




OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible

This is an author's version published in: <http://oatao.univ-toulouse.fr/> 26842

To cite this version:

Fauquet, Canelle . *Étude de l'utilisation de l'imagerie thermique des articulations chez le chien de traineaux en condition de course : description chez le chien sain et application de cas cliniques lors de la grande odyssée 2020*. Thèse d'exercice, Médecine vétérinaire, Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse – ENVT, 2020, 108 p.

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: tech-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr

ETUDE DE L'UTILISATION DE L'IMAGERIE THERMIQUE DES ARTICULATIONS CHEZ LE CHIEN DE TRAINAUX EN CONDITION DE COURSE : DESCRIPTION CHEZ LE CHIEN SAIN ET APPLICATION DES CAS CLINIQUES LORS DE LA GRANDE ODYSSEE 2020

THESE
pour obtenir le grade de
DOCTEUR VETERINAIRE

DIPLOME D'ETAT

*présentée et soutenue publiquement devant
l'Université Paul-Sabatier de Toulouse*

par

Canelle FAUQUET
Née, le 23/03/1995 à SALLANCHES (74)

Directrice de thèse : Mme Géraldine JOURDAN

JURY

PRESIDENT :
M. Christian VIRENQUE

Professeur à l'Université Paul-Sabatier de TOULOUSE

ASSESEURS :
Mme Géraldine JOURDAN
Giovanni MOGICATO

Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE **M.**
Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

MEMBRE INVITE :
Mme Caroline DIDIER

Assistante Hospitalière à l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse

Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation
ÉCOLE NATIONALE VÉTÉRINAIRE DE TOULOUSE

Directeur: Professeur Pierre SANS

PROFESSEURS CLASSE EXCEPTIONNELLE

- M. **BERTAGNOLI Stéphane**, *Pathologie infectieuse*
- M. **BOUSQUET-MELOU Alain**, *Pharmacologie –Thérapeutique*
- Mme **CHASTANT-MAILLARD Sylvie**, *Pathologie de la Reproduction*
- Mme **CLAUW Martine**, *Pharmacie-Toxicologie*
- M. **CONCORDET Didier**, *Mathématiques, Statistiques, Modélisation*
- M. **DELVERDIER Maxence**, *Anatomie Pathologique*
- M. **ENJALBERT Francis**, *Alimentation*
- Mme **GAYRARD-TROY Véronique**, *Physiologie de la Reproduction, Endocrinologie*
- M. **PETIT Claude**, *Pharmacie et Toxicologie*
- M. **SHELCHER François**, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de Basse-cour*

PROFESSEURS 1° CLASSE

- M. **BAILLY Jean-Denis**, *Hygiène et Industrie des aliments*
- M. **BERTHELOT Xavier**, *Pathologie de la Reproduction*
- Mme **BOURGES-ABELLA Nathalie**, *Histologie, Anatomie pathologique*
- M. **BRUGERE Hubert**, *Hygiène et Industrie des aliments d'Origine animale*
- Mme **CADIERGUES Marie-Christine**, *Dermatologie Vétérinaire*
- M. **DUCOS Alain**, *Zootchnie*
- M. **FOUCRAS Gilles**, *Pathologie des ruminants*
- M. **GUERIN Jean-Luc**, *Aviculture et pathologie aviaire*
- Mme **HAGEN-PICARD Nicole**, *Pathologie de la reproduction*
- M. **JACQUIET Philippe**, *Parasitologie et Maladies Parasitaires*
- M. **LEFEBVRE Hervé**, *Physiologie et Thérapeutique*
- M. **MEYER Gilles**, *Pathologie des ruminants*
- Mme **TRUMEL Catherine**, *Biologie Médicale Animale et Comparée*

PROFESSEURS 2° CLASSE

- Mme **BOULLIER Séverine**, *Immunologie générale et médicale*
- Mme **DIQUELOU Armelle**, *Pathologie médicale des Equidés et des Carnivores*
- M. **GUERRE Philippe**, *Pharmacie et Toxicologie*
- Mme **LACROUX Caroline**, *Anatomie Pathologique, animaux d'élevage*
- Mme **LETRON-RAYMOND Isabelle**, *Anatomie pathologique*
- M. **MAILLARD Renaud**, *Pathologie des Ruminants*
- M. **MOGICATO Giovanni**, *Anatomie, Imagerie médicale*
- M. **RABOISSON Didier**, *Productions animales (ruminants)*

