétatifs. La moelle est composée d'une substance grise centrale en ailes de papillon et d'une

substance blanche périphérique contenant des faisceaux sensitifs et moteurs. La substance grise, symétrique, se divise de chaque côté en une corne dorsale, relai des racines dorsales sensitives, et en une corne ventrale à l'origine des racines ventrales motrices. La moelle épinière est enveloppée de trois méninges : la pie-mère interne, l'arachnoïde puis la dure-mère. Elle pèse environ 300 g, soit 40 % du poids du cerveau et occupe seulement les 3/5^{ème} du diamètre du canal rachidien. C'est l'espace sous arachnoïdien, imprégné de liquide céphalo-rachidien abondant, qui comble l'espace restant. Le système nerveux central, plus court que le canal vertébral, se termine en regard de la première vertèbre sacrée. Il est prolongé par le *filum terminale*, histologiquement apparenté à de la pie-mère, qui s'attache aux premières vertèbres caudales. Les derniers nerfs ne naissent donc pas en regard des espaces intervertébraux autorisant leur sortie. Le passage de ces nerfs dans le canal vertébral forme la queue de cheval (Collin 2010). Les schémas ci-dessous illustrent l'anatomie du canal rachidien.

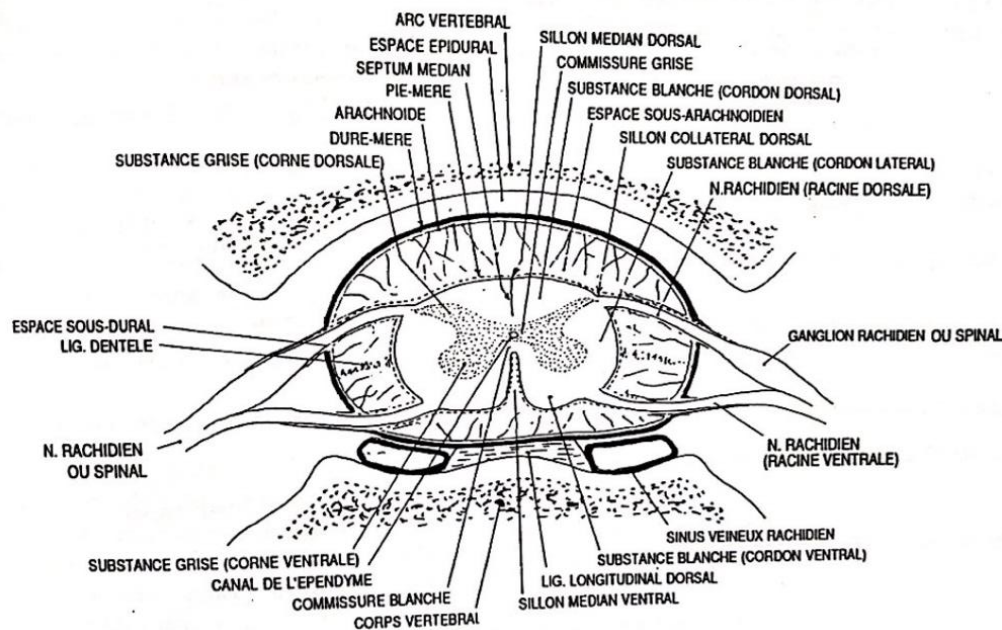


Figure 23 : coupe transversale de la moelle épinière et de ses enveloppes méningées (Collin 2010)

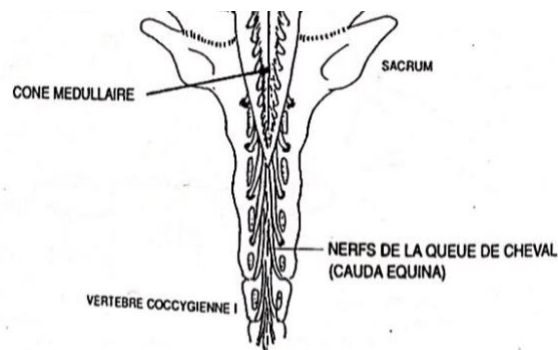


Figure 24 : vue dorsale de la portion terminale de la moelle épinière et de ses méninges, après ouverture du canal vertébral (Collin 2010)

L'ostéopathie prête à la moelle épinière un pouvoir de traction appelé force de traction médullaire. Lors du développement embryonnaire, les longueurs du canal vertébral et de la moelle épinière sont équivalentes, ce qui aligne l'émergence des nerfs avec leur sortie du canal vertébral. Le

différentiel de croissance entre la colonne vertébrale et la moelle épinière lors du développement embryonnaire serait alors à l'origine d'une force de traction physiologique, permanente et d'installation progressive, issue des points fixes crâniens et caudaux de la moelle épinière. La formation du *filum terminale* et de la queue de cheval en serait deux conséquences. Chez l'enfant entre 8 et 15 ans, Royo-Salvador calcule, après simplification du modèle, la force de traction médullaire qui se met en place pendant la croissance. Il estime que chez l'homme, elle est équivalente, à la traction d'un poids de 560 g selon l'axe longitudinal et de 200 g selon l'axe latéral. Cette force s'exerce sur la colonne vertébrale qui se déforme sous son action. La force de traction médullaire dans un intervalle de valeur physiologique participerait donc à donner son inflexion naturelle à la colonne vertébrale alors qu'une augmentation pathologique de son intensité lui conférerait un rôle déterminant dans la mise en place de certaines malformations osseuses du rachis. Faisons une analogie avec un collier de perles : chaque perle représente une vertèbre, tandis que la ficelle qui les lie représente la moelle épinière. Si le diamètre des perles augmente sans adaptation de la longueur de la ficelle, alors cette dernière exercera une force engendrant une modification de l'agencement des perles les unes par rapport aux autres. De plus, en raison de l'altération du potentiel oxydatif du milieu, un excès de tension entraînerait des atteintes du système nerveux central résultant. Parmi les conséquences de ce phénomène, on peut notamment citer l'hydrocéphalie (Boisseleau 2012; Chêne 2006b).

Le mouvement respiratoire primaire prend naissance dans le système nerveux central. Sutherland fonde son fonctionnement sur 5 facteurs : la fluctuation du liquide cébrospinal, la motilité des méninges crâniennes et spinales à l'origine d'une tension réciproque, la motilité du système nerveux central et celle des os du crâne et du sacrum, involontaire, entre les iliaques. Le processus est le suivant : par le biais des méninges qui ne possèdent pas de points fixes entre la troisième vertèbre cervicale et la seconde vertèbre sacrée, le mouvement respiratoire primaire est transmis au sacrum. Ce dernier pulse dans un plan axial entre les iliaques, conjointement aux mouvements crâniens. Cette impulsion est ensuite transmise au reste du corps par le tissu conjonctif qui prolonge les méninges. La colonne vertébrale renferme donc la première caisse de résonance du mouvement respiratoire primaire qui est ensuite transmis et perceptible dans le tout le reste de l'organisme vivant (Jordan 2009; Kenneth 2002; Cayre, Chêne 2008).

3.2. LE TONUS MUSCULAIRE

3.2.1. Fuseau neuromusculaire

Dépourvus de tout rôle moteur, les fuseaux musculaires sont les organes responsables de la sensibilité proprioceptive inconsciente des muscles. Alignés parallèlement aux fibres musculaires squelettiques - extrafusales -, ils sont délimités par une capsule conjonctive et constitués de 4 à 15 fibres musculaires intrafusales spécialisées. Ces fibres intrafusales peuvent être de 3 types différents : de chaîne, de sac 1 ou de sac 2.

L'innervation sensitive afférente, sensible à l'étirement de la partie médiane de ces fuseaux, est double : d'une part, les terminaisons nerveuses de type Ia, myélinisées et de gros diamètre, s'enroulent autour de toutes les fibres intrafusales et sont sensibles à l'étirement statique et dynamique ; d'autre part, les terminaisons nerveuses de type II, myélinisées également mais de diamètre plus modeste, entourent principalement les fibres intrafusales à chaîne et éventuellement celles à sac 2. Elles ne sont sensibles qu'à l'étirement statique, c'est-à-dire au maintien de l'élongation du muscle dans le temps.

Les fibres musculaires intrafusales sont innervées par 2 types de motoneurones : les motoneurones β qu'elles partagent avec les fibres musculaires squelettiques et les γ qui leur sont exclusives et qui sont à l'origine de la commande fusimotrice. Leur rôle est d'adapter la longueur des fibres intrafusales afin de préserver leur sensibilité. L'activation de ces motoneurones peut donc accroître ou altérer la sensibilité des fuseaux musculaires et donc leur réponse à l'étirement. Selon leur action statique ou dynamique, les motoneurones sont respectivement séparés en statiques S (γ_s) ou dynamiques D (γ_d). L'activation des γ_s augmente la fréquence de décharges issues des fibres intrafusales à chaîne et à sac 2, sensibles à l'étirement statique. À l'inverse, les motoneurones γ_d sont spécifiques aux fibres intrafusales dynamiques (sac 1). Leur activation exacerbe la réponse primaire à l'étirement dynamique (Rossi-Durand 2006; Ellaway, Taylor, Durbaba 2015).

L'organisation des fuseaux musculaires est schématisée ci-dessous. Leur répartition dans le muscle est figurée sur la partie gauche, tandis que leur organisation est représentée à sa droite immédiate. L'ensemble des fibres intrafusales est matérialisé par le large trait rouge entouré de sa capsule conjonctive c et innervé par le nerf n. Le troisième groupe, nommé « *Intrafusals muscle fibres* » (« *Fibres musculaires intrafusales* »), illustre les différents types de fibres, celles à sac 1 et 2 à gauche et celles à chaîne, plus nombreuses, à droite. L'innervation sensorielle primaire « Ia » et celle secondaire « II » sont ensuite représentées sur le schéma titré « *Sensory innervation* » (« *Innervation sensorielle* »). On observe les terminaisons nerveuses « Ia » entourant toutes les fibres intrafusales alors que l'innervation secondaire « II » délaisse les fibres intrafusales à sac 1. A droite, sur le schéma « *Motor innervation* » (« *Innervation motrice* »), l'innervation motrice par les motoneurones β et γ est représentée. Ces derniers sont subdivisés entre les motoneurones dynamiques innervant les fibres intrafusales à sac 1 et les motoneurones statiques dont les terminaisons se trouvent dans les autres fibres intrafusales.

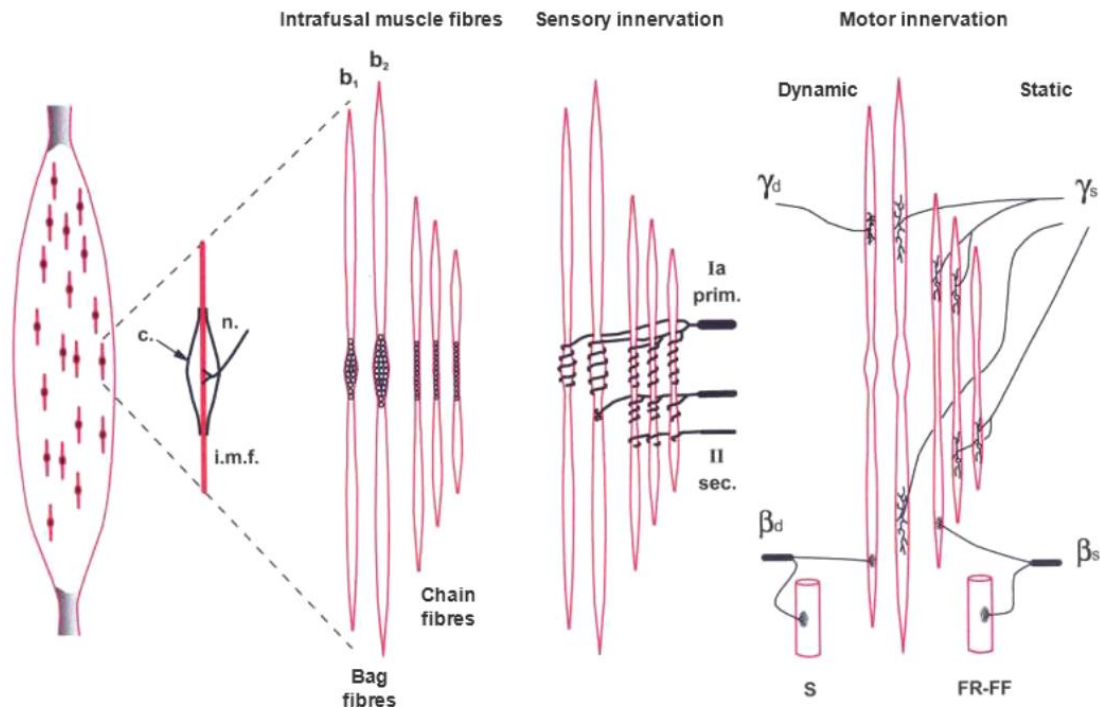


Figure 25 : organisation du fuseau neuromusculaire (Ellaway, Taylor, Durbaba 2015)

3.2.2. Réflexe myotatique et boucle de régulation γ

Le réflexe myotatique monosynaptique est déclenché lors de l'étirement soudain d'un muscle. Lorsque que ce dernier est soudainement et intensément étiré, sa contraction associée à la relaxation du muscle antagoniste est initiée. Ce réflexe évite donc l'extension passive d'un muscle au-delà de son amplitude physiologique et participe au maintien postural. Chronologiquement, ce réflexe démarre avec la perception de l'élongation par les fibres intrafusales. L'information remonte alors le long des voies nerveuses afférentes. Dans le cadre de ce réflexe, l'innervation primaire joue un rôle primordial : son diamètre plus conséquent lui permet de transmettre l'information plus rapidement à la moelle épinière où il se divise en deux. La première synapse est la conséquence d'un relais direct avec un motoneurone α , le motoneurone du muscle strié. Ce dernier se termine sur la plaque motrice du muscle étiré et induit le raccourcissement des fibres musculaires squelettiques. Il est également à l'origine d'une adaptation de la longueur des fibres intrafusales par activation des motoneurones γ . Il s'agit d'une coopération $\alpha - \gamma$. La deuxième synapse, après un relais par un interneurone inhibiteur, bloque la contraction du muscle antagoniste. On obtient donc, à l'issue de ce circuit, une contraction rapide du muscle agoniste associé à un relâchement du muscle antagoniste (Dolbow, Throckmorton 2022; Tan, Zia 2007).

Le réflexe myotatique est illustré dans le schéma ci-après. L'élongation des structures sensibles à la tension, après un relais synaptique dans la moelle épinière, excite les motoneurones α du muscle agoniste et inhibe ceux du muscle antagoniste. Il en résulte un mouvement réflexe du membre.

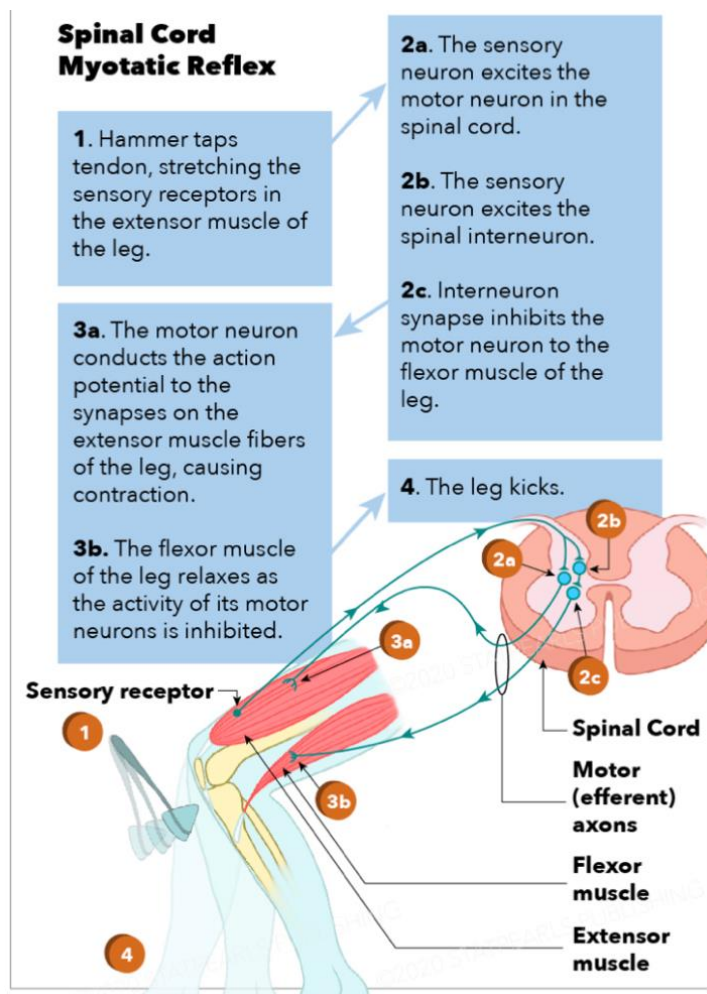


Figure 26 : physiologie du réflexe myotatique (Dolbow, Throckmorton 2022)

Le dysfonctionnement du motoneurone γ peut être à l'origine de contractures musculaires. En effet, le système fusimoteur pourrait être défini comme le mécanisme d'ajustement de la sensibilité mécanique du fuseau musculaire, notamment sur un plan comportemental. Ainsi, un stimulus nociceptif ou neuropsychique tel que la peur ou l'angoisse serait à l'origine d'une stimulation des motoneurones γ . Une activation de ces motoneurones raccourcirait le fuseau musculaire et les mettrait en tension. Il en découlerait une excitation des terminaisons nerveuses afférentes primaires et secondaires. Ces dernières, comme dans le réflexe myotatique, exciteraient alors les fibres « la » qui activeraient à leur tour les motoneurones α . On aboutirait alors à la présence d'une contraction musculaire. Si l'excitation des motoneurones γ perdurait dans le temps, on pourrait alors constater la formation de dysfonctions ostéopathiques par un maintien des motoneurones α en état de facilitation. De même, un rapprochement brusque des insertions musculaires dépourvu de signal issu du fuseau neuromusculaire, par exemple un traumatisme, pourrait être à l'origine d'une contracture. Cette dernière serait causée par une augmentation durable du tonus musculaire liée au maintien d'une activité élevée des motoneurones γ (Denis 2007a).

Lors d'un étirement soudain, un second réflexe nommé réflexe myotatique inverse disynaptique est alors enclenché. À la jonction des muscles et des tendons se trouve l'organe de golgi, un mécanorécepteur d'où partent des fibres nerveuses myélinisées dites de type Ib. Lors de la contraction musculaire, le raccourcissement du muscle induit une mise sous tension de cet organe de golgi qui active les fibres nerveuses de type Ib. Cette activation inhibe les motoneurones α et γ du muscle agoniste et excite les motoneurones du muscle antagoniste. Lorsqu'une tension très importante est exercée sur le tendon, le signal nerveux émis par l'organe de Golgi supplante le signal activateur. Il inhibe les motoneurones α et donc la contraction musculaire (Fougeront, Garnier, Fleiter 2014; Collet 2015).

Le tonus de base est l'état de tension physiologique non nul du muscle lorsque celui-ci est relâché. La maîtrise de ce tonus permet l'exécution de mouvements précis et harmonieux dans un espace soumis à la gravitation. Les dysfonctionnements peuvent notamment être liés à un dérèglement de ce tonus qui prend le pas, localement ou non, sur une intensité supérieure au tonus de base. Une zone de contraction musculaire est donc l'un des signes utiles à rechercher pour identifier les dysfonctionnements. À l'inverse, certains réflexes comme le réflexe myotatique inverse seront utilisés pour résoudre les contractures musculaires.

3.2.3. Point de tension

Un point de tension, appelé « *trigger point* » en anglais, est un spasme superficiel non inflammatoire, localisé et durable, d'une bande musculaire. Cette contraction, illustrée sur le schéma suivant, est décrite comme un foyer d'hyperexcitabilité musculaire formant un nodule de 2 à 10 mm, palpable à l'origine de raideur musculaire et de la douleur locale décrite comme sourde et non pulsatile.

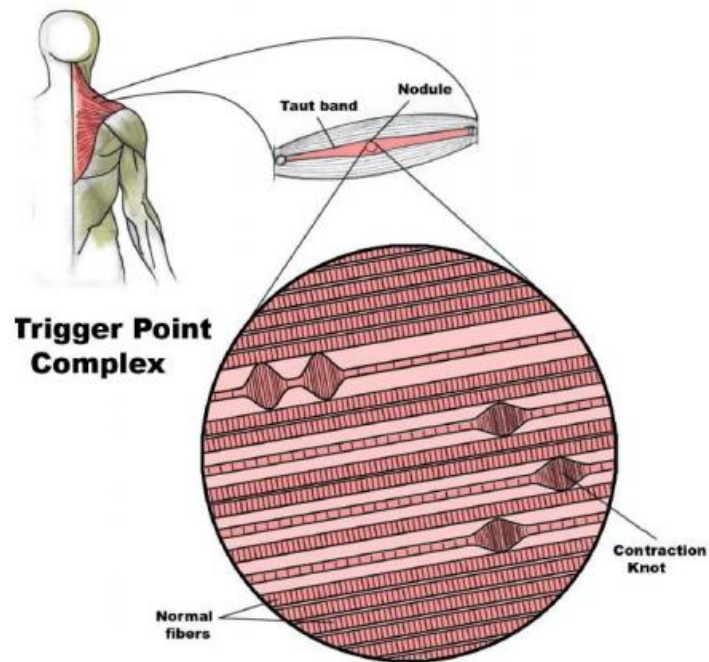


Figure 27 : les points de tensions résultent du raccourcissement pérenne d'un petit nombre de sarcomères. Ce raccourcissement est induit également à l'étirement des sarcomères en amont et en aval du point de tension (Shah et al. 2015)

Ces points de tension sont essentiellement formés de petites fibres musculaire de type I. Lors de contractions musculaires, celles-ci sont les premières sollicitées et les dernières relâchées. Leur tonus reste donc élevé pendant de longues périodes, ce qui les rend plus sensibles aux dommages musculaires. Une fois installés, un cercle vicieux se met en place : le spasme perturbe la perfusion intramusculaire et l'hypoxie alors induite favorise l'acidification et l'accumulation du calcium dans le muscle. Or, ce dernier point serait un des facteurs clés de formation des trigger points.

Il est suspecté que ces spasmes soient à l'origine de douleurs projetées similaires via un stress mécanique ou une inflammation neurogène, bien que cela n'ait pas encore été démontré. Ces douleurs sont qualifiées de myofasciales, en raison des tissus qu'elles touchent. Localement, on peut observer des modifications de température liées à une perturbation de la vascularisation, à une modification de la fonction du système nerveux autonome au niveau des triggers points ou à une inflammation des points de douleurs projetés.

Le diagnostic de ces points de tension se fonde essentiellement sur une palpation attentive des tissus mous. Par exemple, un nodule dur et douloureux à la pression dans une bande musculaire tendue, associé à une douleur spontanée, sera considéré comme un point de tension et désigné comme actif. Dans le cas contraire, on le considèrera comme latent (Shah et al. 2015; Vazquez-Delgado, Cascos-Romero, Gay-Escoda 2009).

Chez les chevaux, les trigger points induisent également des défenses au travail et des contre-performances. Comme chez l'homme, ces spasmes sont identifiés par la palpation de nodules fermes dans une bande musculaire tendue dont la pression déclenche des réactions de douleurs. La pression de ces points peut être faite avec les doigts ou bien les coudes. Il est important de veiller à appliquer cette tension progressivement pour ne pas surprendre le cheval ni prendre en compte de réactions faussement négatives. Il existe des cartographies des localisations les plus courantes de

ces points, comme l'illustre le schéma ci-dessous. Les ostéopathes peuvent les tester au moment de poser leur diagnostic (Sato et al. 2020; Eser, Prudhomme 2013).



Figure 28 : localisation des points de tension les plus courants chez le cheval d'après Meagher (Eser, Prudhomme 2013)

Point de tension	Muscle	Point de tension	Muscle
PT 1	M. droit latéral de la tête	PT 14	M. longissimus caudal
PT 2	M. brachiocéphalique	PT 15	Transition du m. longissimus dans le m. glutéal superf.
PT 3	M. multifides de l'encolure	PT 16	M. biceps du fémur : insertion
PT 4	M. rhomboïde de l'encolure	PT 17	M. biceps du fémur : corps du muscle
PT 5	M. rhomboïde du thorax	PT 18	M. gastrocnémien
PT 6	M. trapèze	PT 19	M. semi-tendineux
PT 7	M. supraépineux	PT 20	M. semi-membraneux
PT 8	M. infraépineux	PT 21	M. tenseur du fascia lata
PT 9	M. dentelé ventral du thorax	PT 22	M. iliopsoas
PT 10	M. triceps brachial : corps du muscle	PT 23	M. glutéal accessoire
PT 11	M. biceps brachial : insertion	PT 24	M. oblique externe de l'abdomen : insertion sur la tubérosité coxale
PT 12	M. pectoral profond	PT 25	M. oblique externe de l'abdomen : insertion sur les côtes
PT 13	M. longissimus : crânial	-	-

Tableau 2 : liste des points de tensions les plus courants et de leur localisation chez le cheval d'après Meagher, correspondant à ceux placés sur le cheval de la figure précédente (Eser, Prudhomme 2013)

3.2.4. Notion de barrière motrice

Tout élément anatomique mobile peut être comparé au fléau d'une balance à plateau : au repos, on peut définir une position neutre. On distingue d'infimes variations de position du fléau autour de ce point neutre. En effet, une position fixe, rigide, entraverait sa capacité d'adaptation alors

qu'une faible oscillation entretient un équilibre harmonieux. Partant de cette position d'équilibre, le fléau peut effectuer des mouvements d'amplitude prédéfinie. Si l'obstacle se trouve hors du fléau et du point d'équilibre, alors ce dernier peut toujours osciller, mais l'amplitude du mouvement sera limitée. Le déséquilibre induit s'apparente alors plus aux situations pathologiques associées aux insuffisances organiques ou aux restrictions de mobilité articulaire. Les dysfonctionnements ostéopathiques seraient plutôt représentés par un obstacle situé entre le fléau et le point neutre. Des forces continues sont alors mises en jeu, tentant vainement de résoudre le blocage et de retourner au point d'équilibre. Ces blocages apparaîtraient par exemple, lors de mouvements d'amplitude excessive. Le système nerveux verrouillerait alors l'articulation afin d'éviter une luxation grâce au réflexe myotatique enclenché dans le muscle controlatéral étiré. Le spasme musculaire apparaît alors et le point neutre est déplacé : il n'est plus à l'équilibre (Giniaux 1992).

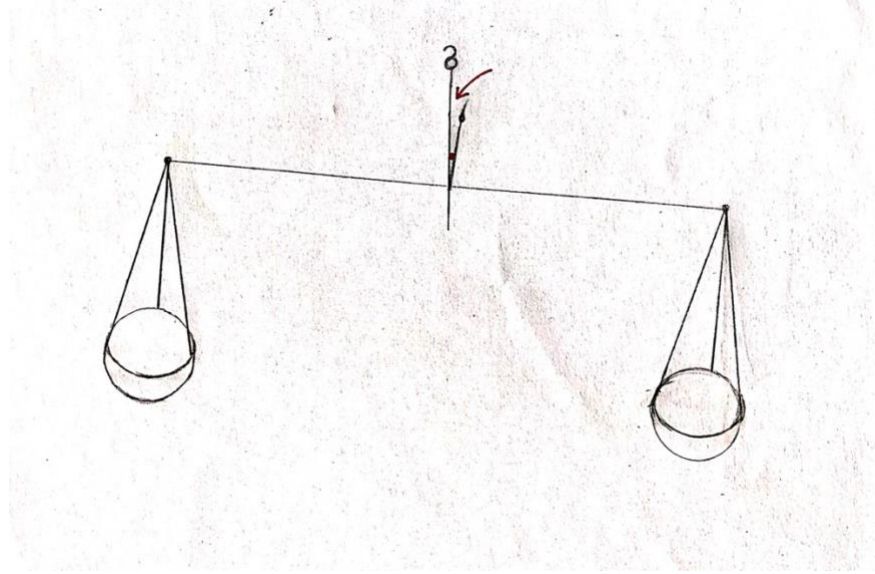


Figure 29 : balance à plateau illustrant le concept de dysfonction ostéopathique : un obstacle s'est formé entre le fléau et le point d'équilibre. Le fléau ne peut plus revenir à cet état d'équilibre, malgré la mise en jeu de forces qui vont dans ce sens

L'amplitude du mouvement dans les trois dimensions de l'espace est donc une composante très étudiée en ostéopathie. Le mouvement d'une articulation peut être initié soit par l'individu lui-même par recrutement des fibres musculaires striés, soit par un agent extérieur sans intervention volontaire du cheval, lorsque le muscle est relâché. Le premier cas est défini comme mobilité active et le second comme mobilité passive. L'amplitude associée à ces deux types de mouvements est différente. La limite de la mobilité active est appelée barrière physiologique. Elle est liée à la capacité de contraction du muscle agoniste et à la faculté d'étirement de l'antagoniste. Au-delà de cette amplitude se trouve la barrière élastique, limite de l'amplitude passive liée aux structures stabilisatrices de l'articulation comme les ligaments. Cette dernière barrière est proche de la barrière anatomique qui définit l'amplitude totale. Son dépassement induit des lésions anatomiques. La tension musculaire, proportionnelle à la résistance au mouvement, augmente à mesure que l'on s'approche des différentes barrières anatomiques et s'amenuise en direction du point neutre (GETM ASETHEMA 2013).

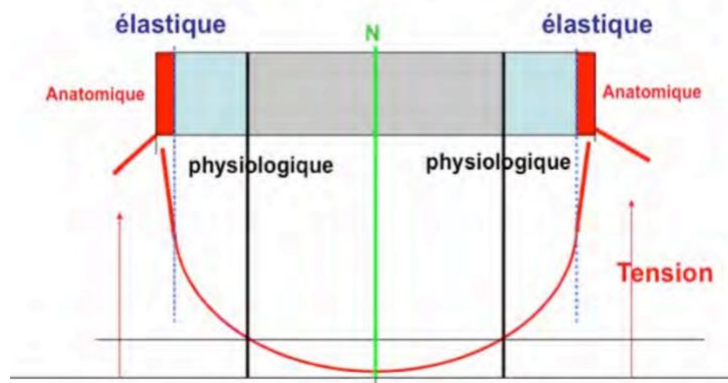


Figure 30 : représentation de l'amplitude et de la tension dans une situation physiologique : le point neutre est positionné entre les différentes barrières physiologiques élastiques et anatomiques. La tension représentée par la courbe rouge augmente de façon exponentielle à l'approche des différentes barrières (GETM ASETHEMA 2013)

Dans le cas d'une dysfonction, une perte de mobilité survient, associée à une modification de la courbe de tension. Du côté lésé, la tension augmente beaucoup plus rapidement, jusqu'à atteindre une barrière nommée barrière pathologique. L'augmentation de la tension est alors progressive et le point neutre est déplacé, se positionnant à mi-chemin entre les deux extrêmes de l'amplitude. La courbe de tension est donc également déplacée du côté opposé à la lésion. Lors d'une dysfonction myofasciale, la restriction de mobilité est plus discrète et le point neutre n'est pas modifié. La barrière myofasciale doit être attentivement recherchée : on observe une diminution de l'amplitude active, associée ou non à une légère altération de l'amplitude passive. La tension musculaire augmente anormalement entre la barrière myofasciale et la barrière physiologique avant de retrouver une trajectoire normale jusqu'à la barrière élastique (GETM ASETHEMA 2013).

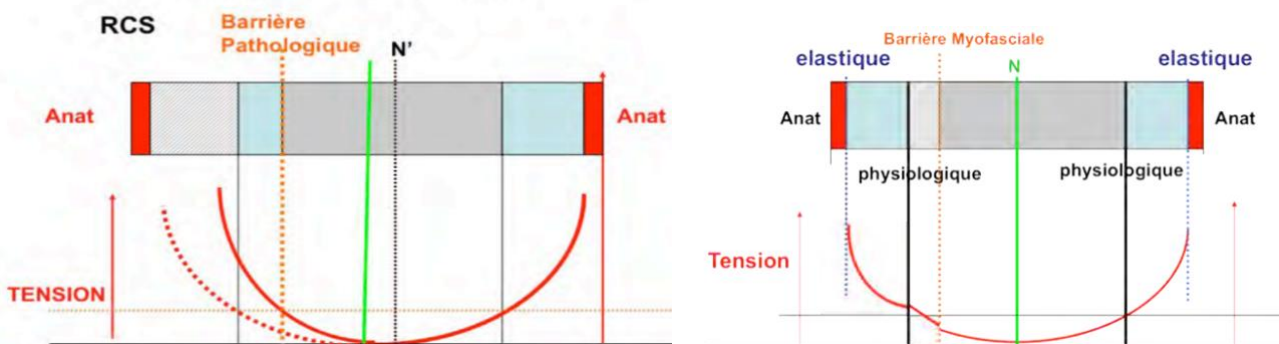


Figure 31 : restriction de mobilité en cas de dysfonction : sur le schéma de gauche, l'amplitude articulaire est quantitativement altérée ; sur celui de droite, elle est qualitativement modifiée (GETM ASETHEMA 2013)

Comme illustré sur le schéma de gauche ci-dessus, la formation d'une barrière pathologique implique un accroissement précoce de la tension musculaire du côté opposé à la contracture, associé à un déplacement du point neutre vers le côté sain. En cas de dysfonction myofasciale discrète, le point de neutralité est maintenu. L'amplitude active s'altère légèrement et la tension musculaire s'intensifie ponctuellement. Lorsque la mobilité est qualitativement ou quantitativement bouleversée, la fonction de l'organe ne peut plus être parfaitement réalisée. L'organisme met en effet en place divers phénomènes compensatoires. La dysfonction devient cliniquement observable lorsque les capacités d'adaptation de l'individu sont dépassées (GETM ASETHEMA 2013).

3.3. DIAGNOSTIC

La consultation ostéopathique inclut des temps communs à tout examen locomoteur du cheval afin d'établir un diagnostic.

Le recueil précis de l'anamnèse et des commémoratifs du cheval fait partie des étapes indispensables. Si cette collecte est faite avant d'examiner le cheval, ces informations offrent une première approche au praticien, qui lui permettront ensuite d'adapter son raisonnement diagnostique par la suite. A l'inverse, cette étape peut avoir lieu après avoir évalué le cheval ce qui préserve l'objectivité de l'ostéopathe lors de l'observation du cheval et de l'interprétation des tests diagnostiques. Les commémoratifs et l'anamnèse permettent alors de confirmer et d'affiner la chaîne de dysfonctions mise en évidence.

De même, une évaluation globale de l'appareil locomoteur du cheval est essentielle. Elle débute par l'observation à distance du cheval et de ses allures. En examinant la région dorsale, la proéminence d'un processus épineux, d'une extrémité du sacrum ou bien des tubérosités ischiatiques et coxales seront particulièrement recherchés. La symétrie de la ligne du dos, des sabots et des allures est également importantes tout comme l'absence d'amyotrophies musculaires ou de caractère étriqué de ses allures. Enfin, en passant ses mains sur le cheval, l'ostéopathe cherchera des zones plus chaudes ou plus froides que le reste du corps, des adhérences sous-cutanées ou des points de tension. C'est seulement après cette approche globale du cheval que sont spécifiquement recherchés les dysfonctionnements ostéopathiques (Eser, Prudhomme 2013).

3.3.1. Principe général

La recherche des dysfonctionnements du cheval se fait ensuite par analyse de ses mouvements, à la recherche de perte d'amplitude de ces derniers. Lors de la mobilisation, les trois types de mouvements possibles d'une articulation sont évalués : la flexion ou l'extension, la latéroflexion et la rotation. Les tests de mobilité articulaire se font à échelle des macromouvements et des micromouvements. Ces derniers peuvent être étudiés sous trois angles : ostéoarticulaire, membraneux ou fluïdique. Le principe est de mobiliser les structures autour du point neutre afin de mettre en évidence les dysfonctionnements en vigueur (Denis 2007b).

Les muscles du cheval sont épais et massifs. La palpation n'examine donc qu'une partie restreinte de ses muscles. Les restrictions de mobilité objectivables constituent ainsi une précieuse source d'information à propos de zones de tension profondes. Si la mobilité, active ou passive, s'avère diminuée, l'ostéopathe pourra suspecter des tensions musculaires plus profondes qui entraveraient la transmission des forces au sein des chaînes musculaires.

Certains ostéopathes voient la colonne vertébrale comme un clavier diagnostique de l'organisme, au regard de la moelle épinière qu'elle renferme, de l'importance du système nerveux autonome et de son rôle de charnière du corps, dans la mesure où il connecte les extrémités crânielles et caudales. De surcroît, il possède une place centrale dans les chaînes musculaires myofasciales. Le schéma suivant illustre ces chaînes musculaires dont les zones de croisements sont signalées par des triangles de couleurs.

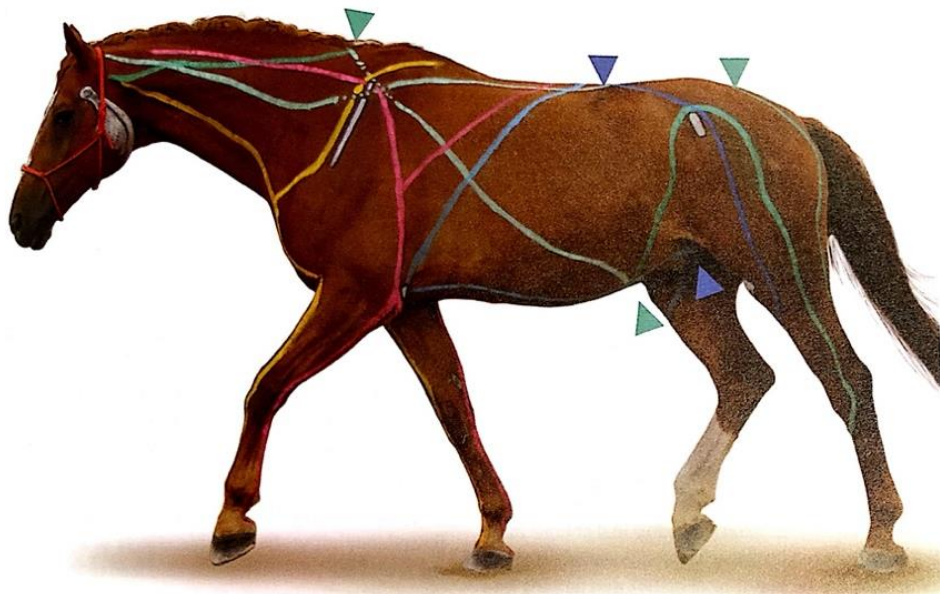


Figure 32 : principales chaînes musculaires du cheval (Nevin, Colles, Tozzi 2020)

3.3.2. Établissement d'une chaîne de dysfonctions

La dysfonction ostéopathique est liée à des contractures de petits muscles profonds au rôle stabilisateur, tel que le muscle multifide dans le cas de la colonne vertébrale. Leur raccourcissement engage les facettes articulaires des arcs vertébraux et restreint la mobilité de l'articulation ce qui se traduit par l'apparition d'une barrière motrice et donc d'une dysfonction ostéopathique. Ce dysfonctionnement peut être primaire ou bien adaptatif, en lien avec un autre trigger point dans les muscles plus superficiels ou une autre dysfonction. De même, elle sera à l'origine d'autres points de tensions musculaires et de dysfonctions, notamment par l'intervention du système nerveux autonome. L'ensemble des dysfonctions ostéopathiques forment alors une chaîne de dysfonctions, chacune étant une conséquence du dysfonctionnement précédent. Ainsi, il est possible qu'une affection médicale ponctuelle entraîne une dysfonction vertébrale qui, en entretenant le trouble initial, deviendrait alors chronique. À titre d'exemple, la chaîne suivante pourrait exister : une dysfonction de l'articulation sacro-iliaque peut altérer la mobilité des psoas droits, ce qui met sous tension les piliers du diaphragme gauche. Ces derniers restreignent alors les possibilités de mouvement de l'épaule gauche et de l'os hyoïde via la chaîne profonde. Cliniquement, la bouche ou la nuque peuvent alors être bloquées.

Le rôle de l'ostéopathe est d'abord de tester l'intégralité du corps du cheval afin de relever l'ensemble des dysfonctions et de les caractériser selon les différents mouvements possibles : la flexion et l'extension, la latéoflexion ou enfin la rotation. A la suite de cet inventaire, il les lie entre elles afin de reconstituer la chaîne de dysfonctions qui s'est mise en place. En effet, l'objectif est de résoudre le dysfonctionnement primaire, à l'origine de toute la chaîne adaptative qui en a découlé.

3.3.3. Exemples de test diagnostiques

Dans le cadre de cette thèse, seules les dysfonctions des zones visibles sur la zone d'intérêt des thermogrammes enregistrés sont étudiées. Cette zone s'étend de la région vertébrale de la première thoracique T1 à la première caudale Cd1, en incluant la région du bassin. De ce fait, des exemples de tests diagnostiques seront données pour ces différentes régions anatomiques.

Cependant, comme précisé dans le paragraphe précédent, les dysfonctions sont liées entre elles par des chaînes évoluant sur l'ensemble de l'organisme. De ce fait, bien que seuls les tests concernant la région dorsale aient été présentés, l'ensemble du corps du cheval est testé et traité. L'ostéopathie a une approche globale de l'organisme et ne peut restreindre son intérêt ou son action à une région anatomique.

Enfin, il est primordial de noter qu'il existe de très nombreux tests. Chaque ostéopathe utilise une bibliothèque qui lui est propre, selon son expérience et sa sensibilité. Ainsi, cette thèse ne se veut pas exhaustive mais constitue un aperçu de l'approche proposée par certains auteurs tels que Dominique Ginjaux et Katia M-L Eser.

3.3.3.1. Test du garrot

Les dysfonctions du garrot, de T2 à T10, résultent souvent de problèmes d'engagement des postérieurs. Un cheval qui n'engage pas ses postérieurs pour pousser et qui, au contraire, se tracte avec les antérieurs, aura tendance à bloquer son garrot. Cliniquement les chevaux concernés réagissent souvent au sanglage et refusent de monter le garrot. Leur dos est raide et la liberté d'épaules diminuée. Ils préfèrent par exemple sauter avec le dos plat que de faire un refus, pour ne pas fléchir le dos. Enfin, un blocage du garrot est souvent mis en relation avec des gênes au niveau des pieds antérieurs.

Pour tester la mobilité du garrot, le praticien se place face au profil du cheval. Dans le cas où il est à sa gauche comme sur l'illustration ci-dessous, il saisit le paturon de l'antérieur gauche dans sa main gauche. Sa main droite est posée sur le garrot, le majeur placé sur la vertèbre à tester, l'index et l'annulaire respectivement positionnés sur la vertèbre précédente et sur la suivante. Pour évaluer la flexion, il faut amener le membre crânialement en triple flexion.

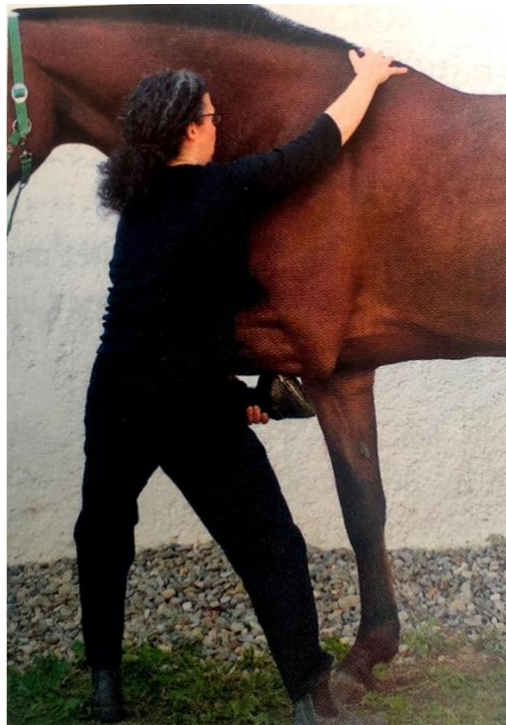


Figure 33 : positionnement de l'ostéopathe pour tester la flexion du garrot (Eser, Prudhomme 2013)

La latéoflexion et la rotation s'évaluent en ajoutant une légère adduction à ce mouvement. La latéoflexion gauche alors obtenue est associée à une rotation droite. Il est également possible d'évaluer ces deux dernières amplitudes de mouvement en prenant entre le pouce et l'index les processus épineux voisins de celui qui est testé. Il faut alors fixer un processus épineux pour balancer le second de la droite vers la gauche. Ainsi, une flexion et une rotation homolatérales sont observées.

L'objectif de ces tests est d'évaluer la correction de la biomécanique de l'articulation, afin de diagnostiquer une éventuelle diminution d'amplitude ou une réaction douloureuse (Eser, Prudhomme 2013; Giniaux 1992).