PROFESSEURS CERTIFIÉS DE L'ENSEIGNEMENT AGRICOLE

- Mme **MICHAUD Françoise**, *Professeur d'Anglais*
- M. **SEVERAC Benoît**, *Professeur d'Anglais*

MAÎTRES DE CONFÉRENCES (HORS CLASSE)

- M. **BERGONIER Dominique**, *Pathologie de la Reproduction*
- Mme **CAMUS Christelle**, *Biologie cellulaire et moléculaire*
- M. **JAEG Jean-Philippe**, *Pharmacie et Toxicologie*
- M. **LYAZRHI Faouzi**, *Statistiques biologiques et Mathématiques*
- M. **MATHON Didier**, *Pathologie chirurgicale*
- Mme **MEYNADIER Annabelle**, *Alimentation*
- Mme **PRIYMENKO Nathalie**, *Alimentation*
- M. **VOLMER Romain**, *Microbiologie et Infectiologie*

MAÎTRES DE CONFÉRENCES (CLASSE NORMALE)

- M. **ASIMUS Erik**, *Pathologie chirurgicale*
- Mme **BENNIS-BRET Lydie**, *Physique et Chimie biologiques et médicales*
- Mme **BIBBAL Delphine**, *Hygiène et Industrie des Denrées alimentaires d'Origine animale*
- Mme **BOUHSIRA Emilie**, *Parasitologie, maladies parasitaires*
- M. **CONCHOU Fabrice**, *Imagerie médicale*
- M. **CORBIERE Fabien**, *Pathologie des ruminants*
- Mme **DANIELS Hélène**, *Immunologie-Bactériologie-Pathologie infectieuse*
- Mme **DAVID Laure**, *Hygiène et Industrie des aliments*
- Mme **DEVIERS Alexandra**, *Anatomie-Imagerie*
- M. **DOUET Jean-Yves**, *Ophthalmologie vétérinaire et comparée*
- Mme **FERRAN Aude**, *Physiologie*
- Mme **GRANAT Fanny**, *Biologie médicale animale*
- Mme **JOURDAN Géraldine**, *Anesthésie – Analgésie*
- Mme **LALLEMAND Elodie**, *Chirurgie des Equidés*
- Mme **LAVOUE Rachel**, *Médecine Interne*
- M. **LE LOC'H Guillaume**, *Médecine zoologique et santé de la faune sauvage*
- M. **LHERMIE Guillaume**, *Economie de la santé animale*
- M. **LIENARD Emmanuel**, *Parasitologie et maladies parasitaires*
- Mme **MEYNAUD-COLLARD Patricia**, *Pathologie Chirurgicale*
- Mme **MILA Hanna**, *Elevage des carnivores domestiques*
- M. **NOUVEL Laurent**, *Pathologie de la reproduction*
- Mme **PALIERNE Sophie**, *Chirurgie des animaux de compagnie*
- Mme **PAUL Mathilde**, *Epidémiologie, gestion de la santé des élevages avicoles et porcins*
- M. **VERGNE Timothée**, *Santé publique vétérinaire – Maladies animales règlementées*
- Mme **WASET-SZKUTA Agnès**, *Production et pathologie porcine*

ASSISTANTS D'ENSEIGNEMENT CONTRACTUELS

- M. **DIDIMO IMAZAKI Pedro**, *Hygiène et Industrie des aliments*
- M. **LEYNAUD Vincent**, *Médecine interne*
- Mme **ROBIN Marie-Claire**, *Ophthalmologie*
- Mme **ROMANOS Lola**, *Pathologie des ruminants*