3.3.3.2. Test de la jonction thoraco-lombaire

D'après D. Giniaux en 1992, les vertèbres thoraciques en dysfonction peuvent avoir des conséquences très variées. Lorsqu'une vertèbre de T11 à T13 dysfonctionne, il rapporte avoir constaté majoritairement des maux d'estomac caractérisés par des bâillements, des troubles de l'appétit ou encore des tics à l'appui. Cependant, aucun lien anatomique n'est encore scientifiquement démontré. La vertèbre T14 est rarement bloquée. Une perturbation de la mobilité de T15 à T17 complique le travail dans l'incurvation et altère la rectitude des chevaux, qui ont alors tendance à se traverser. Lorsque la T15 est concernée, D. Giniaux observe une excitation du système nerveux parasympathique, avec pour effets possibles une transpiration excessive dans le box après le travail ou des coliques de spasme. Enfin, il arrive fréquemment que la vertèbre T18 se bloque chez le cheval lorsqu'il se roule : ses lombaires, très mobiles, subissent alors un puissant mouvement de torsion transmis à T18, moins mobile car est retenue par son attache aux côtes. Ce dysfonctionnement de T18 chez les chevaux qui se roulent va souvent de pair avec des coliques de stase.

Quant aux vertèbres lombaires L, les nerfs moteurs émergents sont souvent à l'origine d'une dysfonction de l'une d'entre elles. La plus caractéristique est la névralgie sciatique qui, au travail, s'exprime par un inconfort de l'arrière main et une déportation latérale. La première lombaire est liée aux gonades, mâles ou femelles. Chez les juments, des dysfonctionnements ovariens en hypo ou en hyper sont observés, et chez les entiers des problèmes de rétraction des cordons testiculaires existent. La seconde lombaire peut se bloquer chez les galopeurs lors du sprint de fin de course. Elle est fortement sollicitée lorsque ces derniers engagent les postérieurs très loin sous leur masse, demandant une flexion intense du dos. La vertèbre L2, alors positionnée au sommet du dos, se bloque facilement et cause des myosites lombaires. Liée aux reins, le dysfonctionnement est souvent associé à un blocage de L6 qui est, elle, liée à la vessie. Concernant la L3, une altération de sa biomécanique, entraîne des maladies diarrhéiques et des troubles du ligament rotulien. Enfin, un dysfonctionnement de la vertèbre L4 engendre une rotation des jarrets en fin de propulsion, tandis que celui de L6 est associé à des rétentions urinaires et, chez les juments, à une cervicite favorisant les infections. Cette dernière vertèbre, souvent bloquée en flexion, induit une tendance du cheval à se désunir au galop.

Pour évaluer la mobilité des vertèbres en flexion chez le cheval, l'ostéopathe place sa main droite comme précédemment et sa main gauche sur la ligne blanche, à la verticale de la première. Le pouce et le majeur de la main gauche permettent alors de déclencher la contraction des abdominaux qui vont fléchir le dos. L'extension des vertèbres s'examine en posant l'index, le majeur et l'annulaire de la main droite sur trois apophyses épineuses successives. Si la 6^{ème} lombaire est ventralisée, son

extension est impossible, le sacrum étant dorsal à sa position (Eser, Prudhomme 2013; Giniaux 1992).

Lors de l'évaluation de la rotation et de la flexion latérale, les apophyses épineuses sont saisies entre le pouce et l'index, comme lors de l'évaluation des premières vertèbres thoraciques. Cette méthode est illustrée par la figure suivante.

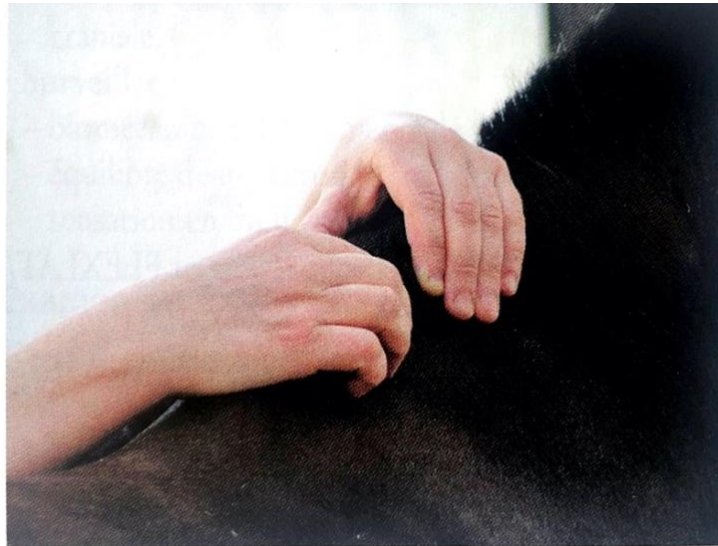


Figure 34 : position des mains de l'ostéopathe pour tester la flexion et la rotation des vertèbres thoracique (Eser, Prudhomme 2013)

En plus de la justesse de la biomécanique, l'ostéopathe cherchera à détecter tout spasme ou douleur (Eser, Prudhomme 2013; Giniaux 1992).

3.3.3.3. Test du sacrum

Le sacrum est une pièce anatomique dont la biomécanique est facilement altérée chez les équidés. L'origine de ce dysfonctionnement est souvent traumatique et parfois très ancienne. Elle peut être causée par une chute, un faux mouvement ou bien un épisode où le cheval aurait tiré au renard. En effet, l'étirement excessif de la nuque est alors transmis au sacrum par la dure-mère. Lorsque le sacrum se bloque, il entraîne une traction de certains ligaments du bassin, ce qui engendre des contractures musculaires. Les nerfs sciatiques, cruraux et honteux, qui passent dans ces muscles, sont alors comprimés. Les chevaux peuvent alors souffrir de difficultés d'incurvation du côté opposé à la névralgie, de pneumovagin ou bien de paralysie du rectum en lien avec un altération des informations issues du système nerveux autonome. De plus, le sacrum a un rôle fondamental de transmission des forces des postérieurs à la colonne vertébrale. L'ensemble de la locomotion devient alors dissymétrique et les mouvements nécessitant une inclinaison du bassin sont plus difficiles à réaliser. Les chevaux ayant un sacrum bloqué ont par ailleurs très fréquemment un port de queue latéralisé.

L'examen du sacrum se réalise principalement par écoute fluïdique (MRP) ou par mobilisation de la base et de l'apex du sacrum, en plaçant une main dans le plan sagittal. L'objectif est de sentir la direction vers laquelle la main est attirée ou bien la direction vers laquelle le mouvement est restreint. Il est possible de donner une légère impulsion ventrale ou latérale au sacrum, afin d'évaluer sa mobilité et de percevoir l'amplitude de ses mouvements. Lors de l'examen du sacrum, il faut être vigilant à sa biomécanique et à la symétrie des amplitudes de mouvement. De plus, la

fluidité du rythme lombosacré et la recherche d'un soulèvement de la vertèbre L6 sont importants à noter. La jonction sacrococcygienne s'évalue en posant une main sur celle-ci pendant que la seconde main saisit la queue, le plus proximale possible, en la mobilisant dans toutes les directions. Lors de ce test, le tonus de la queue est à évaluer en plus de la symétrie d'amplitude et de la recherche de douleur (Eser, Prudhomme 2013; Giniaux 1992).

3.3.3.4. Test des coxaux

La recherche d'altération de la flexion ou de l'extension des coxaux est réalisable de différentes façons. Il est possible de mettre une main en écoute sur chaque tubérosité ischiatique et d'observer le sens de leur déviation, en donnant une petite impulsion ventrale. Une autre approche, par exemple pour le côté gauche, consiste à poser la main droite caudalement sur la tubérosité ischiatique et la main gauche sur la tubérosité coxale gauche. La transmission d'une impulsion dorsale à la tubérosité coxale et une ventrale à la tubérosité ischiatique, permet alors de déduire la direction que prend le pelvis. En donnant ensuite une impulsion craniale à l'ischion et dorsale à la tubérosité coxale, il est possible de provoquer une flexion latérale gauche associée à une rotation homolatérale. Enfin, il est possible comme illustré ci-dessous, de transmettre une impulsion ventrale à la tubérosité coxale afin de noter la direction et l'amplitude du mouvement généré. Lors de l'appréciation de la biomécanique des coxaux, l'ostéopathe évaluera sa justesse et symétrie. L'absence de douleur est également un critère important (Eser, Prudhomme 2013).



Figure 35 : positionnement de l'ostéopathe pour tester la mobilité des coxaux (Isabelle Burgaud)

La symétrie du pelvis par rapport à la colonne vertébrale doit aussi être étudiée. Pour cela, depuis la gauche du cheval, le pouce et l'index de la main droite sont placés sur les tubérosités sacrées, tandis que la main gauche caresse du bout des doigts le sommet des processus épineux lombaires en direction caudale, jusqu'à se trouver entre les tubérosités sacrées. Si la structure est équilibrée, les doigts de la main gauche passent au centre de ceux de la main droite.

L'articulation sacro-iliaque joue un rôle d'amortisseur et de transmission élastique des forces. En cas de dysfonctionnement, cette fonction n'est plus correctement assurée, les mouvements de flexion et de torsion des lombaires et du bassin sont limités. L'ostéopathe peut, via certaines techniques, tester spécifiquement cette articulation afin d'évaluer la symétrie de la biomécanique. Cependant, il est également possible de déduire la présence ou non de restriction de mobilité de cette articulation en évaluant préalablement le sacrum et les coxaux. En l'absence de dysfonctionnement, la liberté de l'articulation sacro-iliaque ne sera pas entravée. Dans le cas contraire, il faudra traiter ce dernier (Eser, Prudhomme 2013).

3.4. APPROCHE THERAPEUTIQUE

L'ostéopathie permet de nombreuses manipulations thérapeutiques. La plupart de celles utilisées chez le cheval sont regroupées en quatre systèmes thérapeutiques.

3.4.1. Techniques structurelles

L'ostéopathie structurelle, mise au point par Andrew Taylor Still, est essentiellement fondée sur la biomécanique et repose sur la manipulation des articulations. Mécaniquement, la libération des blocages articulaires et ligamentaires permet de rétablir la circulation des fluides, qui libèrera alors les fonctions. Ce modèle inclut également des techniques spécifiques réservées aux muscles et fascias, dans la mesure où ces derniers lient les différents segments osseux et participent à la mobilité du corps. Certaines techniques de décontraction musculaires sont effectuées dans un premier temps afin de détendre les structures et faciliter leurs mouvements. Les manipulations structurelles mises en place ensuite, n'en sont que plus efficaces. Ces techniques et leurs utilisations sont décrites en annexe (Eser, Prudhomme 2013; Giusti, American Association of Colleges of Osteopathic Medicine, Educational Council on Osteopathic Principles 2017).

Les techniques structurelles peuvent se pratiquer selon une méthode directe ou indirecte, en référence aux barrières motrices. En cas de méthode directe, la structure est mobilisée en direction de la barrière pathologique. À l'inverse, lors d'utilisation de la méthode indirecte, la structure est mobilisée dans la direction opposée, c'est-à-dire dans la direction où le mouvement est le plus facile. La première méthode s'effectue en trois temps successifs, dont il faut respecter la chronologie : relâcher la pression présente au niveau de l'articulation, puis étirer cette dernière le long de son axe jusqu'à ce que la capsule soit tendue et finir par un étirement bref et rapide, perpendiculaire à l'axe du mouvement imposé à la capsule articulaire. Cette technique est adaptée aux lésions aiguës non compensées par des dysfonctionnements secondaires.

La méthode indirecte consiste à étirer la lésion dans sa direction de prédilection jusqu'à ce que la structure soit relâchée. C'est un mouvement plus doux et progressif. Il est intéressant de l'accompagner pendant quelques cycles du rythme crâniosacré. Cette technique est intéressante en cas de lésion chronique associée à des dysfonctionnement secondaires.

Une autre méthode structurelle appliquée aux équidés est la compression-traction. Il s'agit de renforcer la compression de l'articulation sur son axe, puis de la libérer afin d'atteindre son relâchement. Cette technique peut être utilisée pour réaliser une traction de l'ensemble de la colonne vertébrale et des articulations sacro-iliaques. Pour cela, l'ostéopathe, positionné à l'arrière du cheval, place ses mains sur les coxaux et exerce une traction jusqu'à percevoir un relâchement. Il est également possible de réaliser une traction de la jonction thoraco-lombaire en plaçant, depuis le côté gauche du cheval, la main droite derrière la dernière côte du cheval et la main gauche cranialement sur la tubérosité coxale. L'objectif est alors d'écartier les mains l'une de l'autre pour mettre en tension les tissus jusqu'à ce qu'ils se décontractent (Eser, Prudhomme 2013; Lutz 2004).

3.4.2. Ostéopathie fasciale

Le fascia est un tissu conjonctif qui lie entre eux les organes, les os, les muscles, les vaisseaux et les nerfs. Il est le support de la continuité de l'organisme ce qui lui confère une importance particulière en ostéopathie. En 1902, A. T. Still écrivait : « *Fascia is the place to look for the cause of disease and the place to consult and begin the action of remedies in all diseases. By its action we live and by its failure we die. The fascia is the ground in which all causes of death do the destruction of life* »

(« Le fascia représente la zone où rechercher la cause de la maladie et celle à consulter, afin de commencer à passer à l'action, pour trouver les remèdes à toutes les maladies. Par son action nous vivons et par son échec nous mourons. Le fascia est le terrain dans lequel toutes les causes de mort conduisent à la destruction de la vie » [traduction libre]).

La composition et l'épaisseur du fascia varient en fonction de sa localisation et de sa fonction. Le fascia superficiel est lâche et très hydraté alors que celui plus profond, le plus proche de la structure somatique ou du viscère, est fibreux. Il est constitué de plusieurs couches de fibres de collagènes, séparées par du tissu conjonctif lâche. Ce dernier, richement vascularisé, innervé par le système nerveux autonome, participe à la proprioception grâce aux corpuscules de Ruffini et de Pacini. Les fascias participeraient également à la stabilité articulaire, à la coordination et à la nociception.

L'objectif des techniques myofasciales est d'améliorer les capacités d'adaptation des fascias et des tendons, par leur relâchement et par la décongestion des tissus. Le principe de cette approche par la libération myofasciale, est proche de la technique structurelle indirecte. Il s'agit d'étirer ou de comprimer les fascias dans le sens de la restriction jusqu'à la barrière élastique. Chez l'homme, un relâchement s'opère alors après 60 à 120 secondes dans cette position. Cette durée, d'après l'expérience des ostéopathes, est beaucoup plus brève chez le cheval. L'efficacité de cette méthode reposerait sur une réorganisation et une modification du métabolisme des fibroblastes ainsi que sur une libération de la contrainte exercée sur les nerfs passant entre les couches de tissu fibreux (Tozzi 2012; Bordoni, Bordoni 2015; Bordoni, Zanier 2015).

3.4.3. Ostéopathie viscérale

Les organes sont naturellement mobiles ; leur fixité relative ne tient qu'à des points précis étudiés en anatomie. Tout comme une dysfonction du système locomoteur serait à l'origine de dysfonctionnements secondaires, une altération de la mobilité de ces organes pourrait engendrer, entretenir ou amplifier une dysfonction musculo-squelettique ou organique. En effet, d'après Cayre en 2008, la neuro-anatomie et la neuro-physiologie établissent un lien entre biomécanique vertébrale et fonctionnement viscéral via le système nerveux autonome. Les interactions se manifestent par des réflexes classés en quatre catégories : somato-viscéral, viscéro-viscéral et de deux types viscéro-somatiques. Le principe des deux premiers consiste à appliquer un stimulus sur un organe ou un viscère afin d'engendrer la vasoconstriction d'un autre organe ou viscère. L'origine du réflexe de type viscéro-somatique peut être neurologique ou gravitationnel. Dans le premier cas, c'est l'augmentation des afférences excitatrices, issues d'un viscère en dysfonction, qui serait à l'origine d'un état de facilitation neuronale et d'une hypertonicité prolongée de la structure somatique liée. Lorsque l'origine du réflexe viscéro-somatique est gravitationnelle, c'est la modification de la position et de la mobilité de l'organe, souvent liée à une altération de la perfusion, qui est à l'origine d'une tension non physiologique transmise aux structures par les fascias (Cayre 2008).

L'objectif de ce système thérapeutique est de libérer de leur tension les suspensions conjonctives, vasculaires et nerveuses des viscères, afin de normaliser la mobilité des organes internes et de rétablir un fonctionnement harmonieux. Du fait de la présence de la cage thoracique, les organes abdominaux, palpables, sont principalement concernés. Cette méthode est particulièrement indiquée en cas d'atteinte organique ou d'inflammation intra-abdominale. Cependant, sa fiabilité et son efficacité demeurent aujourd'hui non prouvées. De plus, elle devra être adaptée pour être appliquée au cheval. En effet, l'abdomen des équidés est très profond et sa paroi très ferme. Le

diagnostic et le traitement passent donc pas des méthodes d'écoute et des étirements particuliers (Guillaud et al. 2018; Eser, Prudhomme 2013).

3.4.4. Ostéopathie crâniosacrée

L'ostéopathie crâniosacrée est fondée sur le rétablissement harmonieux du flux rythmique du liquide céphalorachidien, le plus souvent appelé mouvement respiratoire primaire. Ce système thérapeutique s'intéresse à trois dimensions : le plan osseux qui inclut les fibres osseuses et le tissu conjonctif interstructural qui relie les os, le plan membraneux des méninges et enfin le plan liquidien constitué des artères, des sinus veineux, des ventricules cérébraux et du liquide cérébrospinal. Les mécanismes physiologiques, la fiabilité et l'efficacité de cette approche demeurent aujourd'hui non démontrés. Cependant, l'essence de l'ostéopathie crâniosacrée, fondée sur la perception d'un mouvement rythmique liée à la vie, est utilisée par de nombreux ostéopathes. Ainsi, Mikail et al. en 2019, observent les thermogrammes des antérieurs d'un cheval traité à l'aide de cette méthode, pendant le traitement et 30 minutes après ce dernier. Ils mettent en évidence une augmentation de 8,6 °C de la température cutanée des antérieurs du cheval, de l'extrémité proximale à l'extrémité distale. Cette évolution permet aux auteurs de suggérer une hypothèse par suite de l'observation de ce phénomène : la diminution du tonus du système nerveux autonome intervenu après le traitement aurait permis d'annihiler la vasoconstriction initialement présente dans les membres.

L'objectif est de réduire les tensions présentes autour du système nerveux. D'après l'ouvrage d'Eser en 2013, il existe quatre techniques spécifiques.

La première est appelée « *unwinding* », une méthode conditionnée par la coopération du cheval qui repose sur la mémoire cellulaire de ce dernier. L'ostéopathe exerce une pression douce suffisante pour faire bouger la structure atteinte et l'accompagner dans son dysfonctionnement. Elle permet au souvenir traumatisant de remonter via la mémoire cellulaire, amenant le cheval à reprendre la position à l'origine de l'état douloureux et ainsi à libérer ses tensions et relâcher son corps. Cette méthode peut notamment être appliquée en cas de lésions chroniques et complexes.

Une seconde technique, nommée « *still point* », s'intéresse au rythme crâniosacré. L'objectif est d'accompagner le mouvement respiratoire primaire en flexion extension ou en latéroflexion et rotation homolatérale dans la direction dans laquelle le mouvement est le plus facile. Le but est d'accompagner le mouvement dans sa plus grande amplitude avant de le bloquer fermement quelques instants. Il est possible de devoir répéter la manœuvre et que le rythme crâniosacré deviennent irrégulier au début, ce qui peut inquiéter le cheval. Un fois le still point atteint, le cheval se relâche et le rythme crâniosacré reprend progressivement. Cette méthode est aussi applicable pour les lésions anciennes et multiples.

La troisième méthode a également pour objectif d'atteindre le still point en comprimant le quatrième ventricule. Il s'agit de maintenir les processus paracondylaires en rotation interne après avoir accompagné leurs mouvements de rotation jusqu'à atteindre le dit still point. Cet état en rotation interne entrave le retour lymphatique, ce qui augmente progressivement la pression intracrânienne. Au-delà d'un certain niveau, la pression relâche les blocages des attaches, reliant les différents os crâniens et du sacrum. Le rythme crâniosacré peut alors progressivement reprendre, accompagné par l'ostéopathe jusqu'au point d'équilibre. Afin que la lymphe accumulée en excès puisse être drainée, il faut préalablement avoir libéré l'entrée de la poitrine. Cette méthode est indiquée en cas de dysfonction des sutures crâniennes ou du sacrum, de stimulation anormale des nerfs crâniens, de problèmes lymphatiques ou métaboliques, ou encore d'altération du mouvement respiratoire primaire. En revanche, elle est contraindiquée à partir du 8ème mois de gestation ou en cas de lésion récente au niveau de la tête, notamment en cas de trouble vasculaire cérébral.

La dernière méthode, dite manchon duremérien, tend à libérer la dure-mère de ses tensions et rétablir le rythme crâniocervical. Idéalement, le thérapeute place ses mains en écoute, la première sur la crête nucale et la seconde sur le sacrum. Si le cheval est grand, le garrot peut servir de relais. Le flux du liquide céphalospinal ressenti doit alors être régulier. Il est possible de donner une petite impulsion dans le sens du mouvement afin de mieux identifier les altérations du flux cérébrospinal. Lorsque le lieu de la perturbation du flux est identifié, il convient de placer les mains en amont et en aval du dysfonctionnement, puis d'accompagner le mouvement respiratoire primaire avant de le maintenir en flexion. Le mouvement est ensuite repris progressivement à mesure que la dure-mère se détend (Eser, Prudhomme 2013).

3.5. CONCLUSION

L'ostéopathie est une médecine manuelle dont l'essor est récent. C'est la philosophie de son fondateur, articulée autour de quatre principes fondamentaux, qui regroupe les différentes approches pratiques, propres à chaque patient et à chaque ostéopathe. Aujourd'hui, un réel engouement pour cette thérapie se développe en parallèle de l'émergence de l'« *evidence based medicine* » (« *médecine basée sur les preuves* ») dans le monde scientifique. Sa progression, initialement très empirique, suscite un intérêt qui motive la réalisation d'études scientifiques.

DEUXIÈME PARTIE : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

1. Introduction

Cette présente étude a été réalisée au sein de l'Institut Français du Cheval et de l'Équitation (IFCE), en collaboration avec la clinique vétérinaire du prestigieux Cadre Noir de Saumur, site conservatoire de l'équitation de tradition française inscrit au patrimoine culturel immatériel de l'humanité de l'UNESCO depuis 2011. Domaine historiquement militaire, cette institution rattachée aux haras nationaux participe au rayonnement français. L'institution propose d'une part des spectacles d'équitation traditionnelle au grand public et d'autre part, participe aux compétitions équestres. A titre d'exemple, Thibaut Valette 38^{ème} écuyer en chef, décroche aux Jeux Olympiques de 2016, la médaille d'or par équipe en concours complet. Le Cadre Noir de Saumur est également réputé pour ses deux autres fonctions : la recherche autour du cheval et des sports équestres, ainsi que la formation des professionnels de la filière. Il dispose de surcroît d'un centre documentaire exceptionnel, composés de livres consultables par tous sur site mais aussi d'une banque d'articles en ligne et de conférences digitales destinées au grand public (Le Cadre Noir IFCE 2014).

Pour satisfaire ses diverses activités, l'institution bénéficie d'un site de 140 hectares composé de 4 écuries, 18 carrières, 7 manèges accompagnés de pistes aménagées et de terrains de cross, ainsi que d'une médiathèque et des salles dédiées à l'instruction. Le Cadre Noir peut héberger environ 500 chevaux, il en possède approximativement 350. Ces derniers répondent à trois vocations principales : l'instruction équestre, la représentation pour des spectacles et le sport équestre de haut niveau. Concernant le personnel, une soixantaine de palefreniers soigneurs, 5 maréchaux ferrants, 3 vétérinaires et 2 infirmiers travaillent au service du bien-être et de la performance des équidés (Le Cadre Noir IFCE 2014). C'est avec le soutien d'Isabelle Burgaud, vétérinaire-ostéopathe férue de médecines alternatives, que s'est déroulée la partie expérimentale de cette thèse.

Cette thèse a pour objectif d'évaluer l'impact de l'ostéopathie sur la perfusion des tissus du cheval, mis en perspective de la règle artérielle, l'un des concepts fondateurs de l'ostéopathie. Pour étudier ce phénomène, le choix de la région anatomique s'est porté sur le dos, en raison du rôle de charnière qu'il remplit chez le cheval, notamment dans la transmission de l'énergie générée par les postérieurs à l'avant main et de sa proximité avec le système nerveux. Les dorsalgies sont fréquemment rencontrées chez les chevaux de sport et les chevaux du Cadre Noir ne font pas exception. La probabilité de trouver des anomalies thermiques dorsales est donc importante. Dans ce contexte, l'expérimentation menée sur la stabilité dans le temps des asymétries thermiques observées sur les thermogrammes, doit permettre de tirer des conclusions sur l'efficacité de la pratique de l'ostéopathie pour traiter durablement ces anomalies thermiques.

2. Matériel et méthodes

2.1. POPULATION

Le protocole a été approuvée par Valène Prunier, l'experte référente en conception de procédures expérimentales du site du Cadre Noir. L'inclusion des chevaux dans l'expérimentation a également été soumise au consentement préalable des cavaliers détenteurs.

Les 26 chevaux inclus dans le périmètre de l'étude sont des adultes de 6 à 21 ans débouffés, résidant sur le site du Cadre Noir dans des conditions similaires. L'expérimentation s'est déroulée du 28 juin au 16 juillet 2021. Il s'agit de chevaux de représentation, de sport ou bien d'instruction, pratiquant l'une des trois disciplines olympiques, en bonne santé apparente.

Les chevaux présentant une boiterie, un problème mécanique ou une lésion cutanée dans la région dorsale sont exclus de l'étude. En revanche, la présence d'une dorsalgie ancienne et maîtrisée n'entre pas dans le champ des exclusions.

2.2. MATERIEL

2.2.1. Description de l'environnement des prises de mesure

Les chevaux examinés sont localisés dans une rangée de quatre box mitoyens avec litières en copeaux. Ces boxes permettent d'accéder d'un côté à l'extérieur et de l'autre, par une porte coulissante, dans un couloir intérieur attenant à la clinique vétérinaire. Les portes et volets extérieurs, majoritairement en bois, sont fermés. L'ajour situé en hauteur est occulté avec du carton afin de faire obstruction aux rayons du soleil. La photo ci-après en propose une représentation. Pour limiter le stress des chevaux et assurer leur bien-être, de l'eau et du foin sont à leur disposition dans les box.



Figure 36 : intérieur d'un box utilisé lors de l'expérimentation (©B. Lemaire)

2.2.2. Le système de thermographie

Le matériel utilisé est une caméra FLIR T540. Sa résolution est de 464 x 348 pixels et sa plage de températures s'étend de -20 à 120 °C. La sensibilité de la caméra est de 0,03 °C et son exactitude est de 2 °C ou bien 2 % de la valeur mesurée. L'objectif de cette étude étant de mesurer une différence de température entre 2 points sur un même photo, la sensibilité de la caméra est un facteur fondamental. À chaque thermogramme enregistré, la caméra fait correspondre une image numérique à l'aide d'un objectif de 5 mégapixels.

2.3. METHODE

2.3.1. Préambule

L'ostéopathie est une thérapie personnalisée : elle nécessite par nature d'apporter une réponse individualisée à chaque dysfonctionnement, qui trouve sa source dans une chaîne dysfonctionnelle spécifique à chaque individu. Pour cette raison, face à l'impossibilité en ostéopathie de définir un protocole de traitement ostéopathique systématique, chaque cheval sera considéré comme son propre témoin.

2.3.2. Conditions de réalisation

L'expérimentation a consisté à prendre un cliché thermographique avant une séance d'ostéopathie, pour le comparer à ceux pris après cette même séance.

Un protocole strict est respecté avant chaque cliché. Ce dernier s'étant déroulé au cours du mois de juillet, les chevaux ont un poil naturellement court ; ils ne sont ni tondus ni couverts. La température ambiante des box est monitorée à l'aide d'un thermomètre extérieur analogique. Au plus haut, cette dernière atteint 28 °C. L'écurie n'est pas chauffée et le flux d'air est lié à une ventilation passive.

Les chevaux sont reçus dans les box d'expérimentation au minimum trois heures après leur dernier travail ; leur propreté est vérifiée. Ils sont installés dans les box fermés pour couper tout rayon du soleil ou courant d'air. Une période d'acclimatation de 40 minutes leur est accordée à partir de leur arrivée. Cette période est allongée à une heure pour les cas ayant nécessité un pansage léger. A l'issue de ce délai, le thermogramme est enregistré.

L'enchaînement des clichés a été décidé de sorte que chaque cheval soit son propre témoin. Ainsi, un premier cliché a été enregistré après la première période d'acclimatation, immédiatement avant la séance d'ostéopathie pour le groupe des chevaux traités. A la suite du traitement, deux séries d'images sont prises en vue d'évaluer les bénéfices de la séance, à court terme comme à moyen terme soit 2 heures et 7 jours après le traitement.

A court terme, un délai de deux heures est fixé entre la fin de la manipulation et la prise du cliché, le temps que la perfusion vasculaire puisse se remettre en place et que toute trace du contact des mains de l'ostéopathe sur la peau du cheval soit gommée. Pour les chevaux stressés au cours des 2 heures d'attente, la porte intérieure a été ouverte et remplacée par une tenture de box pendant 1h20, soit jusqu'au démarrage de la seconde période d'acclimatation.

A moyen terme, il a été considéré qu'une période d'une semaine entre le premier cliché et le dernier représente un bon compromis pour la fiabilité de l'expérimentation : il permet à la fois à l'organisme de répondre au traitement, sans pour autant que ne s'installent de nouvelles dysfonctions majeures. De plus, dans la littérature, la répétabilité des clichés thermographiques est démontrée sur 7 jours.

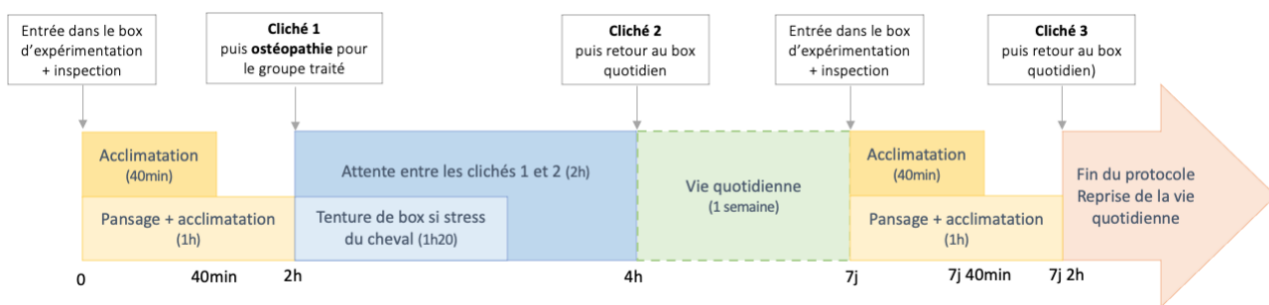


Figure 37 : frise chronologique illustrant le déroulement du protocole

2.3.3. Prise d'images

Pour que les résultats de l'expérimentation soient interprétables, les clichés thermographiques doivent tenir compte de paramètres de manipulation bien définis. Le dos du cheval doit occuper 75 % de la surface totale du visuel, du garrot à la queue. De plus, la caméra doit être la plus orthogonale possible au dos du cheval. Pour cela, le photographe se positionne debout sur la mangeoire du box, elle-même positionnée à 1 mètre du sol dans l'axe du cheval, afin de prendre de la hauteur et d'atteindre le taux d'occupation de l'image souhaité. Le cheval, tenu à la tête, est à l'arrêt au carré, d'aplomb et droit, à environ 1 mètre devant l'opérateur.



Figure 38 : exemple de réalisation d'un cliché (©B. Lemaire)

2.3.4. Analyse des images

La **température dite seuil** est la différence de température à partir de laquelle on considère qu'il y a une asymétrie. Elle a été arbitrairement fixée à 0,5 °C selon trois facteurs : la littérature (Boichot 2020), les caractéristiques techniques de la caméra et le ressenti de l'opérateur.

Les images sont analysées par une seule personne à l'aide du logiciel Flirtool® fourni avec la caméra. Pour faciliter le repérage des asymétries, le thermogramme est représenté par zones de couleurs issues de la palette de l'arc en ciel HC. L'amplitude totale de l'échelle de température étudiée est fixée à 10° C. Il est possible de faire varier cette valeur afin de modifier les contrastes et de distinguer plus clairement les asymétries. Lorsque deux surfaces symétriques n'apparaissent pas de la même couleur de part et d'autre de la colonne vertébrale, l'hypothèse d'une asymétrie thermique est

posée. La température de cette surface est alors repérée à l'aide d'une ligne, d'un cercle ou d'une ellipse ; la longueur minimale du diamètre ou du petit axe de l'ellipse est établie à quatre bolomètres. Pour chaque ligne, cercle ou ellipse, le logiciel incrémente dans un tableau les températures minimales, moyennes et maximales mesurées. C'est la température moyenne qui est utilisée pour déterminer une éventuelle différence de température supérieure ou égale à 0,5 °C. Enfin, afin de latéraliser les asymétries, les points impairs sont placés du côté gauche du cheval et les points pairs du côté droit. Le thermogramme ci-dessous permet de visualiser un exemple réalisé au cours de l'expérimentation :

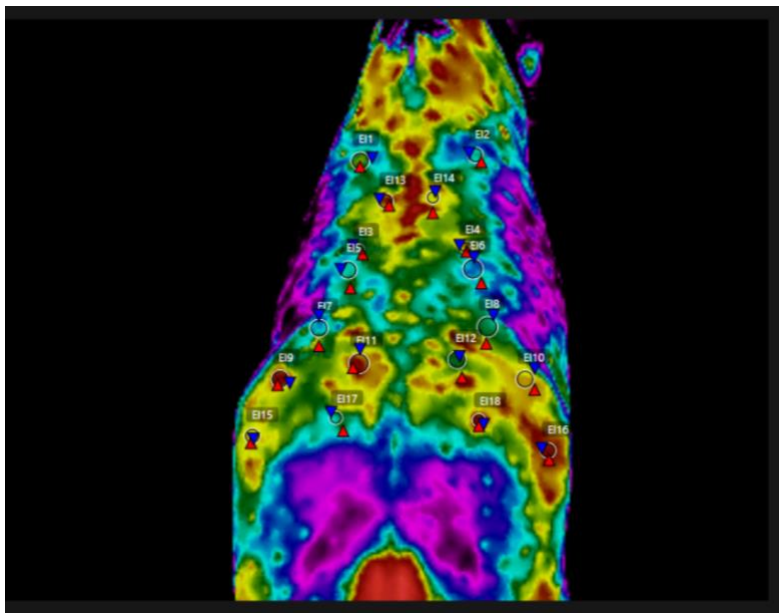


Figure 39 : exemple du thermogramme d'un cheval de l'étudié

Les points mesurés sont spécifiquement déterminés pour chaque individu. D'un cliché à l'autre, il est nécessaire de repositionner les points au même endroit, par repérage anatomique. Le thermogramme du cheval étant répétable pendant sept jours (Tunley, Henson 2004), les asymétries encore présentes sont facilement identifiables. Pour faciliter et améliorer la précision du positionnement des points, T4, T18, C1 et les tubérosités coxales sont marquées avec de la peinture blanche froide sur un second thermogramme, méthode qui permet de retrouver plus facilement les différents repères anatomiques.

Enfin, le cas échéant, les points des nouveaux clichés sont reportés sur les clichés précédents du même cheval. Ainsi, une fois les prises de clichés terminées, les thermogrammes des chevaux comportent tous le même nombre de points.

Pour chacun d'entre eux et pour chaque cliché, les valeurs moyennes de chaque aire sont reportées dans un tableau Excel. Les différences de températures y sont ensuite calculées, ainsi que l'évolution des différences de température entre les clichés 1 et 2, puis 2 et 3 et enfin 1 et 3. Ainsi, les points sont comparés uniquement à leur symétrique par rapport à la colonne vertébrale. D'un cliché à l'autre, seule la différence de température est interprétée et ce pour chaque point individuellement. On considère qu'une asymétrie est présente si la différence de température est supérieure ou égale à la température seuil. Le tableau ci-après illustre un exemple de recueil des données obtenues grâce au thermogramme à partir des clichés d'un cheval. La valeur de chaque asymétrie est calculée, définie par la différence de température entre les points mesurés à gauche et à droite de la colonne vertébrale. L'écart de température entre 2 clichés pour chaque asymétrie est également déterminé.

	Température moyenne mesurée		
Point	Cliché 1	Cliché 2	Cliché 3
E1	31,5	30,7	30,9
E2	30,8	30	30,3
E3	31,3	30,7	30,6
E4	30,4	30	29,5
E5	31,1	30,6	30,1
E6	30,5	29,7	29,4
E7	31,6	30,2	30,1
E8	30,7	30	29,3
E9	30,4	29,5	29,4
E10	29,8	29,1	28,9
E11	31,5	30,6	31
E12	30,5	30,1	29,5
	Différence de température (droite-gauche)		
Asymétrie	Cliché 1	Cliché 2	Cliché 3
Δ E2-E1	-0,7	-0,7	-0,6
Δ E4-E3	-0,9	-0,7	-1,1
Δ E6-E5	-0,6	-0,9	-0,7
Δ E8-E7	-0,9	-0,2	-0,8
Δ E10-E9	-0,6	-0,4	-0,5
Δ E12-E11	-1	-0,5	-1,5
	Evolution de la différence de température entre les clichés :		
Asymétrie	Cliché 1->2	Cliché 2->3	Cliché 1->3
Δ E2-E1	0	0,1	0,1
Δ E4-E3	0,2	-0,4	-0,2
Δ E6-E5	-0,3	0,2	-0,1
Δ E8-E7	0,7	-0,6	0,1
Δ E10-E9	0,2	-0,1	0,1

Tableau 3 : exemple du relevé des températures du thermogramme d'un cheval

2.4. ANALYSE DES DONNEES

2.4.1. Analyse descriptive

Une analyse descriptive est tout d'abord menée. Les données recueillies dans un premier fichier Excel® (version 16.57) sont traitées avec Python® (version 3.10.2). Pour chaque cheval et entre chaque série de clichés, le code a permis d'extraire les asymétries pour les dénombrer et les classer en trois catégories d'asymétries : « apparues », « maintenues » et « résolues ». Ce comptage est retranscrit dans un nouveau fichier Excel, à partir duquel les paramètres statistiques descriptifs ont été calculés.

2.4.2. Analyse multivariée

L'analyse statistique multivariée est réalisée grâce au logiciel R studio PBC® (version 2022.02.0). La variable étudiée est la présence ou l'absence d'asymétries sur un cliché, au niveau d'un point sur un cheval du lot témoin ou traité.

On cherche à déterminer l'impact de deux facteurs : la pratique d'un traitement ostéopathique et le moment de la prise du cliché (1, 2 ou 3). Par nature, l'ensemble de ces variables sont indépendantes les unes des autres. Deux autres facteurs résiduels peuvent interférer, l'individualité de chaque cheval et celle de chaque point. Il s'agit donc de modéliser la réponse d'une population à partir de réponses individuelles à un évènement, en mesurant une variable qualitative à deux

modalités. Ainsi, l'utilisation d'une régression logistique, un modèle linéaire généralisé, à effet mixte semble pertinent.

La régression logistique modélise l'effet de plusieurs facteurs sur la réponse qualitative d'une variable à deux modalités. Ce modèle donne donc la probabilité de l'évènement Y, sachant que l'évènement X est réalisé. La formule obtenue est donc :

$$P_X(Y = 1) = \pi(X, \beta) \text{ Avec } \begin{array}{ll} Y & \text{Variable qualitative à deux modalités 1 ou 0} \\ X & \text{Variable explicative continue} \\ \beta & \text{Paramètre dont l'effet est étudié} \end{array}$$

Pour revenir à une expression linéaire, une fonction de lien est utilisée, en particulier ici, la fonction logistique. Son application aboutit ainsi à la formule :

$$\ln\left(\frac{P_X(Y=1)}{1-P_X(Y=1)}\right) = \beta_0 + \beta_1 X \text{ Soit } P_X(Y = 1) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 X}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 X}}$$

β_0 est nommé l'intercept et β_1 le coefficient de corrélation.

Dans le protocole mené ici, plusieurs paramètres qualitatifs interviennent. D'une part, l'effet du lot et du cliché sont examinés. D'autre part, plusieurs points sur chaque individu sont sélectionnés et chaque lot est composé de plusieurs chevaux. Ainsi, le modèle utilisé doit avoir deux niveaux : le premier niveau modélise la réponse individuelle, tandis que le second simule le comportement des paramètres pour l'ensemble de la population. La situation peut donc être représentée ainsi :

$$\dots \text{ au niveau individuel : } P_{X_i}(Y = 1) = \frac{e^{\beta_0 + \sum_{j=1}^p \beta_j X_j}}{1 + e^{\beta_0 + \sum_{j=1}^p \beta_j X_j}} + \varepsilon_{ij} \text{ avec } 1 \leq i \leq n \text{ et } 1 \leq j \leq p$$

$$\dots \text{ et au niveau de la population : } \begin{cases} \alpha_i = \alpha + a_i \\ \beta_{1i} = \beta_1 + b_{1i} \\ \beta_{2i} = \beta_2 + b_{2i} \\ \dots \end{cases}$$

Les coefficients α , β_1 et β_2 modélisent les effets fixes. C'est leur effet sur la population qui est étudié. A l'inverse, les coefficients a_i , b_{1i} , b_{2i} simulent les effets aléatoires. ε_{ijk} sont les résidus indépendants.

De même que lorsqu'il y a un seul paramètre β , β_0 est nommé intercept et les β_i coefficients de corrélation des variables explicatives X_i .

Les coefficients β_i calculés sont accompagnés d'une z-value. Cette valeur correspond à la probabilité que l'hypothèse H_0 , $\beta_i = 0$ soit nulle, selon laquelle le facteur β n'influence pas l'évènement. Si cette probabilité est inférieure à 5 %, l'hypothèse H_0 peut être rejetée, ce qui permet d'affirmer que le facteur β influence la survenue de l'évènement Y.

Une fois la saisie des données opérée, un modèle statistique est déterminé pour définir une loi de probabilité. Afin de tendre vers une fiabilité prédictive optimisée qui restitue des résultats au plus proche de la situation observée, le logiciel trace une courbe sigmoïde correspondant au modèle. L'abscisse du point d'inflexion d'ordonnée $P(Y = 1) = 0,5$ est considéré comme la valeur dite seuil. En deçà de cette mesure, le modèle prédira la non-réalisation de l'évènement, soit $Y = 0$. A

l'inverse, l'évènement $Y = 1$ sera considéré comme réalisé, c'est-à-dire que le modèle considèrera qu'il y a une différence de température supérieure ou égale à $0,5\text{ °C}$ et donc une asymétrie thermique. Le modèle renvoie donc les résultats d'une situation qu'il a estimé d'après la loi de probabilité définie à partir des résultats de l'expérimentation.

C'est ainsi que les résultats estimés par le modèle statistique sont comparés aux résultats mesurés réels dans le protocole. Ces valeurs sont résumées dans un tableau à double entrée, dit de contingence, avec :

- A : le nombre d'évènements $Y = 0$ estimés par le modèle et mesurés lors du protocole,
- B : le nombre d'évènements $Y = 0$ estimés par le modèle alors que l'évènement $Y = 1$ est mesuré lors du protocole,
- C : le nombre d'évènements $Y = 1$ estimés par le modèle alors que l'évènement $Y = 0$ est mesuré lors du protocole,
- D : le nombre d'évènements $Y=1$ estimés par le modèle et mesuré lors du protocole.

		Évènements prédits d'après le modèle statistique	
		Y=0	Y=1
Évènements mesurés dans le protocole	Y=0	A	C
	Y=1	B	D

Tableau 4 : tableau de contingence comparant les prédictions du modèle à la réalisation des évènements dans le protocole

La vraisemblance du modèle est évaluée en estimant l'adéquation entre les évènements prédits par la loi statistique et ceux observés dans la réalité, c'est-à-dire lors de l'expérimentation. Cette concordance est appréciée à l'aide du taux d'erreur. Il est calculé à partir du tableau de contingence, calculés en divisant le nombre d'erreur faites par le modèle (soit la somme des faux positifs et des faux négatifs) par le nombre total d'évènements. Ainsi, selon les données du tableau précédent, la formule suivante s'applique :

$$\text{Taux d'erreur} = \frac{B + C}{A + B + C + D}$$

Plus le taux d'erreur est faible, plus les prédictions du modèle statistique sont proches des résultats observés. L'objectif est donc de minimiser ce dernier, considéré comme trop élevé lorsqu'il excède 30.