ASSISTANTS D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE CONTRACTUELS

- Mme **BLONDEL Margaux**, *Chirurgie des animaux de compagnie*
- M. **CARTIAUX Benjamin**, *Anatomie-Imagerie médicale*
- M. **COMBARROS-GARCIA Daniel**, *Dermatologie vétérinaire*
- M. **GAIDE Nicolas**, *Histologie, Anatomie Pathologique*
- M. **JOUSSERAND Nicolas**, *Médecine interne des animaux de compagnie*
- M. **LESUEUR Jérémy**, *Gestion de la santé des ruminants – Médecine collective de précision*
- M. **TOUITOU Florian**, *Alimentation animale*

REMERCIEMENTS

A notre Jury de thèse :

A Monsieur le Professeur Christian VIRENQUE

Professeur des Universités Paul Sabatier de Toulouse, praticien hospitalier,
Anesthésiologie,
Qui nous a fait l'honneur d'accepter la présidence du jury de cette thèse. Veuillez trouver ici l'expression de mes remerciements et hommages respectueux.

A Madame le Maître de Conférences Géraldine JOURDAN,

Maître de Conférences à L'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse
Anesthésie - Analgésie
Qui nous a fait l'honneur de diriger cette thèse. Qu'elle trouve ici l'expression de mes remerciements les plus sincères.

A Monsieur le Maître de Conférences Giovanni MOGICATO,

Professeur à L'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse
Anatomie - Imagerie
Qui nous a fait l'honneur de participer au jury de cette thèse. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Enfin j'adresse mes remerciements et toute ma sympathie :

Au Docteur Caroline Didier, pour son encadrement et son aide indispensable aussi bien sur le terrain que sur le papier. Qu'elle trouve ici l'expression de mes sincères remerciements.

Au Docteur Kimberly Henneman, pour son expertise en thermographie canine et ses précieux conseils. Qu'elle trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

A l'équipe vétérinaire de La Grande-Odyssée 2020, pour sa disponibilité et son aide indispensable à la réalisation de mes nombreuses mesures. Que toute l'équipe trouve ici l'expression de mes remerciements les plus sincères.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	1
TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	7
TABLE DES ANNEXES	10
LEXIQUE DES ABREVIATIONS.....	11
INTRODUCTION	13
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	15
I. La thermographie.....	16
A. L'infrarouge et le rayonnement thermique.....	16
B. Le principe de la thermographie	16
C. Avantages et limites	18
1. Avantages.....	18
2. Limites.....	18
II. Thermorégulation.....	19
A. Physiologie de la thermorégulation	20
1. La boucle de la thermorégulation.....	20
2. La thermolyse.....	21
3. La thermogénèse	22
B. Utilisation de la thermographie lors de lésions inflammatoires.....	22
1. Physiopathologie de l'inflammation lors d'atteintes musculo-squelettiques.....	22
2. Apport de l'imagerie thermique dans la mise en évidence d'atteintes musculo-squelettiques.....	23
III. Applications de la thermographie infrarouge	24
A. Un peu d'histoire	24
B. Applications non médicales.....	24
1. Utilisations militaires	24
2. Amélioration de la compréhension de son environnement.....	25
3. Sécurité et sauvetage.....	25
4. Bâtiments, appareils électriques ... et arts	25
C. Utilisations en médecine humaine	26
1. Atteintes musculaires et ostéo-articulaires.....	26
2. Le syndrome douloureux régional complexe	27

3.	Les troubles de la circulation périphérique	27
4.	Détection de l'hyperthermie	28
5.	Pathologies tumorales	28
6.	Chirurgie à cœur ouvert.....	29
7.	Autres domaines d'application	29
D.	Utilisations en médecine vétérinaire.....	30
1.	Applications dans le domaine équin.....	30
a.	Contrôle du bien-être des chevaux en compétition	30
b.	Utilisation de l'IT lors de l'ajustement de la selle	31
c.	Contrôle des sabots.....	31
d.	Contrôle des performances sportives	32
e.	Utilisation en physiothérapie	32
f.	Utilisations dans le cadre de la recherche	33
2.	Applications en médecine des ruminants.....	33
a.	Détection de maladies infectieuses	33
b.	Détection des mammites	33
c.	Autres applications en cours de développement	34
3.	Applications en médecine aviaire et porcine.....	34
a.	Utilisation de la thermographie dans le cadre du diagnostique.....	35
b.	Apport de la thermographie dans la gestion des conditions d'ambiance	35
4.	Applications dans le domaine de la faune sauvage.....	36
a.	Détection d'animaux et estimation de la taille des populations	36
b.	Détection et suivi de pathologies.....	36
c.	Etude de la thermorégulation	37
d.	Etude du comportement animal	37
5.	Applications en médecine canine	37
a.	Utilisation de l'IT en orthopédie	38
b.	Suivi lors de rééducation	39
c.	Détection de processus tumoraux	39
d.	Autres applications de l'IT chez le chien	40
i.	Utilisation de l'IT pour évaluer l'efficacité de l'acupuncture dans le cas d'arthrite	40

ii.	Utilisation de l'IT dans le cadre de la recherche	40
e.	Utilisation chez les chats	41
i.	Utilisation dans le cas d'hyperthyroïdisme	41
ii.	Evaluation de la douleur par IT.....	42
iii.	Détection de la thromboembolie aortique féline (TEA)	43
6.	Les lignes directrices de l'«American Academy of Thermology»	43
IV.	La Grande Odyssée : Une course de chiens de traîneaux moyennes distances à étapes.	44
A.	Un format de course particulier	44
B.	Impact sur les chiens et principales affections rencontrées	45
V.	Conclusion	46
	ETUDE EXPERIMENTALE	47
	INTRODUCTION	49
	PARTIE A :	50
	Etude thermographique d'un panel de 24 chiens sains.....	50
I.	Objectif de l'étude.....	50
II.	Matériel et méthode	51
A.	Population étudiée et échantillonnage	51
B.	Matériel	52
C.	Design expérimental.....	53
1.	Recueil des informations, examens clinique et orthopédique	53
2.	Acquisition des images thermiques	54
a.	Périodes d'acquisition des images thermiques.....	54
b.	Modalités d'acquisition des images thermiques	54
c.	Mesure de la durée d'acquisition des données	55
3.	Réglage de la caméra thermique	55
4.	Traitement des images, extractions des données et analyse statistique.....	56
a.	Récupération des données brutes	56
b.	Comparaisons des températures moyennes	57
c.	Traitement statistique des données	58
III.	Résultats	59
D.	Première partie : groupe de chiens sains thermographiés lors de l'examen d'admission	59

1.	Données démographiques	59
2.	Utilisation pratique de la caméra thermique	59
3.	Températures de surface obtenues sur les articulations de 24 chiens	59
4.	Influence de la latéralisation sur la température moyenne	60
5.	Influence de l'orientation sur la température moyenne	61
6.	Influence du type racial sur la température moyenne	62
7.	Comparaison des températures moyennes entre les différentes articulations....	63
E.	Deuxième partie : groupe de chiens sains thermographiés 7 à 8 jours après la première acquisition	64
1.	Données démographiques	64
2.	Température de surface moyenne en fonction de l'articulation	64
3.	Influence de la latéralisation sur la température moyenne	65
4.	Influence de l'orientation sur la température moyenne.....	65
5.	Influence du type racial sur la température moyenne	66
6.	Comparaison des températures moyennes de surface entre les différentes articulations.....	67
7.	Comparaison des températures moyennes des différentes articulations et des températures extérieures à J0 et J7-8.....	68
IV.	Discussion	69
V.	Limites de l'étude	72
A.	Limites intrinsèques.....	72
B.	Biais de sélection	73
VI.	Conclusion	73
Partie B : Description de cas cliniques utilisant l'imagerie thermique chez des chiens présentant des lésions musculo-squelettiques, suspectées ou avérées, apparaissant au cours de la course.		
I.	Objectif de l'étude.....	74
II.	Matériel et méthode	74
A.	Description des populations étudiées	74
B.	Matériel	75
C.	Méthode	75
1.	Recueil des données, examens clinique et orthopédique, réglage de la caméra .	75
2.	Acquisition des clichés	75
3.	Analyse des données.....	76