De même, il est possible de calculer la sensibilité et la spécificité du test avec les formules suivantes :

$$\text{Sensibilité} = \frac{D}{B + D} \quad \text{et} \quad \text{Spécificité} = \frac{A}{A + C}$$

Il est aussi possible de recourir à une autre méthode pour évaluer l'adéquation entre le modèle statistique et la réalité, en utilisant l'aire sous courbe « Receiver Operating Characteristic », dite courbe ROC. Il s'agit de tracer le taux de vrais positifs en fonction du taux de faux négatifs. Plus l'aire se rapproche de la valeur 1, plus le modèle sera spécifique et sensible. À l'inverse, une aire proche de 0,5 témoignera d'un modèle peu discriminant. Le seuil de 0,8 est admis comme suffisant pour considérer le modèle comme satisfaisant.

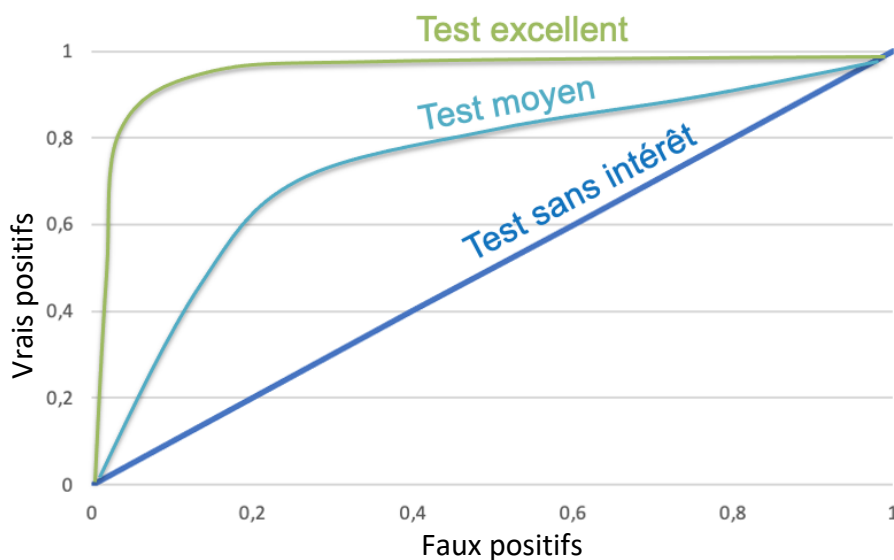


Figure 40 : différentes possibilités de courbes ROC et leur interprétation

2.4.3. Pertinence de la valeur de la température discriminante choisie dans la présentation des résultats

La pertinence du choix de 0,5 °C comme différence de température discriminante permettant de caractériser la présence ou l'absence d'une asymétrie, peut être évaluée en réitérant l'analyse statistique avec d'autres valeurs seuils. Les mêmes modèles seront utilisés et les résultats comparés entre eux. Ce sont en particulier les paramètres de qualité du modèle qui permettront d'évaluer la pertinence de la valeur de différence de température.

Afin d'obtenir une régression logistique aussi représentative de la réalité que possible, le nombre de différences de température mesurées par cheval est homogénéisé au sein de chaque lot. Avoir relevé l'intégralité des asymétries dorsales permet de considérer que tout autre différence de température mesurée sur un cheval sera inférieure à 0,5 °C. Ainsi, dans chaque lot, en ajoutant des points symétriques, le nombre de points mesurés pour chaque cheval est égal au nombre de points mesurés sur le cheval ayant le plus d'asymétries du lot. Considérons par exemple le lot T, si le cheval C1 est l'équidé ayant le plus de différences de températures mesurées N, si par ailleurs pour le cheval C2 du même lot, N-2 différences de températures sont mesurées, alors 2 mesures symétriques seront ajoutées aux résultats pour chaque cliché pris du cheval C2. Ainsi, C1 et C2 auront le même nombre N de mesures est comptabilisé. Ce principe est repris pour tous les chevaux au sein de chaque lot.

Outre l'obtention d'un nombre de points beaucoup plus important, l'homogénéité du nombre de mesures entre les différents chevaux améliore la qualité prédictive du modèle statistique choisi.

3. Résultats

3.1. DESCRIPTION DE LA POPULATION

La population étudiée se compose de 26 chevaux de selle, dont 12 témoins et 14 traités, avec une grande majorité de races Selle français et d'Hanovriens. Leur répartition est détaillée dans le graphique ci-après :

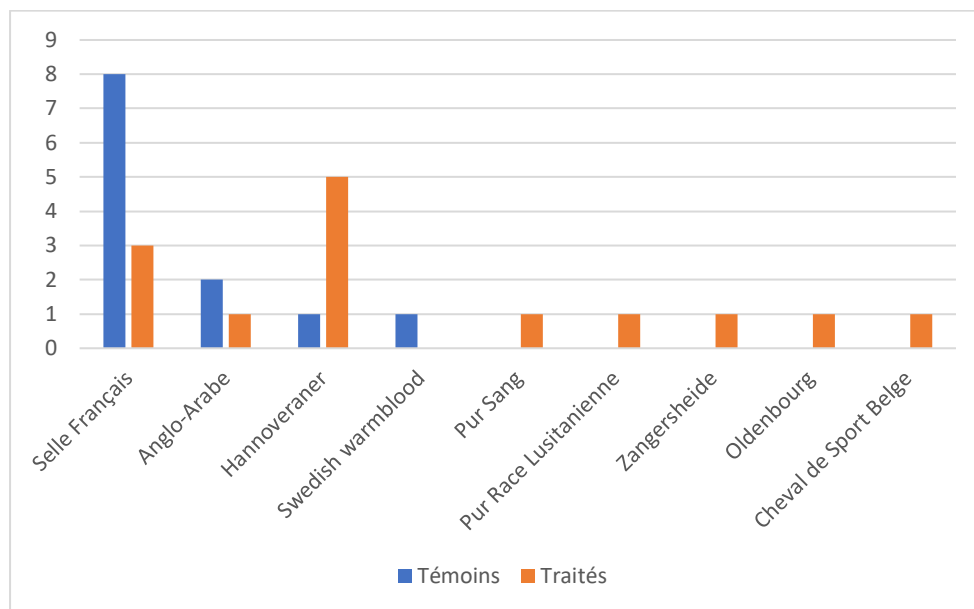


Figure 41 : répartition des chevaux traités et témoins par races

La population est intégralement composée de juments et de hongres. Ces derniers représentent 75% du groupe des témoins et seulement 57% du groupe des traités.

Les chevaux sont répartis selon 3 classes d'âge : les jeunes jusqu'à 7 ans, les adultes de 8 à 15 ans et les chevaux plus mûrs au-delà de 16 ans. La répartition des chevaux dans les groupes traités et témoins est représentée ci-après :

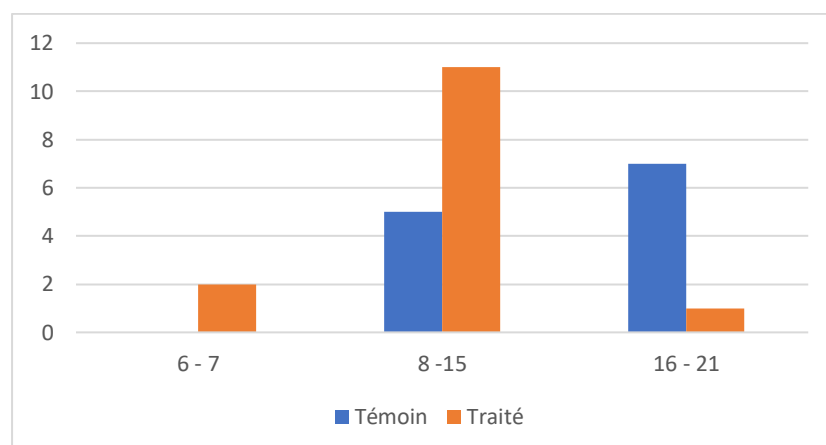


Figure 42 : répartition des chevaux traités et témoins par classes d'âges

L'âge moyen des chevaux témoins est plus élevé que celui des chevaux traités, avec une majorité d'équidés de 16 ans et plus, tandis qu'un seul cheval de cette classe d'âge appartient à la catégorie

des traités. Par ailleurs, le groupe des témoins ne dénombre aucun jeune cheval. En revanche, le graphique atteste que l'ensemble des chevaux sont des chevaux adultes encore en âge de travailler. La disparité d'âges entre les deux groupes s'explique par la qualification de leurs cavaliers et de leur utilisation : les témoins sont dédiés à l'instruction et sont la propriété du Cadre Noir de Saumur, alors que les traités sont attendus pour leurs performances et leurs activités diversifiées. Le graphique ci-après illustre ces caractéristiques :

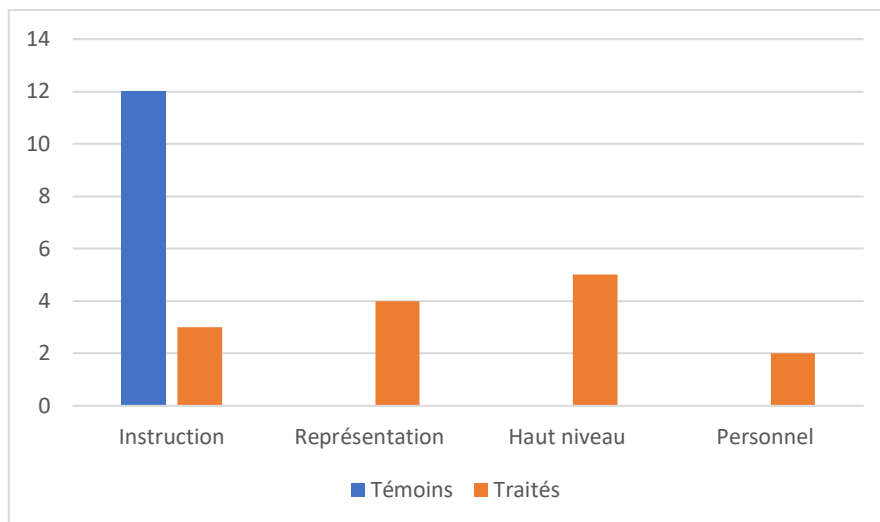


Figure 43 : répartition des chevaux traités et témoins en fonction de leur utilisation

Les disciplines pratiquées sont plus homogènes : le dressage est majoritairement représenté, suivi du complet puis du CSO.

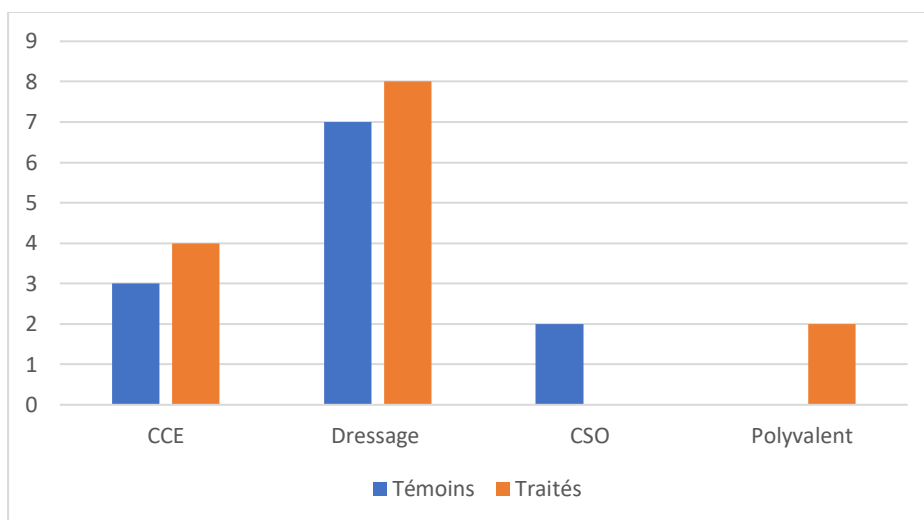


Figure 44 : répartition des chevaux traités et témoins en fonction de la discipline pratiquée

Rappelons à titre indicatif, que l'un des témoins présentant une affection au jarret a été retenu, car la région affectée est éloignée du dos, ce qui n'impacte donc pas les observations de l'étude.

Pour achever la synthèse des caractéristiques de l'échantillon, rappelons également que malgré des distances parfois inégales entre les chevaux et la mangeoire, il importait seulement que chaque individu conserve une distance constante à la mangeoire pour ses trois séries de prises de vues, afin que ses clichés soient comparables entre eux pour un cheval donné.

3.2. BILAN DES ASYMÉTRIES RELEVÉS ET DE LEURS ÉVOLUTIONS

Pour chaque cheval et entre chaque série de clichés, les asymétries, définies comme étant les différences de températures supérieures ou égales à 0,5 °C, sont dénombrées, puis discriminées entre asymétries apparues, maintenues et résolues. Elles sont regroupées dans un tableau qui synthétise les réponses individuelles des chevaux.

Un total de 349 asymétries a été relevé sur l'ensemble des 26 chevaux étudiés. Parmi elles, 144 ont concerné les chevaux témoins et 205 les chevaux traités.

Cheval	TÉMOINS					
	NOMBRE D'ASYMÉTRIES CLICHÉ 1-> 2					
	Cliché 1	Cliché 2	Résolues	Maintenues	Apparues	
C1	4	4	1	3	1	
C2	6	4	2	4	0	
C3	4	3	1	3	0	
C4	1	1	0	1	0	
C5	4	3	1	1	0	
C6	8	3	5	1	0	
C7	4	4	1	3	1	
C8	5	5	1	3	1	
C9	2	1	1	0	0	
C10	3	3	1	2	1	
C11	3	3	0	2	0	
C12	3	4	0	2	1	

Tableau 5 : résumé de l'évolution des asymétries entre les clichés 1 et 2 pour les chevaux témoins

Les résultats concernant l'évolution des asymétries à l'échelle de la population sont résumés dans une série de trois tableaux :

- le premier traite des asymétries résolues, c'est-à-dire celles qui étaient présentes sur le premier cliché et absentes sur le suivant,
- le second concerne les asymétries maintenues, observées sur les deux clichés,
- le troisième intéresse les asymétries apparues, c'est-à-dire celles qui apparaissent pour la première fois sur le second cliché.

Chaque tableau est organisé en trois duos de lignes, concernant chacun le passage d'un cliché au suivant :

- le premier duo, 1->2, décrit l'évolution entre les deux premiers clichés du protocole,
- le second duo, 1->3, évalue l'évolution entre le premier et le dernier cliché du protocole,
- le troisième duo, 2->3, traite de l'évolution entre les deux derniers clichés du protocole,

Un duo de lignes est composé d'une ligne bleue concernant les chevaux témoins et d'une ligne verte désignant les résultats imputables au lot traité.

La première colonne du tableau recense le nombre total d'asymétries relevées entre deux clichés, par lots de chevaux. Ensuite sont successivement calculés, pour les asymétries résolues, maintenues ou apparues, le nombre d'asymétries et le pourcentage qu'elles représentent par rapport au nombre d'asymétries totales. La moyenne du nombre d'asymétries, le minimum, le maximum ainsi que la médiane sont également déterminés pour chacun des chevaux.

	Nombre total d'asymétries dans la population	ASYMÉTRIES RÉSOLUES					
		par lot		par cheval			
		Nombre d'asymétries	Poucentage	Moyenne	Minimum	Maximum	Médiane
cliché 1-> 2	44	14	31,818	1,167	0	5	1
	75	39	52,000	2,786	1	7	2,5
cliché 1->3	51	9	17,647	0,750	0	2	1
	58	22	37,931	1,571	0	4	1,5
cliché 2-> 3	49	6	12,245	0,500	0	2	0
	72	40	55,556	2,857	1	9	1,5

Tableau 6 : paramètres descriptifs de l'évolution des **asymétries résolues** selon les clichés et les lots.
Lignes bleues : lot des témoins – Lignes vertes : lot des traités

Dans les lots témoins et traités, du premier au second cliché, respectivement 32 % et 52 % d'asymétries se résolvent alors que, 7 jours plus tard, 18% et 38% parviennent à ce résultat entre le premier et le dernier cliché. Par ailleurs, entre le second et le dernier cliché, seulement 12 % des asymétries ont disparu parmi les témoins, tandis que le lot des traités dénombre 56% d'asymétries résolues au cours de cette même phase.

Pour chaque cheval témoin, 0 à 5 asymétries se dissipent durant l'expérimentation avec une médiane de 0 à 1, alors que pour chaque cheval traité, 0 à 9 d'entre elles disparaissent, avec une médiane de 1,25 à 2.

Enfin, le nombre moyen d'asymétries résolues pour chaque cheval est de 0,5 à 1,2 pour le lot témoins, alors qu'il varie de 1,8 à 2,8 parmi les traités.

	Nombre total d'asymétries dans la population	ASYMÉTRIES MAINTENUES					
		par lot		par cheval			
		Nombre d'asymétries	Poucentage	Moyenne	Minimum	Maximum	Médiane
cliché 1-> 2	44	25	56,818	2,083	0	4	2
	75	23	30,667	1,643	0	3	2
cliché 1->3	51	21	41,176	1,750	0	4	2
	58	17	29,310	1,214	0	5	1
cliché 2-> 3	49	34	69,388	2,833	1	6	3
	72	21	29,167	1,500	0	3	0

Tableau 7 : paramètres descriptifs de l'évolution des **asymétries maintenues** selon les clichés et les lots.
Lignes bleues : lot témoin – Lignes vertes : lot traité

Dans les lots témoins et traités, du premier au second cliché, respectivement 57 % et 31 % d'asymétries se maintiennent alors que, 7 jours plus tard, 41% et 29% parviennent à ce résultat entre le premier et le dernier cliché. Par ailleurs, entre le second et le dernier cliché, parmi les chevaux témoins, jusqu'à 69 % des asymétries ont perduré chez les chevaux témoins, tandis que le lot des traités dénombre seulement 29 % d'asymétries à l'issue de cette période.

Pour chaque cheval témoin, 0 à 6 asymétries se sont maintenues durant l'expérimentation avec une médiane de 2 à 3, alors que pour chaque cheval traité, 0 à 5 d'entre elles ont persisté, avec une médiane de 0 à 2.

Enfin, le nombre moyen d'asymétries maintenues pour chaque cheval est de 1,8 à 2,8 pour le lot des témoins, alors qu'il varie de 1,2 à 1,6 dans le lot des traités.

	Nombre total d'asymétries dans la population	ASYMÉTRIES APPARUES					
		par lot		par cheval			
		Nombre d'asymétries	Pourcentage	Moyenne	Minimum	Maximum	Médiane
cliché 1->2	44	5	11,364	0,417	0	1	0
	75	13	17,333	0,929	0	4	1
cliché 1->3	51	21	41,176	1,750	0	5	2
	58	19	32,759	1,286	0	5	1
cliché 2->3	49	9	18,367	2,833	1	6	3
	72	11	15,278	0,786	0	2	0

Tableau 8 : paramètres descriptifs de l'évolution des **asymétries apparues** selon les clichés et les lots.
Lignes bleues : lot témoin – Lignes vertes : lot traité.

Dans les lots témoins et traités, la part des nouvelles asymétries représente respectivement 11 % et 17 % de leur total entre le premier et le second cliché, tandis que ces proportions augmentent à hauteur de 41 % et 33 % entre le premier et le troisième et dernier cliché, soit 7 jours plus tard. Par ailleurs, entre le second et le dernier cliché, le taux d'asymétries émergentes s'élève à 18 % chez les témoins, alors qu'il atteint seulement le seuil de 15 % dans le lot des traités.

Pour chaque cheval témoin, 0 à 6 asymétries sont nouvellement objectivées durant l'expérimentation avec une médiane de 0 à 3, alors que pour chaque cheval traité, 0 à 5 d'entre elles sont apparues, avec une médiane de 0 à 1.

Enfin, le nombre moyen de nouvelles asymétries pour chaque cheval est de 0,4 à 2,8 pour le lot témoins, alors qu'il varie de 0,8 à 1,2 dans le lot des traités.

Quatre diagrammes du Tukey ont été tracés afin d'avoir une représentation plus visuelle des résultats, notamment des extrema et de la médiane. Comme pour les tableaux précédents, les trois premiers décrivent respectivement le nombre d'asymétries résolues, maintenues et apparues, en fonction de l'évolution entre les clichés 1 et 2, 1 et 3 ainsi que 2 et 3. Le dernier s'affranchit du numéro du cliché étudié. Il évalue le nombre d'asymétries résolues, maintenues et apparues sur l'ensemble des clichés.

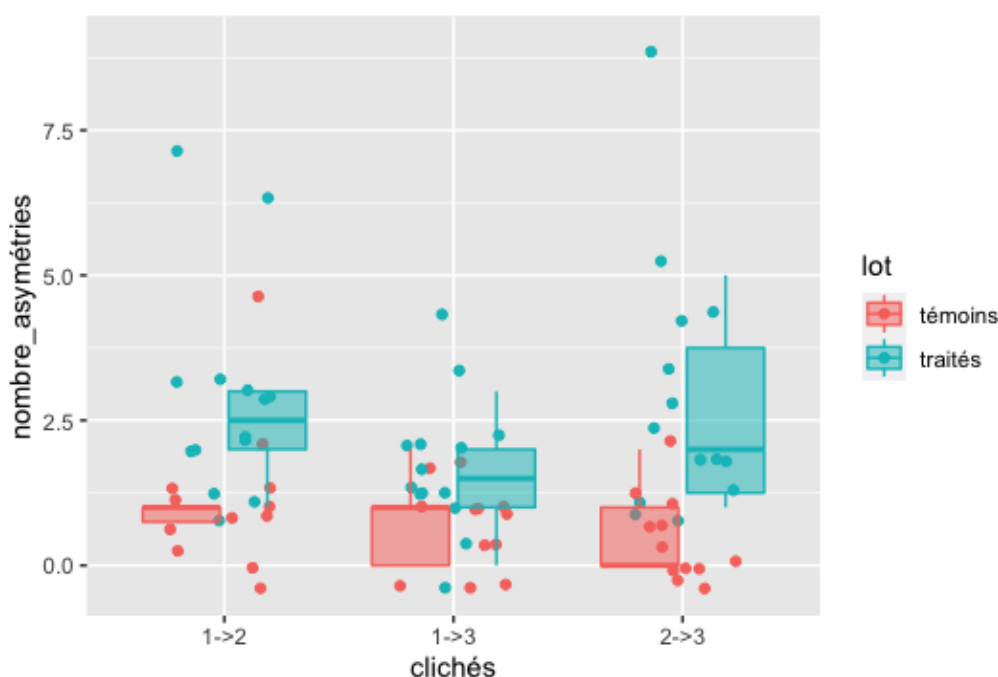


Figure 45 : diagramme de Tukey résumant, pour chaque lot, le nombre d'**asymétries résolues** entre les différents clichés

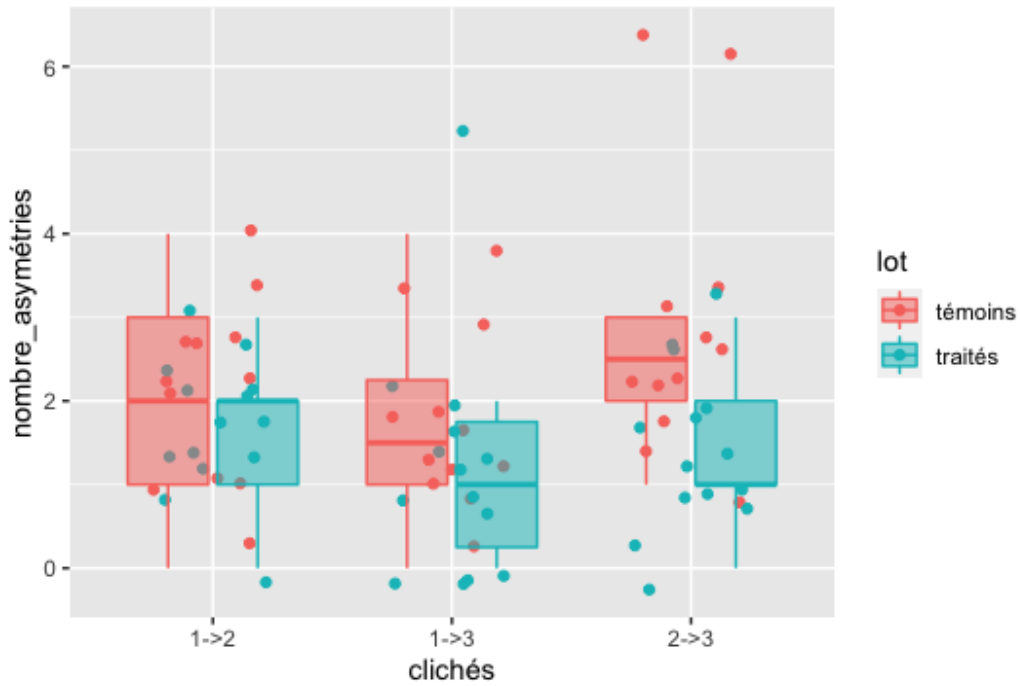


Figure 46 : diagramme de Tukey résumant, pour chaque lot, le nombre d'**asymétries maintenues** entre les différents clichés

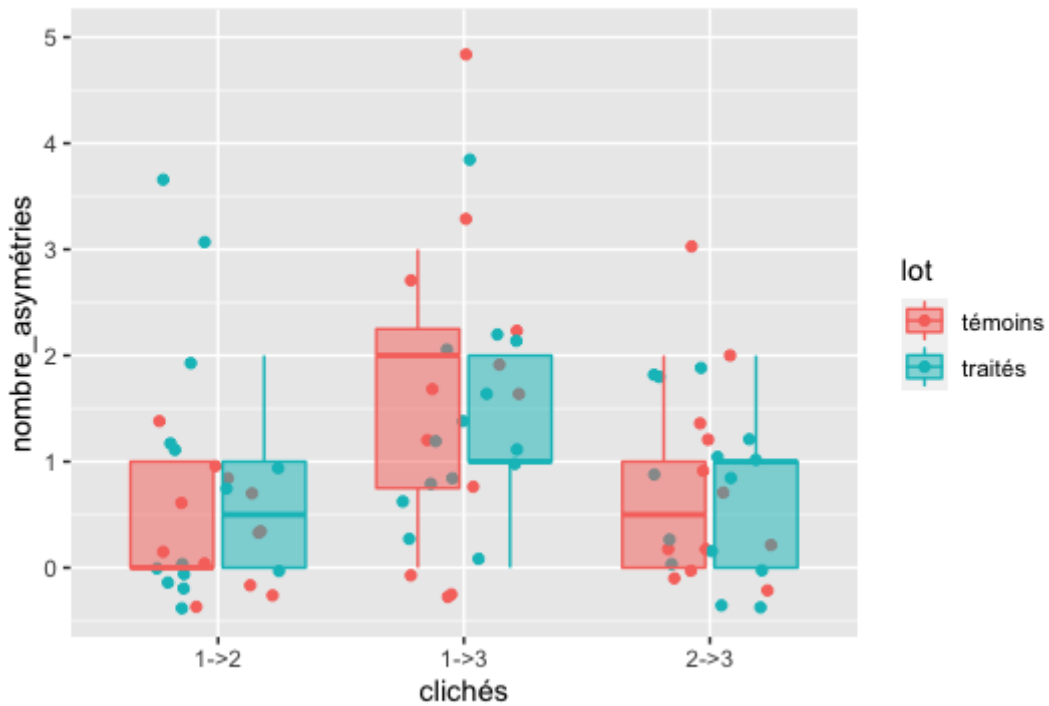


Figure 47 : diagramme de Tukey résumant, pour chaque lot, le nombre d'**asymétries apparues** entre les différents clichés

Les diagrammes de Tukey, suggèrent que la pratique d'un traitement ostéopathe aurait un effet sur la résolution des asymétries détectées, en particulier entre le premier et le second cliché. Bien que les résultats soient moins tranchés, les asymétries tendent à perdurer davantage dans le temps parmi les chevaux témoins que les chevaux traités.

Enfin, le dernier diagramme s'intéresse à l'évolution des asymétries entre les clichés. Il traite des asymétries apparues, résolues et maintenues observées sur l'ensemble des clichés 1, 2 et 3. L'observation de ce dernier diagramme des asymétries apparues, semble indiquer que les traitements ostéopathiques n'influencent pas la survenue de dissymétries, l'évolution des deux groupes semblant très proche.

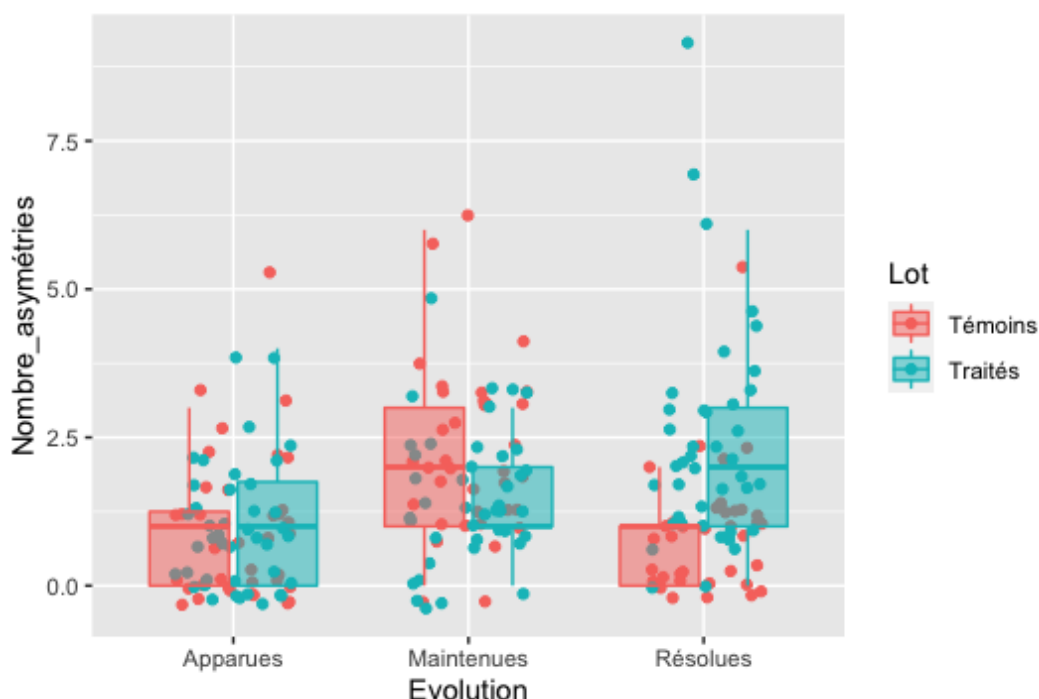


Figure 48 : diagramme de Tukey résumant, pour chaque lot, le nombre global d'asymétries selon leur évolution (apparues, maintenues, résolues)

Le diagramme ne différenciant pas les clichés entre eux, il est cohérent avec les observations déjà formulées. En revanche, les résultats paraissent moins tranchés que précédemment.

Afin de pousser l'analyse plus avant, des tests de Kruskal-Wallis sont effectués pour déterminer s'il existe une corrélation entre le nombre d'asymétries comptabilisées et le lot d'appartenance des chevaux.

Conditions du test	χ^2	Degrés de liberté	p-value
Asymétries résolues	26.145	1	3.168e-07
Asymétries maintenues	7.1537	1	0.007481
Asymétries apparues	0.25437	1	0.614
Asymétries globales sans tenir compte du cliché	3.4004	1	0.06518

Tableau 9 : résultats des différents tests de Kruskal-Wallis

Les résultats des tests permettent d'affirmer que la réalisation d'un traitement ostéopathique impacte significativement le nombre d'asymétries résolues, la p-value du test de Kruskal-Wallis étant de $3,168 \cdot 10^{-7}$. De même, le maintien des asymétries est également significativement influencé par la réalisation d'un traitement ostéopathique (p-value 0,007481). A l'inverse, le traitement n'a pas d'impact sur l'apparition d'asymétries (p-value 0,614), c'est-à-dire que seule l'évolution des

asymétries initialement présentes permet de différencier les groupes traités et témoin. Ultime précision, il n'est pas possible de procéder à une quelconque interprétation sur la seule base du nombre d'asymétries, car les résultats ne sont pas assez discriminants pour affirmer l'influence bénéfique de l'ostéopathie.

Il est donc possible de conclure que le traitement ostéopathique ne prévient pas l'émergence d'asymétries, car elle n'a pas d'influence sur leur apparition. En revanche, elle impacte leur évolution, ce qui justifie l'étude de leur nombre par une régression logistique.

3.3. INFLUENCE DES DIFFÉRENTS FACTEURS

L'influence de l'appartenance à un lot et du moment de la prise de clichés sont évaluées à l'aide d'une régression logistique afin de quantifier plus précisément leur impact. Cette régression est d'abord appliquée globalement, puis séparément au lot des témoins et au lot des traités.

3.3.1. Analyse globale

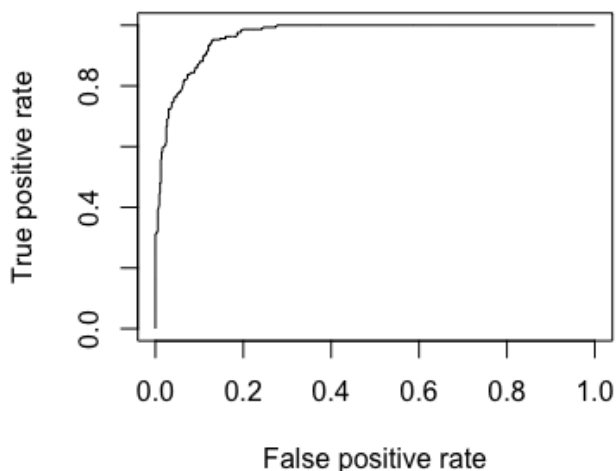
Lors que l'application d'une régression logistique à l'ensemble des données recueillies, les résultats suivants sont obtenus :

	Intercept	Erreur standard	z value	p-value
Intercept	-1.1294	0.4145	-2.725	0.006434
Lot Traité	0.6541	0.5386	1.214	0.224569
Cliché 2	-0.5527	0.3751	-1.473	0.140641
Cliché 3	0.1962	0.3620	0.542	0.587800
Lot Traité & cliché 2	-0.7225	0.4965	-1.455	0.145646
Lot Traité & cliché 3	-1.7599	0.5000	-3.520	0.000432

Tableau 10 : estimation des effets fixes obtenue après l'application d'une régression logistique à l'ensemble des données recueillies lors du protocole

D'après les résultats, il existe bien une interaction entre l'effet des lots et le numéro du cliché. Ainsi, il ne convient pas d'interpréter leur effet séparément l'un de l'autre lorsque l'ensemble des données est analysé. **Il semblerait donc, d'après ce modèle, que les chevaux ont significativement moins d'asymétries sur le troisième cliché lorsqu'ils font partie du lot traité. Ce modèle suggère donc qu'il y a une réduction du nombre d'asymétries une semaine après la pratique d'une séance d'ostéopathie.**

Courbe ROC Diff_qualitative~lot*cliche



		Estimées	
		0	1
Mesurées	0	531	33
	1	63	231

Tableau 11 : tableau de contingences associées à la régression logistique, appliquées à l'ensemble des données recueillies lors du protocole

Figure 49 : courbe ROC associée à la régression logistique, appliquée à l'ensemble des données recueillies lors du protocole

Lors de l'évaluation du modèle, un taux d'erreur de 11,18881 %, associé à une sensibilité de 87,5 % et une spécificité de 89,4 % sont obtenus. De plus, l'aire sous la courbe est de 0.965709, ce qui correspond à une excellente discrimination. Ce modèle semble donc comme vraisemblable et satisfaisant. En effet, les valeurs, dites estimées, prédites par le modèle sont cohérentes avec les résultats observés lors de l'expérimentation.

3.3.2. Analyse séparée des lots traités et témoins

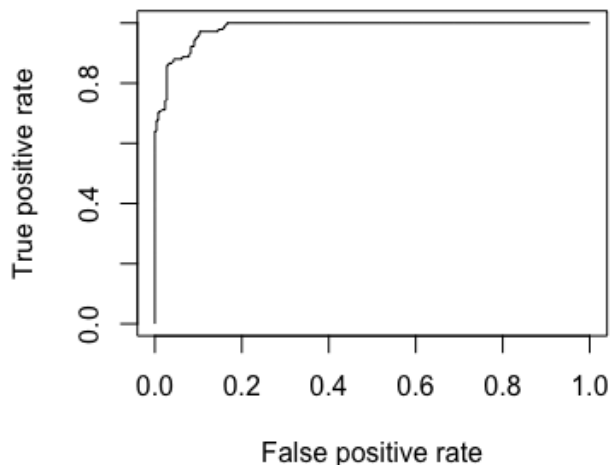
Une régression logistique a ensuite été appliquée séparément au groupe des chevaux témoins puis à celui des chevaux traités.

	β estimé	Erreur standard	z value	p-value
Intercept	-1.7254	0.6647	-2.596	0.00944
Cliché 2	-0.7080	0.4279	-1.655	0.09801
Cliché 3	0.2470	0.4057	0.609	0.54266

Tableau 12: estimation des effets fixes obtenus après l'application d'une régression logistique aux données du groupe des chevaux témoins

La seule p-value inférieure à 0,05 est celle de l'intercept, soit celle du cliché 1, pris avant le traitement ostéopathique. Ce résultat indique donc l'absence d'évolution significative entre les différents clichés ; le **nombre d'asymétries** présentes sur les thermogrammes du **dos des chevaux témoins** semble être **stable dans le temps**.

Courbe ROC Diff_qualitative~cliche



		Estimées	
		0	1
Mesurées	0	244	10
	1	19	125

Tableau 13 : tableau de contingences associées à la régression logistique, appliquées aux données du groupe des chevaux témoins

Figure 50 : courbe ROC associée à la régression logistique, appliquée à l'ensemble des données du groupe des chevaux témoins

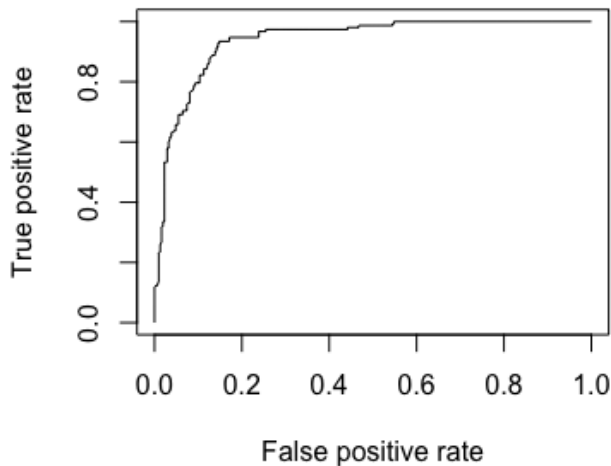
D'après le tableau de contingences, le taux d'erreur calculé est de 7,323232 %, la sensibilité de 92,6 % et la spécificité de 92,8 %. De plus, l'aire sous la courbe, évaluée à 0,9823112, rend le modèle extrêmement discriminant et donc vraisemblable. En effet, les valeurs dites estimées, prédites par le modèle sont cohérentes avec les résultats observés lors de l'expérimentation.

	β estimé	Erreur standard	z value	p-value
Intercept	-0.3291	0.2724	-1.208	0.226993
Cliché 2	-1.0720	0.3074	-3.487	0.000489
Cliché 3	-1.3135	0.3178	-4.133	3.59e-05

Tableau 14 : estimation des effets fixes obtenus après l'application d'une régression logistique aux données du groupe des chevaux traités

D'après la régression logistique appliquée, le nombre d'asymétries observées sur les thermogrammes des chevaux traités est **significativement moins important** sur les clichés 2 que sur les clichés 1 (p-value 0.000489). Cette diminution se poursuit dans la mesure où le nombre d'asymétries s'amointrit encore sur le cliché 3 (p-value $3,59 \cdot 10^{-5}$). En effet, le coefficient de corrélation estimé du cliché 3 est inférieur au β estimé du cliché 2. **Il y a donc une amélioration de la symétrie du dos des chevaux deux heures après une séance d'ostéopathie, qui continue d'évoluer pendant au moins une semaine.**

Courbe ROC Diff_qualitative~cliche



		Estimées	
		0	1
Mesurées	0	301	9
	1	67	85

Tableau 15 : tableau de contingences associées à la régression logistique, appliquées aux données du groupe des chevaux traités

Figure 51 : courbe ROC associée à la régression logistique, appliquée à l'ensemble des données du groupe des chevaux traités

D'après le tableau de contingences, le taux d'erreur est de 16,45022 %, la sensibilité de 90,4 % et la spécificité de 81,8 %. De plus, l'aire sous la courbe, chiffrée à 0.939219, permet de qualifier le modèle de très discriminant et de vraisemblable. De plus, les valeurs dites estimées prédites par le modèle, sont cohérentes avec les résultats observés lors de l'expérimentation.

3.4. CHOIX DE LA TEMPÉRATURE DISCRIMINANTE

Compte tenu de la diversité des températures seuil trouvées dans la littérature, il semble intéressant d'évaluer les résultats recueillis en faisant varier cette valeur seuil. L'effet de l'ostéopathie étant statistiquement significatif à une valeur seuil de 0,5 °C dans cette étude, il l'est potentiellement à des valeurs seuils plus élevées. Toutes les différences de températures supérieures ou égales à 0,5 °C ayant été relevées sur les thermogrammes, il est possible d'appliquer une régression logistique à des températures seuils supérieures à 0,5 °C.

T seuil (Nombre d'asymétries)	Base de données	Facteurs	Intercepts	P-value	Taux d'erreurs	Aire sous la courbe ROC
0,5 °C (284)	Global	Lot traité & cliché 2	-0.7225	0.145646	0.11188	0.9657
		Lot traité & cliché 3	-1.7599	0.000432		
	Témoins	Intercept	-1.7254	0.00944	0.07323	0.98231
		Cliché 2	-0.7080	0.09801		
		Cliché 3	0.2470	0.54266		
	Traités	Intercept	-0.3291	0.226993	0.16450	0.93921
Cliché 2		-1.0720	0.000489			
Cliché 3		-1.3135	3.59e-05			
0,6 °C (174)	Global	Lot traité & cliché 2	-0.53845	0.30663	0.11305	0.95941
		Lot traité & cliché 3	-1.44072	0.00576		
	Témoins	Intercept	-2.63702	5.44e-05	0.09090	0.97051
		Cliché 2	-0.71948	0.0964		
		Cliché 3	0.07992	0.8412		
	Traités	Intercept	-1.2966	2.13e-05	0.13636	0.93434
Cliché 2		-1.0228	0.002355			
Cliché 3		-1.2195	0.000478			
0,7 °C (121)	Global	Lot traité & cliché 2	-0.4206	-0.743	0.1013986	0.96245
		Lot traité & cliché 3	-1.5412	-2.723		
	Témoins	Intercept	-3.0961	2.62e-05	0.07323232	0.96998
		Cliché 2	-1.0669	0.0347		
		Cliché 3	0.2643	0.5311		
	Traités	Intercept	-2.9071	2.44e-05	0.08441558	0.96314
Cliché 2		-0.9198	0.0343			
Cliché 3		-0.9198	0.0343			
0,8 °C (88)	Global	Lot traité & cliché 2	0.07087	0.9137	0.06993	0.96862
		Lot traité & cliché 3	-1.33878	0.0300		
	Témoins	Intercept	-3.0044	1.06e-05	0.07323	0.96578
		Cliché 2	-1.0885	0.0368		
		Cliché 3	0.3563	0.4009		
	Traités	Intercept	-4.4011	0.0328	0.06709	0.96497
Cliché 2		-1.3835	0.0415			
Cliché 3		-1.0648	0.0793			

Tableau 16 : comparaison des modèles en faisant varier la température seuil, c'est à dire la différence de température à partir de laquelle on considère qu'il y a une asymétrie

Lorsque la température seuil augmente, le nombre d'asymétries détectées diminue rapidement. Ainsi, seule la température seuil de 0,6 °C est également interprétable. Au-delà, la quantité d'asymétries perçues est insuffisante pour avoir une valeur significative, car la p-value est trop élevée. **Pour la valeur seuil de 0,6 °C, les conclusions sont similaires à celles observées à 0,5 °C. Le nombre d'asymétries détectées sur le thermogramme du dos des chevaux témoins, connaît deux baisses significatives entre le premier et le second puis le troisième cliché, tandis qu'aucun effet significatif n'est mis en évidence pour le lot témoin.** En lien avec la diminution du nombre d'asymétries observées, la p-value augmente, donc la puissance de corrélation diminue, lorsque la température seuil est de 0,6 °C par rapport à 0,5 °C.