III.	Résultats	76
A.	Données démographiques.....	76
B.	Description des cas cliniques.....	76
1.	Linouk.....	76
a.	Anamnèse, examen orthopédique et examens complémentaires.....	76
b.	Examen thermique	77
c.	Contrôle thermique le 20/01	78
2.	Mystic.....	79
a.	Anamnèse et examen orthopédique	79
b.	Examen thermique	79
3.	Paco.....	80
a.	Anamnèse et examen orthopédique	80
b.	Examen thermique	80
4.	Rübe	80
a.	Anamnèse et examen orthopédique	80
b.	Examen thermique	81
5.	Winnie.....	81
a.	Anamnèse et examen orthopédique	81
b.	Examen thermique	81
6.	Peak.....	82
a.	Anamnèse et examen orthopédique	82
b.	Examen thermique	82
7.	l'Run	83
a.	Anamnèse, examen orthopédique et prise en charge.....	83
b.	Examen thermique	83
8.	Noisette.....	84
a.	Anamnèse, examen orthopédique et examens complémentaires.....	84
b.	Examen thermique	85
9.	Maïko	86
a.	Anamnèse et examen orthopédique	86
b.	Examen thermique	86
10.	Braveheart.....	87

a.	Anamnèse, examen orthopédique et examens complémentaires.....	87
b.	Examen thermique	87
C.	Récapitulatif des cas cliniques	87
1.	Localisation des lésions.....	87
2.	Examens thermiques sans anomalie.....	87
3.	Examens thermiques présentant des anomalies concordant avec l'examen orthopédique.....	88
4.	Autres cas	88
IV.	Discussion et perspectives.....	88
V.	Limites de l'étude	91
A.	Limites intrinsèques.....	91
B.	Biais de sélection	92
VI.	Conclusion	92
	CONCLUSION	93
	BIBLIOGRAPHIE.....	96
	ANNEXES.....	103

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figures :

<i>Figure 1</i> : Spectre des longueurs d'onde.	16
<i>Figure 2</i> : Exemple de thermogramme avec son échelle centrée sur l'épaule d'un chien de profil	17
<i>Figure 3</i> : La thermorégulation chez le chien	20
<i>Figure 4</i> : Thermogramme d'un circuit électrique où l'on observe une augmentation de température sur certains composants.....	25
<i>Figure 5</i> : Thermogramme de cheville d'un enfant souffrant d'arthrite juvénile idiopathique	26
<i>Figure 6</i> : Mise en évidence d'un défaut de circulation sanguine au niveau de la main gauche chez un patient suspecté d'être atteint du syndrome de Raynaud	27
<i>Figure 7</i> : Evolution du thermogramme d'une patiente traitée contre le cancer du sein	28
<i>Figure 8</i> : Thermogramme dorsal d'un cheval après 30 minutes d'entraînement avec selle31	
<i>Figure 9</i> : Mise en évidence d'une diminution de température cutanée liée à la présence de fer, probablement due à une diminution de la circulation sanguine.	32
<i>Figure 10</i> : Thermogramme d'un bâtiment de démarrage	35
<i>Figure 11 a</i> : Thermogramme d'un ours caché dans une forêt	36
<i>Figure 11 b</i> : Thermogramme d'une colonie de chauve-souris volant de nuit	36
<i>Figure 12</i> : Détection d'une zone hypertherme chez un loup du Parc National du Yellowstone.....	37
<i>Figure 13</i> : Thermogramme des antérieurs d'un chien de traineaux acquis lors du check vétérinaire pré-course.....	38
<i>Figure 14</i> : Thermogramme d'une tumeur mammaire droite.....	39
<i>Figure 15</i> : Thermogrammes d'un chat suspecté de présenter de la douleur.	42
<i>Figure 16</i> : Distances et dénivelés parcourus lors de La Grande Odyssée 2020.....	44
<i>Figure 17</i> : Caméra thermique Fluke utilisée lors de l'étude	53
<i>Figure 18</i> : Localisation des zones ciblées lors des acquisitions thermiques.....	55
<i>Figure 19</i> : Exemple d'échelle de température et de palettes utilisées lors de l'acquisition des données.....	55
<i>Figure 20</i> : Exemple de délimitation d'une articulation via le logiciel GRAYESS IRT Cronista	57