4. Discussion

4.1. BILAN DES RESULTATS

Les résultats de cette étude sont en faveur d'une amélioration de la symétrie dorsale du dos après un traitement ostéopathe. Bien que les thermogrammes révèlent encore la présence d'asymétries, leur nombre semble diminuer à court et moyen terme. En effet, si la pratique d'une séance d'ostéopathie ne semble pas influencer l'apparition d'asymétries thermiques, elle favorise leur résolution et réduit le nombre d'asymétries maintenues, 2 heures comme 7 jours après le traitement. Le tableau suivant synthétise les résultats les plus importants de l'étude :

Température seuil	Asymétries maintenues	Asymétries résolues	Asymétries apparues
0,5 °C	Diminution significative	Augmentation significative	Pas d'effet significatif
0,6 °C	Diminution significative	Augmentation significative	Pas d'effet significatif
0,7 °C	Pas d'effet significatif		
0,8 °C	Pas d'effet significatif		

Tableau 17 : impact d'une séance d'ostéopathie sur les asymétries thermiques dorsales mesurées 2 heures et 7 jours après, sur les chevaux traités

Ces résultats sont en accord avec certaines études réalisées en médecine humaine. Par exemple, Haddad et al. étudient en 2012 la corrélation entre la présence de points de tension myofasciaux, la thermographie et l'algométrie. Les différences de températures absolues entre les côtés droit et gauche sont présentes au niveau de ces points et décrites comme l'un des paramètres les plus utilisés en thermographie.

Reprochant un manque de sensibilité aux études mesurant l'ensemble de la surface d'un muscle, les températures sont mesurées sur des aires d'un centimètre carré prédéfini. Cette approche aurait été idéale dans le cadre de cette thèse. Cependant, au vu de la surface du dos du cheval, le tracé du quadrillage aurait manqué de précision et n'aurait pas pu être conservé pendant sept jours. La sensibilité et la spécificité de la mesure de la différence de températures trouvées dans cette étude sont respectivement de 62,5 et 73,1 %. A l'inverse, lorsque la température absolue est mesurée, la sensibilité de la thermographie diminue à 50 % et la spécificité chute à 17 %. Cette étude souligne donc l'intérêt de travailler en température relative (Haddad et al. 2012).

Il n'existe pas de consensus quant aux signes d'anomalies thermiques d'une dysfonction ostéopathique. Les points de tension révélés par Haddad et al. en 2012 étaient plus froids que leur controlatéral, à l'inverse de la majorité de la littérature à ce sujet. Dans son mémoire en 2014, Godde, prend des clichés thermographiques des chevaux avant et après la réalisation de son traitement ostéopathique. Contrairement à l'étude précédente, l'auteure mesure les températures sur de grandes zones anatomiques. Sur ses clichés, les anomalies thermiques semblent se normaliser à la suite du traitement ostéopathique, ce qui permet de les considérer comme des dysfonctions. Ces zones de dysfonctions sont, selon les cas, plus chaudes ou plus froides que le reste du corps. Cependant, il faut noter que les thermogrammes de ce mémoire ont été acquis sur le terrain sans période d'acclimatation, créant ainsi de nombreux biais (Godde 2014). Il ne semble donc pas possible de généraliser : les origines d'une modification locale de la température cutanée sont nombreuses.

Des zones de diminution de température pourraient être liées à une diminution de la perfusion sanguine. Les contractions musculaires et diverses zones de tension seraient, avec la participation du système nerveux sympathique, à l'origine d'une baisse de la vascularisation et donc d'une diminution de la température locale des tissus. En effet, d'après Ballyns et al. en 2011, la vasoconstriction capillaire au niveau des points de tension implique une augmentation de la résistance du réseau capillaire, ce qui diminue le flux sanguin local. A l'inverse, la détection de tissus anormalement chauds peut signer la présence d'une augmentation de la perfusion, allant souvent de pair avec une vasodilatation et une inflammation.

Étonnamment dans cette thèse, la symétrie thermique semble se parfaire à moyen terme. En effet, quels que soit le modèle ou la valeur seuil considérés, la symétrie est davantage marquée et la p-value plus basse pour le troisième cliché (pris une semaine après le traitement ostéopathique) que pour le second cliché enregistré deux heures après le traitement initial.

Plusieurs hypothèses sont possibles. Le relâchement de certaines tensions et la reprise de la perfusion peuvent être très progressives. A l'inverse, certaines libérations seraient susceptibles d'être suivies d'un afflux sanguin soudain, inversant temporairement la dissymétrie. Le côté le plus chaud deviendrait ponctuellement plus froid que son controlatéral, avant que la perfusion ne se normalise à nouveau. Ce cas a été observé sur certains thermogrammes lors de leur lecture. Ce phénomène pourrait également expliquer une moindre symétrie dorsale observée sur le cliché 2, pris deux heures après le traitement, que sur le cliché 3, enregistré 7 jours plus tard.

4.2. LIMITES DE L'ETUDE

4.2.1. Critique du design expérimental

L'affectation des chevaux au lot traité a été dictée par des facteurs extérieurs pragmatiques. C'est la sollicitation préalable d'un rendez-vous ostéopathique qui les a fait rentrer dans l'étude, ce qui constitue un **biais de sélection**. Le lot traité n'était donc pas uniquement constitué de chevaux d'instruction, contrairement au lot témoin.

Bien que certains chevaux soient affectés à un cavalier attitré et malgré des niveaux de performance hétérogènes, les lots de traités et témoins restent des chevaux de race de selle, en âge de travailler et pratiquant une discipline olympique. Cependant, cette homogénéité démographique constitue un **biais d'échantillonnage**, lié au fait que l'échantillon local, objet de cette étude, sur-représente largement les chevaux de selle au travail par rapport à la population équine du territoire français.

Enfin, la résidence des chevaux de l'étude au Cadre Noir induit un **biais de recrutement**. Cependant la similitude de ces conditions de vie et de soins permet de travailler en conditions standardisées.

Les séances d'ostéopathie ont été intégralement effectuées par le Dr Isabelle Burgaud. La pratique de l'ostéopathie étant individualisée, dépendant du patient et du thérapeute, les résultats de cette étude s'appliquent donc à son travail. Ne s'agissant pas d'un protocole systématique applicable dans un cas précis, les résultats sont peu généralisables.

Le protocole s'étant déroulé au mois de juillet, il est aussi possible d'imaginer un **biais climatique** : malgré un temps clément et une température des boxes inférieure à 30 °C fidèle aux recommandations de la littérature, le taux d'humidité de l'air ambiant des boxes augmente lorsque les portes de ces derniers sont fermées. Ainsi, on ne peut pas exclure que certains chevaux aient eu chaud. En l'absence de poils mouillés, il est possible que des variations de température cutanée aient impacté les mesures relevées sur les thermogrammes. Cependant, en conditions estivales, les chevaux ont les poils naturellement courts et ne sont ni tondus ni couverts, ce qui favorise la diffusion de la chaleur. Le thermogramme obtenu est alors plus précis et fiable car les différences locales de températures s'atténuent à mesure que le pelage s'allonge (Tunley, Henson 2004). Cet élément favorise également l'uniformité des conditions d'expérimentation, en l'absence de biais lié à des différences de dates de tonte. Enfin, l'acquisition des thermogrammes s'est déroulée sur une période de trois semaines et dans des conditions météorologiques stables avec des chevaux déjà acclimatés au climat, ce qui est également en faveur d'une standardisation du protocole. Par ailleurs, l'angle entre la caméra et le cheval est proche de 45 °C et donc non inclus dans l'intervalle de 60 à 120 °C testé dans la littérature (Westermann et al. 2013).

Ces deux derniers biais méthodologiques ont motivé le choix de n'interpréter que des asymétries. Ainsi, lors de la mise au point du protocole, il a été postulé que, lors d'une élévation globale de la température cutanée, les asymétries seraient conservées. Similairement à l'étude de Tunley et Henson en 2004, la conservation du pattern thermique global du cheval a ensuite été vérifiée et constatée, pour les quelques chevaux dont la température cutanée avait légèrement augmenté. Enfin, il est important de souligner que cette approche a permis de travailler en température relative et de s'affranchir de la comparaison avec un thermogramme de référence.

Enfin, la thermographie est une technologie très sensible. Si la sensibilité de la caméra de 0,03 °C à température et sa résolution est de 464 x 348 pixels semblent tout à fait adaptées au protocole expérimental. Ce serait plutôt la spécificité de cette technologie qui serait à remettre en cause. En effet, la température cutanée mesurée peut être influencée par de nombreux facteurs, internes, physiologique et pathologique, comme environnementaux et artéfactuels. Malgré la mise en place de conditions expérimentales rigoureuses, on ne peut exclure l'existence d'interférences extérieures indétectables. Afin de parer à ce type d'éléments perturbateurs insoupçonnés, les chevaux traités et témoins ont été répartis, sans distinction de groupe, dans l'ensemble des boxes, sur les trois semaines d'expérimentation.

4.2.2. Critique de l'analyse des images

L'ensemble des images a été analysé manuellement par un opérateur. De ce fait, certaines des asymétries ont pu ne pas être détectées. Malgré la mise en place d'un code couleur permettant un repérage relativement facile des anomalies thermiques, il est impossible d'affirmer avec certitude que l'intégralité des asymétries ait été détectées sur les thermogrammes. De plus, toute conservation du pattern thermique par ailleurs considéré, il n'est pas toujours aisé de replacer les

aires de mesures aux mêmes endroits anatomiques : d'un cliché à l'autre, une légère variation de la position du cheval a rendu quelques points difficilement localisables précisément. Fixer la caméra au plafond au-dessus d'un travail aurait été une méthode possible pour conserver un angle constant à 90° lors de la prise d'images. En effet, l'absence d'influence de l'angle entre la caméra et l'objet d'intérêt n'a été démontré que dans un intervalle de 60 à 120°. Or, dans ce protocole, l'angle présent était proche de 45°. De plus, une position constante de la caméra thermique par rapport au cheval aurait permis une meilleure systématisation du protocole et une interprétation plus facile des images, grâce à un positionnement plus stable des repères anatomiques. Cependant, la grande majorité des asymétries est restée relativement évidente et simple à reporter d'un cliché à l'autre. De plus, toutes les valeurs ont été reportées à la main dans Excel®, induisant une probabilité d'erreur non nulle malgré plusieurs relectures.

Par ailleurs, l'ensemble des points a été placé par la personne ayant pris les clichés. Il existe donc un biais lié à la lecture de l'opérateur, la répétabilité de cette méthode de lecture n'ayant pas été démontrée. Il existe également la présence d'un **biais de subjectivité**, dans la mesure où le lecteur des thermogrammes connaît la catégorie d'appartenance de chacun des chevaux de l'expérimentation.

Enfin, le choix de la température seuil, différence de température à partir de laquelle on considère qu'il y a une asymétrie, est discutable également. Les températures seuil varient de 0,3 °C en médecine humaine (Haddad et al. 2012), à 1 °C en médecine vétérinaire lors de recherche de processus pathologiques (Turner et al. 2021; Kold, Chappell 1998). Dans la première des deux études menée sur des humains, les conditions d'expérimentation sont contrôlées bien plus précisément que dans le cadre de cette thèse. La température de l'air, l'humidité et l'intensité du flux de la ventilation sont fixées. De plus, la peau humaine est glabre contrairement celle des chevaux ; ces paramètres justifient l'abaissement de la température seuil dans les conditions de l'étude d'Haddad et Al. En revanche, si l'on se recentre sur cette présente étude, la systématisation satisfaisante et l'application de la méthode des relevés de deux points symétriques sur un même cliché assurant que les conditions de réalisation fiables, ont permis de se contenter d'une température seuil relativement basse. Ainsi, dans cette thèse, la température a été arbitrairement fixée à 0,5 °C selon la littérature, les caractéristiques techniques de la caméra et le ressenti de l'opérateur. Lorsque d'autres valeurs seuils ont été testées, seul le seuil de 0,6°C était également significatif. Comme en médecine humaine, la température seuil doit donc être assez basse, ce qui est cohérent avec la recherche de dysfonctions ostéopathiques et non de phénomènes pathologiques neuromusculaires.

4.2.3. Critique statistique

Pour obtenir un nombre de points équivalent entre les chevaux, il aurait été possible de prédéfinir des zones anatomiques à comparer entre elles. Cependant, des asymétries de petite taille auraient été diluées et donc non détectées si l'ensemble de la surface analysée avait été couverte. A l'inverse, des asymétries situées à l'intersection de deux zones auraient pu être comptabilisées deux fois. Toute réalisation de thermogramme dorsal est donc le résultat d'une approche individualisée au cas par cas, chaque cheval présentant des asymétries aux caractéristiques tout aussi distinctes, du fait de leur emplacement ou leur quantité. Plus précisément, il s'est avéré que le nombre d'aires thermiques mesurées n'était égal, ni entre les deux groupes, ni d'un cheval à l'autre, ce qui abaissaient grandement la vraisemblance des résultats statistiques. Les modèles étaient ainsi insuffisamment discriminants avant d'égaliser le nombre de points mesurés entre les chevaux et les groupes. Cette approche n'a pas modifié le premier tableau de résultats, dans la mesure où il ne

prend en compte que l'évolution des asymétries en considérant individuellement chaque point. A l'inverse, il a donné un support de conservation de la symétrie à la régression logistique, qui considère le nombre de points dans leur ensemble, la dénomination du point étant considéré comme un effet résiduel. Le modèle est alors devenu bien plus vraisemblable et discriminant.

4.3. PERSPECTIVES

Certaines conclusions de cette thèse pourraient encore être approfondies. Si elle a permis de mettre en évidence l'effet bénéfique d'une séance d'ostéopathie sur la symétrie dorsale des chevaux, il serait intéressant d'essayer de comparer la répartition des asymétries thermiques à celle des dysfonctions diagnostiquées par l'ostéopathe. Les asymétries thermiques pourraient se situer au niveau des dysfonctions, ou peut-être, réparties dans une chaîne de dysfonctions. Si une corrélation était trouvée entre le positionnement des asymétries thermiques et des dysfonctionnements ostéopathiques, la différenciation des dysfonctions en hypo ou en hyper rayonnement et leur évolution respective, permettraient d'avancer dans la compréhension de leur physiologie.

De plus, dans cette thèse, la thermographie, utilisée comme outil diagnostique. Bien que son utilisation soit contraignante, elle pourrait aider à localiser certaines lésions situées dans des zones difficilement évaluables par les techniques classiques d'imageries. Le dos des chevaux au travail est régulièrement sujet à des douleurs difficilement évaluables par radiographie et échographie en raison de la profondeur de leurs tissus. L'absence de localisation précise de la douleur contraint souvent à pratiquer une mésothérapie sur des zones étendues. La caméra thermique pourrait alors constituer un outil complémentaire pour aider à préciser la zone douloureuse et à mieux cibler le traitement.

Enfin, l'utilisation de cet outil pourrait fournir des précisions quant à la température des tissus mous sous-jacents. Une utilisation en structure hospitalière pourrait être envisagée pour les chevaux dont on ne peut prendre de température par voie rectale ou pour suivre la température des sabots des équidés à risque de fourbure comme ceux en endotoxémie.

CONCLUSION

L'ostéopathie fait aujourd'hui souvent partie intégrante du suivi médical des chevaux de sport. A l'inverse de la médecine allopathique qui se spécialise, elle aborde l'individu dans sa globalité. Son objectif est de rééquilibrer le corps, de rétablir une perfusion optimale pour, in fine permettre au cheval de retrouver son fonctionnement harmonieux. La vascularisation a une importance particulière en ostéopathie comme l'illustre la règle de l'artère souveraine laissée par Andrew Taylor Still sont fondateur. Ainsi, il est intéressant d'utiliser la thermographie pour tenter d'observer les effets de l'ostéopathie sur les anomalies thermiques et donc indirectement sur la vascularisation. En effet, la thermographie est un outil de mesure de température de surface, une porte ouverte vers les phénomènes thermiques sous-jacents. Au repos, c'est principalement la perfusion qui dicte la température des tissus.

Cette étude a permis d'établir l'existence d'un effet de l'ostéopathie sur les anomalies thermiques dorsale. La répartition de chaleur dorsale, après un traitement, semble plus symétrique ; c'est-à-dire qu'on dénombre moins d'asymétries. La lecture des thermogrammes étant individualisé à chaque cheval et faite par une seule personne, elle dépend de la subjectivité de cette dernière. Ainsi, il serait intéressant, et même nécessaire, de valider ces résultats en démontrant leur répétabilité quel que soit le lecteur.

Il n'existe pas à l'heure actuelle de consensus quant à la température des dysfonctions ostéopathiques. Elle est augmentée ou diminuée selon les études. Appréhender l'effet de l'ostéopathie sur ces anomalies thermiques participerait à leur compréhension. De nombreuses études ont été faites à propos de l'effet de l'ostéopathie sur la locomotion sans pour autant s'intéresser individuellement aux dysfonctions. Relier ces trois aspects permettrait de faire avancer l'étude de la physiopathologie des dysfonctions ostéopathiques.

ANNEXE : Indication des techniques musculaires selon la structure dysfonction

G : garrot (T2-T10) en dysfonction

TL : vertèbres thoraciques caudales et lombaires (T11-L6) en dysfonction

S : sacrum en dysfonction

Cd : jonction sacrococcygienne et vertèbres caudales en dysfonction

Cx : coxaux en dysfonction

SI : articulation sacro-iliaque en dysfonction

Structure à traiter	Accrochage	Effleurage	Tapotement	Friction	Pétrissage	Étirement des fascias	Technique des cellules fusoriales	Traitement des points de tension
Ligament supraépineux	G, TL, S, Cd, Cx, SI							
M. bachiocéphalique, M. splénus		G	G		G		G	G : 2
M. dentelé ventral de l'encolure				G				
M. subclavier	G							
M. rhomboïde et M. trapèze		G, TL	G, TL	G, TL			G, TL	G : 4,5,6 TL : 4,6
M. pectoraux								G, TL : 12
M. dentelé ventral du thorax		G, TL						G, TL : 9
M. érecteur de la colonne		TL, S, Cd, Cx, SI	TL, S, Cd, Cx, SI	TL, S, Cd, Cx, SI			TL, S, Cd, Cx, SI	TL, Cd, Cx, SI : 13-15 S : 14
M. grand dorsal		TL, S, Cd, Cx	TL, S, Cd, Cx				TL, S, Cd, Cx	

M. iliopsoas								TL, S, Cd, Cx, SI : 22
M. glutéal moyen et superficiel		TL, S, Cd, Cx, SI	TL, S, Cd, Cx, SI	TL, S, Cd, Cx, SI	TL	TL, S, Cd, Cx, SI	TL, S, Cd, Cx, SI	TL, S, Cd, Cx ,SI: 15
M. biceps fémoral		TL, S, Cd, Cx	TL, S, Cd, Cx		TL	TL, S, Cd, Cx	TL, S, Cd, Cx	TL, S, Cd, Cx : 16,17
M. abdominaux		TL, S	TL			TL, S	TL, S	TL, S : 24,25
M. adducteur		S, Cx	S, Cx	S, Cx			S, Cx	
M. sacro caudaux		Cd	Cd	Cd		Cd	Cd	
M. semi-tendineux, M. semi- membraneux		Cx, SI	Cx, SI			Cx, SI	Cx, SI	Cx, SI : 19, 20
M. tenseur du fascia lata		Cx, SI	Cx, SI			Cx, SI	Cx, SI	Cx, SI : 21
M. quadriceps fémoral		Cx	Cx			Cx	Cx	

Adapté de Eser, Prudhomme 2013

Remarques :

- l'accrochage du muscle subclavier se fait dorso-ventralement sur le bord crânial de la scapula
- il est aussi intéressant de relâcher les muscles pectoraux en les poussant main à plat en longeant la face médiale de l'antérieur
- faire des frictions douces du muscle érecteur de la colonne vertébrale

BIBLIOGRAPHIE

BALLYNS, Jeffrey J., SHAH, Jay P., HAMMOND, Jennifer, GEBREAB, Tadesse, GERBER, Lynn H. et SIKDAR, Siddhartha, 2011. Objective Sonographic Measures for Characterizing Myofascial Trigger Points Associated With Cervical Pain. *Journal of Ultrasound in Medicine*. octobre 2011. Vol. 30, n° 10, pp. 1331-1340. DOI 10.7863/jum.2011.30.10.1331.

BITAR, D., 2009. International travels and fever screening during epidemics: a literature review on the effectiveness and potential use of non-contact infrared thermometers. *Euro Surveillance: Bulletin Europeen Sur Les Maladies Transmissibles = European Communicable Disease Bulletin*. 12 février 2009. Vol. 14, n° 6, pp. 19115.

BOICHOT, Laetitia, 2020. Retour de formation : Thermographie vivante. . septembre 2020.

BOISSELEAU, Amandine, 2012. *La force de traction médullaire : étude bibliographique*. . Nantes : Faculté de médecine de Nantes.

BONNET, G., 2005. *Le Corps noir* [en ligne]. 17 mars 2005. culture science physique - ENS Lyon. Disponible à l'adresse : <http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/CorpsNoir.xml#N1005A>

BORDONI, Bruno et BORDONI, Giovanni, 2015. Reflections on osteopathic fascia treatment in the peripheral nervous system. *Journal of Pain Research*. octobre 2015. pp. 735. DOI 10.2147/JPR.S89393.

BORDONI, Bruno et ZANIER, Emiliano, 2015. Understanding Fibroblasts in Order to Comprehend the Osteopathic Treatment of the Fascia. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*. 2015. Vol. 2015, pp. 1-7. DOI 10.1155/2015/860934.

BRASSAUD, Catherine, 2006. Mécanique vertébrale équine. *Vetostéo*. 2006. Vol. 1, n° A04.

CAMUS, Philippe, 2002. *Principe des bolomètres*. 2002. CNRS Grenoble.

CAYRE, Stephan, 2008. L'ostéopathie viscérale : comment ça marche? *Vetostéo*. septembre 2008. N° A23.

CAYRE, Stephan et CHÊNE, Patrick, 2008. Le mouvement respiratoire primaire. *Vetostéo*. 2008.

CHÊNE, Patrick, 2006a. Mécanique vertébrale équine-2. *Vetostéo*. 2006. Vol. 1, n° A05.

CHÊNE, Patrick, 2006b. La force de traction médullaire. *Vetostéo*. 2006. Vol. 1, n° A06, A07.

CHÊNE, Patrick, 2013. *101 Coups de pouce d'ostéopathie comparée*. . L'Ostéo4pattes. L'Ostéo4pattes.

CLEMEDECINE, 2017. *Lésions ostéopathiques du rachis lombaire* [en ligne]. 2017. Clemedecine. Disponible à l'adresse : <https://clemedecine.com/4-lesions-osteopathiques-du-rachis-lombaire/>

COLLET, Christian, 2015. *Neuroanatomie fonctionnelle de la motricité : Le reflexe myotatique inverse*. . Anatomie 3D - Université de Lyon, mai 2015.

COLLIN, Bernard, 2010. *Anatomie du cheval*. . Andri SPRL. Liège. ISBN 978-2-9600814-0-4.

CRÉACH, Pauline et WARIN, Laura, 2019. Utilisation de la méthode EBENE pour évaluer le bien-être et la santé des poulets de chair. In : *Treizièmes Journées de la Recherche Avicole et Palmipèdes à Foie Gras*. Tours. 20 mars 2019.

DAGAIN, Elise, 2006. *Approche de l'ostéopathie en médecine vétérinaire équine*. . Lyon : Université Claude Bernard.

DALIBART, Michel et SERVANT, Laurent, 2000. *Spectroscopie dans l'infrarouge*. . Techniques de l'ingénieur.

DAVIES, Zoe, 2017. *Equine science*. . Third edition. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons/Blackwell. ISBN 978-1-118-74117-7. SF285.3

DE SOUSA MENENSES, D., 2021. *Analyse de spectres infrarouges : émission, réflexion et transmission* [en ligne]. 2021. CNRS - centre de Recherche sur les Matériaux à Haute Température. [Consulté le 22 avril 2021]. Disponible à l'adresse : <http://www.cemhti.cnrs-orleans.fr/pot/ACRT/Contributions/ACRT-CRMHT.pdf>

DENIS, Bruno, 2007a. La boucle gamma et Le tonus musculaire. *Vetostéo*. mars 2007. Vol. 1, n° C10.

DENIS, Bruno, 2007b. Test de mobilité articulaire. *Vetostéo*. décembre 2007.

DOLBOW, James et THROCKMORTON, Zachary, 2022. Neuroanatomy, Spinal Cord Myotatic Reflex. In : *StatPearls*. [en ligne]. Treasure Island (FL) : StatPearls Publishing. [Consulté le 14 février 2022]. Disponible à l'adresse : <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK551629/NBK551629>

ELLAWAY, Peter H., TAYLOR, Anthony et DURBABA, Rade, 2015. Muscle spindle and fusimotor activity in locomotion. *Journal of Anatomy*. Août 2015. Vol. 227, n° 2, pp. 157-166. DOI 10.1111/joa.12299.

ESER, Katja M.-L. et PRUDHOMME, Christophe, 2013. *Ostéopathie pour le cheval*. . Paris : Maloine. Checklists. ISBN 978-2-224-03335-4. 636.108 95533

FLIR SYSTEMS AB et INFRAREDTRAINING CENTER, 2012. *Guide de l'imagerie thermique pour les applications du batiement et des energies renouvelables*. 2012.

FOKAM, Danielle et LEHMANN, Christian, 2019. Clinical assessment of arthritic knee pain by infrared thermography. *Journal of Basic and Clinical Physiology and Pharmacology*. 27 mai 2019. Vol. 30, n° 3, pp. 20170218. DOI 10.1515/jbcpp-2017-0218.

FONSECA, B.P.A., ALVES, A.L.G., NICOLETTI, J.L.M., THOMASSIAN, A., HUSSNI, C.A. et MIKAIL, S., 2006. Thermography and ultrasonography in back pain diagnosis of equine athletes. *Journal of Equine Veterinary Science*. Novembre 2006. Vol. 26, n° 11, pp. 507-516. DOI 10.1016/j.jevs.2006.09.007.

FOUGERONT, Nicolas, GARNIER, Bruno et FLEITER, Bernard, 2014. Motricité, fonctions manducatrices et réflexes de la mâchoire (1ère partie). *Médecine Buccale Chirurgie Buccale*. Juillet

2014. Vol. 20, n° 3, pp. 161-170. DOI 10.1051/mbcb/2014018.

GETM ASETHEMA, 2013. Fiches techniques : programme de technologie fondamentale. In : . Décembre 2013.

GINIAUX, Dominique, 1992. *Ostéopathie équine suivi de Les chevaux m'ont dit : soulagez votre cheval aux doigts, et à l'oeil! essai d'ostéopathie équine*. Arles : Actes Sud. Arts équestres. ISBN 978-2-330-15180-5. 636.108 95533

GIUSTI, Rebecca, American association of colleges of osteopathic medicine, et educational council on osteopathic principles, 2017. *Glossary of osteopathic terminology*. Chevy Chase, Md. : American Association of Colleges of Osteopathic Medicine. ISBN 978-0-9974411-2-3.

GODDE, Mariam, 2014. *Effets d'un traitement ostéopathique sur le thermogramme tronculaire du cheval : étude bibliographique et expérimentation clinique*. Mémoire de DIE d'ostéopathie vétérinaire.

GUILLAUD, Albin, DARBOIS, Nelly, MONVOISIN, Richard et PINSAULT, Nicolas, 2018. Reliability of diagnosis and clinical efficacy of visceral osteopathy: a systematic review. *BMC Complementary and Alternative Medicine*. décembre 2018. Vol. 18, n° 1, pp. 65. DOI 10.1186/s12906-018-2098-8.

HADDAD, D S, BRIOSCHI, M L et ARITA, E S, 2012. Thermographic and clinical correlation of myofascial trigger points in the masticatory muscles. *Dentomaxillofacial Radiology*. décembre 2012. Vol. 41, n° 8, pp. 621-629. DOI 10.1259/dmfr/98504520.

HINCHCLIFF, Kenneth W., KANEPS, Andris J. et GEOR, Raymond J. (éd.), 2008. *Equine exercise physiology: the science of exercise in the athletic horse*. Edinburgh ; New York : Saunders/Elsevier. ISBN 978-0-7020-2857-1. SF768.2.H67 E674 2008

HULET, R., GLADYS, G., HILL, D., MEIJERHOF, R. et EL-SHIEKH, T., 2007. Influence of Egg Shell Embryonic Incubation Temperature and Broiler Breeder Flock Age on Posthatch Growth Performance and Carcass Characteristics. *Poultry Science*. Février 2007. Vol. 86, n° 2, pp. 408-412. DOI 10.1093/ps/86.2.408.

JORDAN, Theodore, 2009. Swedenborg's influence on Sutherland's 'Primary Respiratory Mechanism' model in cranial osteopathy. *International Journal of Osteopathic Medicine*. septembre 2009. Vol. 12, n° 3, pp. 100-105. DOI 10.1016/j.ijosm.2009.03.006.

KASTBERGER, Gerald et STACHL, Reinhold, 2003. Infrared imaging technology and biological applications. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*. août 2003. Vol. 35, n° 3, pp. 429-439. DOI 10.3758/BF03195520.

KENNETH, E. Nelson, 2002. The primary respiratory mechanism. *American Academy of Osteopathy Journal*. 2002.

KHAN, Asim Ali et ARORA, Ajat Shatru, 2021. Thermography as an Economical Alternative Modality to Mammography for Early Detection of Breast Cancer. ALQITHAMI, Saad (éd.), *Journal of Healthcare Engineering*. 31 juillet 2021. Vol. 2021, pp. 1-8. DOI 10.1155/2021/5543101.

KOLD, S. E. et CHAPPELL, K. A., 1998. Use of computerised thermographic image analysis (CTIA) in equine orthopaedics: review and presentation of clinical cases. *Equine Veterinary Education*. août

1998. Vol. 10, n° 4, pp. 198-204. DOI 10.1111/j.2042-3292.1998.tb00877.x.

LAGOUTTE, Fabien, CORRAND, Léni et GUERIN, Jean-Luc, 2009. *Thermographie Infrarouge : applications en élevage avicole*. 2009. AVIcampus, ENVT, Clinique des Elevages Avicoles et Porcins.

LAVAL, Gaetan, 2020. Ambiance des bâtiments de démarrage des canard prêts-à-gaver. *ITAVI (institut technique des filières avicole, cunicole et piscicole)*. 1 avril 2020.

LE CARDRE NOIR IFCE, 2014. *Le Cadre Noir* [en ligne]. 2014. [Consulté le 3 mars 2022]. Disponible à l'adresse : <https://www.ifce.fr/cadre-noir/le-cadre-noir/>

LIEM, Torsten, 2016. A.T. Still's Osteopathic Lesion Theory and Evidence-Based Models Supporting the Emerged Concept of Somatic Dysfunction. *Journal of Osteopathic Medicine*. 1 octobre 2016. Vol. 116, n° 10, pp. 654-661. DOI 10.7556/jaoa.2016.129.

LUTZ, Emmanuelle, 2004. *Points Moteurs, Points de Tension, Trigger Points, Points d'Acupuncture : Relations, Intérêts en diagnostic et thérapeutique chez le Cheval*. . Lyon : Université Claude Bernard.

MARTINI, Giorgia, CAPPELLA, Michela, CULPO, Roberta, VITTADELLO, Fabio, SPROCATI, Monica et ZULIAN, Francesco, 2019. Infrared thermography in children: a reliable tool for differential diagnosis of peripheral microvascular dysfunction and Raynaud's phenomenon? *Pediatric Rheumatology*. Décembre 2019. Vol. 17, n° 1, pp. 68. DOI 10.1186/s12969-019-0371-0.

MIKAIL, Solange, VILLAÀA ISSA DE ARAUJO, Marina et CUTRALE TARANTINO, Celina, 2019. Reestablishment of normal skin temperature in the cold limbs of a horse after craniosacral therapy. In : *10th International Symposium on Veterinary Rehabilitation and Physical Therapy; and the Summit of the American Association of Rehabilitation Veterinarians; and the American College of Veterinary Sports Medicine and Rehabilitation*. 2019.

MOINEAU INSTRUMENT - IHM, 2020. *Qu'est-ce que le NETD ?* [en ligne]. 2020. France Environnement. [Consulté le 30 avril 2022]. Disponible à l'adresse : <https://www.franceenvironnement.com/question/qu-39-est-ce-que-le-netd-2020-05-22>

NEVIN, Tony, COLLES, Chris et TOZZI, Paolo, 2020. *Animal osteopathy: a comprehensive guide to the osteopathic treatment of animals and birds*. . Pencaitland : Handspring publishing. ISBN 978-1-909141-30-8. 636.089 5533

OSTEOPATHIC INTERNATIONAL ALLIANCE, 2013. Osteopathy And Osteopathic Medicine. [en ligne]. 2013. Disponible à l'adresse : <https://oialliance.org/wp-content/uploads/2014/01/OIA-Stage-2-Report.pdf>Place : Chicago

PAVELSKI, Mariana, BASTEN, Mardjory da Silva, BUSATO, Eduarda et DORNBUSCH, Peterson Triches, 2015. Infrared thermography evaluation from the back region of healthy horses in controlled temperature room. *Ciência Rural*. 22 mai 2015. Vol. 45, n° 7, pp. 1274-1279. DOI 10.1590/0103-8478cr20140675.

PETTMAN, Erland, 2007. A History of Manipulative Therapy. *Journal of Manual & Manipulative Therapy*. juillet 2007. Vol. 15, n° 3, pp. 165-174. DOI 10.1179/106698107790819873.

PUSEY, Anthony, BROOKS, Julia et JENKS, Annabel, 2010. *Osteopathy and the treatment of horses*. . Oxford : Wiley-Blackwell. ISBN 978-1-4051-6952-3.

REDAELLI, Veronica, LUZI, Fabio, MAZZOLA, Silvia, BARIFFI, Gaia, ZAPPATERRA, Martina, NANNI COSTA, Leonardo et PADALINO, Barbara, 2019. The Use of Infrared Thermography (IRT) as Stress Indicator in Horses Trained for Endurance: A Pilot Study. *Animals*. 7 mars 2019. Vol. 9, n° 3, pp. 84. DOI 10.3390/ani9030084.

REED, Stephen M., BAYLY, Warwick M. et SELTON, Debra C., 2018. *Equine internal medicine*. . 4th ed. St. Louis : Elsevier. ISBN 978-0-323-44329-6. 636.108 96 Devoted solely to internal medicine, this problem-oriented book is organized into two primary sections. Part one focuses on the mechanisms underlying disease and the principles underlying treatment. Part two discusses individual diseases

ROSSI-DURAND, C., 2006. Proprioception and myoclonus. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*. septembre 2006. Vol. 36, n° 5-6, pp. 299-308. DOI 10.1016/j.neucli.2006.11.001.

SAEKI, Kaori, KUTARA, Kenji, IWATA, Eri, MIYABE, Masahiro, SHIMIZU, Yuki, WADA, Yuko, OHNISHI, Akihiro, MATSUDA, Akira, MIYAMA, Takako Shimokawa et ASANUMA, Taketoshi, 2021. Noninvasive Thermographic Photographing as an Assessment of the State of Discomfort in a Dog Receiving Radiation Therapy. *Animals*. 25 août 2021. Vol. 11, n° 9, pp. 2496. DOI 10.3390/ani11092496.

SÁNCHEZ-CAUCE, Raquel, PÉREZ-MARTÍN, Jorge et LUQUE, Manuel, 2021. Multi-input convolutional neural network for breast cancer detection using thermal images and clinical data. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. Juin 2021. Vol. 204, pp. 106045. DOI 10.1016/j.cmpb.2021.106045.

SATO, Nadia Yuri Shimosaka, BASTOS, Bárbara Buff Blumer, PEREIRA, Marco Aurélio Amador, CAMPOS, Karina D'Angelo, AMBRÓSIO, Aline Magalhaes, FORMENTON, Maira Rezende et FANTONI, Denise Tabacchi, 2020. Myofascial Pain Syndrome, myofascial trigger points and trigger points in Veterinary Medicine. *Brazilian Journal of Veterinary Research and Animal Science*. 13 juillet 2020. Vol. 57, n° 2, pp. e164351. DOI 10.11606/issn.1678-4456.bjvras.2020.164351.

SCHIAVON, Guglielmo, CAPONE, Gianluigi, FRIZE, Monique, ZAFFAGNINI, Stefano, CANDRIAN, Christian et FILARDO, Giuseppe, 2021. Infrared Thermography for the Evaluation of Inflammatory and Degenerative Joint Diseases: A Systematic Review. *CARTILAGE*. décembre 2021. Vol. 13, n° 2_suppl, pp. 1790S-1801S. DOI 10.1177/19476035211063862.

SHAH, Jay P., THAKER, Nikki, HEIMUR, Juliana, AREDO, Jacqueline V., SIKDAR, Siddhartha et GERBER, Lynn, 2015. Myofascial Trigger Points Then and Now: A Historical and Scientific Perspective. *PM&R*. juillet 2015. Vol. 7, n° 7, pp. 746-761. DOI 10.1016/j.pmrj.2015.01.024.

SOROKO, M., HOWELL, K., DUDEK, K., WALICZEK, A., MICEK, P. et FLAGA, J., 2021. Relationship between maximum eye temperature and plasma cortisol concentration in racehorses during intensive training. *Polish Journal of Veterinary Sciences*. 2021. Vol. 24, n° 3, pp. 393-397. DOI 10.24425/PJVS.2021.138730.

SOROKO, Maria, 2012. The Use of Thermography to Evaluate Back Musculoskeletal Responses of Young Racehorses to Training. In : *EAT European Association of Thermology*. University of Porto : Thermology international journal. 2012.

SOROKO, Maria, CWYNAR, Przemysław, HOWELL, Kevin, YARNELL, Kelly, DUDEK, Krzysztof et ZABORSKI, Daniel, 2018. Assessment of Saddle Fit in Racehorses Using Infrared Thermography. *Journal of Equine Veterinary Science*. avril 2018. Vol. 63, pp. 30-34.

DOI 10.1016/j.jevs.2018.01.006.

STERNBERSKY, Jan, TICHY, Martin et ZAPLETALOVA, Jana, 2021. Infrared thermography and capillaroscopy in the diagnosis of Raynaud's phenomenon. *Biomedical Papers*. 12 mars 2021. Vol. 165, n° 1, pp. 90-98. DOI 10.5507/bp.2020.031.

STILL, Andrew Taylor, 1899. *Philosophy of osteopathy*. Kirksville : A. T. Still. ISBN 978-1-5171-7367-8.

TAN, S. Y. et ZIA, J. K., 2007. Andrew Taylor Still (1828-1917): founder of osteopathic medicine. *Singapore Medical Journal*. Novembre 2007. Vol. 48, n° 11, pp. 975-976.

TATTERSALL, Glenn J., 2016. Infrared thermography: A non-invasive window into thermal physiology. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*. décembre 2016. Vol. 202, pp. 78-98. DOI 10.1016/j.cbpa.2016.02.022.

TOZZI, Paolo, 2012. Selected fascial aspects of osteopathic practice. *Journal of Bodywork and Movement Therapies*. octobre 2012. Vol. 16, n° 4, pp. 503-519. DOI 10.1016/j.jbmt.2012.02.003.

TUNLEY, B. V. et HENSON, F. M. D., 2004. Reliability and repeatability of thermographic examination and the normal thermographic image of the thoracolumbar region in the horse. *Equine Veterinary Journal*. 2004. Vol. 36, n° 4, pp. 306-312. DOI 10.2746/0425164044890652.

TURNER, Tracy A., 2001. Diagnostic thermography. 2001. Vol. 17, n° 1.

TURNER, Tracy A., MARCELLA, Ken, RIEGEL, Ron, GODBOLD, John, MUNIZ HONORIO, Kellyagnes, SCHWARTZ, Robert G., CAMPBELL, James et BRIOSCHI, Marcos, 2021. *Veterinary guidelines for infrared thermography*. 2021. American academie of thermography.

USAMENTIAGA, 2014. Infrared Thermography for Temperature Measurement and Non-Destructive Testing. [en ligne]. 2014. [Consulté le 14 juillet 2021]. Disponible à l'adresse : <http://www.mdpi.com/journal/sensors>

UVED (UNIVERSITÉ VIRTUELLE ENVIRONNEMENT ET DÉVELOPPEMENT DURABLE), 2008. *ENVCAL - Suivi de l'environnement par télédétection* [en ligne]. 2008. Université de Rennes. [Consulté le 1 mars 2022]. Disponible à l'adresse : <https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uvved/envcal/html/rayonnement/2-rayonnement-matiere/index.html>

VAZQUEZ-DELGADO, E., CASCOS-ROMERO, J. et GAY-ESCODA, C., 2009. Myofascial pain syndrome associated with trigger points: A literature review. (I): Epidemiology, clinical treatment and etiopathogeny. *Medicina Oral Patología Oral y Cirugía Bucal*. 2009. pp. e494-e498. DOI 10.4317/medoral.14.e494.

VINCENT, D., 2003. *Le rayonnement thermique et la loi du Corps Noir* [en ligne]. 21 octobre 2003. ENS Lyon. [Consulté le 23 avril 2021]. Disponible à l'adresse : <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/bilan-radiatif-terre1.xml>

WALA, Hassis, 2014. *Etude de structures avancées pour la détection IR quantique à haute température*. . Physique. Université de Grenoble.

WESTERMANN, Simone, BUCHNER, Heinz H. F., SCHRAMEL, Johannes P., TICHY, Alexander et STANEK, Christian, 2013. Effects of infrared camera angle and distance on measurement and

reproducibility of thermographically determined temperatures of the distolateral aspects of the forelimbs in horses. *Journal of the American Veterinary Medical Association*. Février 2013. Vol. 242, n° 3, pp. 388-395. DOI 10.2460/javma.242.3.388.

WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2010. Benchmarks for training in traditional / complementary and alternative medicine: benchmarks for training in osteopathy. [en ligne]. 2010. [Consulté le 2 février 2022]. Disponible à l'adresse : <https://apps.who.int/iris/handle/10665/44356>

YAHAV, S. et GILOH, M., 2012. Infrared Thermography - Applications in Poultry Biological Research. In : PRAKASH, Raghu V (éd.), *Infrared Thermography*. [en ligne]. InTech. [Consulté le 24 décembre 2021]. ISBN 978-953-51-0242-7.

ZANINELLI, Mauro, REDAELLI, Veronica, LUZI, Fabio, BRONZO, Valerio, MITCHELL, Malcolm, DELL'ORTO, Vittorio, BONTEMPO, Valentino, CATTANEO, Donata et SAVOINI, Giovanni, 2018. First Evaluation of Infrared Thermography as a Tool for the Monitoring of Udder Health Status in Farms of Dairy Cows. *Sensors*. 14 mars 2018. Vol. 18, n° 3, pp. 862. DOI 10.3390/s18030862.

ZANUTO, Erika B. M., MELO, Samanta R., JANUÁRIO, Eric V., FERNANDES, Gustavo A. A. L. et MATERA, Julia M., 2021. Diagnostic Value and Application of Infrared Thermography in the Analysis of Circumanal Gland Tumors. *Frontiers in Veterinary Science*. 27 juillet 2021. Vol. 8, pp. 692221. DOI 10.3389/fvets.2021.692221.

Camille LALANNE

ÉVOLUTION DU THERMOGRAMME DU DOS DU CHEVAL APRÈS UNE SÉANCE D'OSTÉOPATHIE
HORSES BACK THERMOGRAMS EVOLUTION AFTER AN OSTEOPATHY SESSION

Thèse d'État de Doctorat Vétérinaire : Nantes, le 27 juin 2022

RESUME en français (1700 caractères)

Le développement des médecines complémentaires telles que l'ostéopathie, a contribué à démocratiser cette dernière. Il est intéressant de remarquer que l'ostéopathie fait désormais pleinement partie du suivi médical de nombreux chevaux de sport, au point que l'intervention d'un ostéopathe est fréquemment sollicitée avant même le recours à un vétérinaire, en cas d'affection de l'appareil locomoteur. En raison de l'intérêt grandissant dont l'ostéopathie fait l'objet, cette thèse cherche à objectiver, grâce à la technologie infrarouge, une amélioration de la symétrie dorsale des chevaux à la suite d'un traitement l'ostéopathique. Considérant les asymétries thermiques présentes sur le dos de 14 chevaux, leurs évolutions à 2 heures et à 7 jours après une séance d'ostéopathie ont été étudiées, puis comparées aux asymétries thermiques dorsales relevées sur 12 chevaux témoins. L'analyse des résultats a révélé une diminution significative de leur nombre sur les chevaux traités par rapport aux chevaux témoins, à échéance de 2 heures mais également de 7 jours après le traitement. Il semblerait ainsi que la pratique de l'ostéopathie favorise la résolution des asymétries thermiques dorsales. En revanche, l'apparition de ces dernières ne semble pas significativement impactée par la réalisation du traitement ostéopathique. Pour parfaire le lien entre dysfonctionnement ostéopathique et température cutanée suggérée par la règle artérielle, il serait intéressant, dans une future étude, d'étudier la relation entre le diagnostic ostéopathique et le thermogramme des chevaux.

MOTS CLES :

- cheval
- dos
- thermographie
- ostéopathie

DATE DE SOUTENANCE : lundi 27 juin 2022