<i>Figure 21</i> : Température de surface (moyenne ± écart-type) en fonction de l'articulation à J0	60
<i>Figure 22</i> : Température moyenne de surface (moyenne ± écart-type) en fonction de la latéralisation à J0.....	61
<i>Figure 23</i> : Température moyenne de surface (moyenne ± écart-type) en fonction de l'orientation (F= Face /P= Profil) à J0	62
<i>Figure 24</i> : Température moyenne de surface (moyenne ± écart-type) en fonction du type racial à J0.....	63
<i>Figure 25</i> : Température moyenne de surface (moyenne ± écart-type) en fonction de l'articulation à J7-8.....	64
<i>Figure 26</i> : Température moyenne de surface (moyenne ± écart-type) en fonction de l'articulation et de la latéralisation à J7-8.....	65
<i>Figure 27</i> : Température moyenne de surface (moyenne ± écart-type) en fonction de l'articulation à J7-8.....	66
<i>Figure 28</i> : Température moyenne de surface (moyenne ± écart-type) en fonction du type racial à J7-J8.....	67
<i>Figure 29</i> : Température moyenne de surface (moyenne ± écart-type) en fonction de l'articulation et du jour d'acquisition	68
<i>Figure 30</i> : Thermogrammes des carpes gauche et droit, de face et de profil de Linouk, le 13/01.....	77
<i>Figure 31</i> : Thermogrammes des carpes gauche et droit, de face de Linouk, 20/01.....	78
<i>Figure 32</i> : Thermogrammes des torses gauche et droit, de profil de Mystic, 14/01.....	79
<i>Figure 33</i> : Thermogrammes des carpes droit et gauche, de profil de Rübe, 15/01	81
<i>Figure 34</i> : Thermogrammes des carpes droit et gauche, de face et de profil de Peak, le 15/01.....	82
<i>Figure 35</i> : Thermogrammes des métacarpes droit et gauche de face d'l'Run, 18/01	84
<i>Figure 36</i> : Thermogrammes des carpes droit et gauche, de face et de profil de Noisette, le 19/01	85
<i>Figure 37</i> : Thermogrammes de face et de profil de l'extrémité distale des antérieurs d'un chien réalisé lors de l'examen vétérinaire d'admission à l'Iditarod	90

Tableaux :

<i>Tableau 1</i> : Tableau de randomisation utilisé pour sélectionner les chiens participant à l'étude<	52
<i>Tableau 2</i> : Exemple de tableau Excel répertoriant les données acquises grâce au logiciel d'analyse.....	57
<i>Tableau 3</i> : Températures de surface (moyenne \pm écart-type) de chaque articulation à J0..	59
<i>Tableau 4</i> : Température de surface (moyenne \pm écart-type) en fonction de la latéralisation à J0.....	60
<i>Tableau 5</i> : Température de surface (moyenne \pm écart-type) en fonction de l'orientation à J0.....	61
<i>Tableau 6</i> : Température de surface (moyenne \pm écart-type) en fonction de la race à J0.....	62
<i>Tableau 7</i> : Température moyenne de surface (moyenne \pm écart type) des différentes articulations à J0.....	63
<i>Tableau 8</i> : Température moyenne de surface (moyenne \pm écart type) en fonction de l'articulation à J7-8.....	64
<i>Tableau 9</i> : Température moyenne de surface (moyenne \pm écart-type) en fonction du type racial à J7-8 et J0	66
<i>Tableau 10</i> : Température moyenne de surface (moyenne \pm écart type) des différentes articulations à J7-8.....	67
<i>Tableau 11</i> : Températures moyennes en °C mesurées au niveau du carpe de Linouk, 13/0	78
<i>Tableau 12</i> : Températures moyennes en °C mesurées au niveau du carpe de Linouk, 20/0	78
<i>Tableau 13</i> : Températures moyennes en °C des tarses de Mystic, le 14/01	79
<i>Tableau 14</i> : Températures moyennes en °C des carpes de Peak, le 15/01 (Eurohound)	82
<i>Tableau 15</i> : Températures moyennes en °C des mains d'I'Run, le 18/01 (Husky)	83
<i>Tableau 16</i> : Températures moyennes en °C des coudes, carpe et main gauches et droites de Noisette, le 19/01 (Eurohound)	85

TABLE DES ANNEXES

<i>Annexe 1</i> : Feuille d'examen orthopédique utilisée pour les chiens appartenant à la 2 ^{ème} partie de l'étude	103
<i>Annexe 2</i> : Fiche condition de course	104
<i>Annexe 3</i> : Thermogrammes présentant l'intégralité des articulations étudiées de face et de profil ainsi que leur délimitation, identiques pour tous les animaux thermographiés.....	105
<i>Annexe 4</i> : Grille d'évaluation de la douleur	106

LEXIQUE DES ABREVIATIONS

IT : Imagerie thermique

TS : Température de surface

INTRODUCTION

En Sibérie, les premières preuves d'équipements de trait pour chiens, semblent dater de plus de 9000 ans(1), bien qu'une utilisation régulière du chien de trait ne soit mise en évidence qu'aux alentours de l'an mille. Pour ce qui est de l'Europe, il faudra attendre quelques 800 ans pour trouver les traces d'une utilisation du chien comme animal de trait, qui est alors considéré comme le cheval du pauvre. En effet, le chien permettait aux classes sociales les plus modestes de transporter toutes sortes de charges, que cela soit en ville ou à la campagne. L'utilisation pratique du chien de trait, en Europe, disparaîtra progressivement au cours du XXème siècle pour être rapidement remplacée par une utilisation sportive, puisque la première course européenne de chiens de traîneaux se tiendra à Baugez-Malmedy (Belgique) en 1938(2).

Depuis ce jour, la discipline ne cesse d'évoluer et conjugue à présent respect de l'animal et performances sportives. En effet, entraîner un chien capable de parcourir 1750 km en 8 jours (comme sur l'Iditarod, plus longue course de chiens de traîneaux au monde) requiert une connaissance approfondie de son fonctionnement et de ses besoins. C'est dans cette optique que les équipes vétérinaires mobilisées sur ce type de course mettent en œuvre toutes leurs connaissances et expériences pour prodiguer à ces athlètes de haut niveau les soins adaptés à leurs performances.

Pour cela, un suivi complet et régulier de la santé des animaux est indispensable. Cependant, les conditions inhérentes à ces courses (itinérance, météorologie, températures basses ...) rendent l'utilisation de certains appareils d'imagerie ou d'analyse difficile. Un outil portable, résistant, non invasif et offrant un résultat immédiat et fiable apporterait un confort non négligeable à l'équipe vétérinaire dans l'aide au diagnostic de certaines affections. Cela nous a poussé à nous demander si l'imagerie thermique des articulations pouvait être utilisée lors d'évènement sportif canin et plus précisément lors de course de chiens de traîneaux telle que La Grande Odyssée, afin d'améliorer le suivi orthopédique des athlètes canins.

Il a été prouvé, chez les chevaux et les humains, que la thermographie permettait une détection précoce (jusqu'à plusieurs semaines avant l'apparition des signes cliniques) de lésions musculo-squelettiques(3). Bien que l'on manque encore de données, des chercheurs ont montré(4) que cette technique permet également de détecter ce type de lésions chez le chien. Actuellement, de plus en plus de praticiens vétérinaires exerçant en clientèle type « canine » utilisent l'imagerie thermique dans leur démarche diagnostique lors de suspicion de dysplasie, rupture du ligament croisé crânial, hernie discale ou même hyperthyroïdie chez le chat(5).

L'imagerie thermique est d'ores et déjà utilisée par certains vétérinaires lors de l'examen clinique d'arrivée des chiens participant à l'Iditarod afin de détecter de potentielles lésions musculo-squelettiques. Cependant, le format de course de l'Iditarod, dite longue distance, se déroulant en continu pendant une semaine est sensiblement différent de la

Grande Odyssée Savoie Mont-Blanc. En effet cette dernière se déroule par étapes de moyenne distance avec fort dénivelé, alternant donc phase d'effort intense et de repos prolongé.

Nous avons donc souhaité évaluer la mise en pratique de l'imagerie thermique sur cette course au profil très différent, tant pour les performances sportives des chiens et des mushers que dans la gestion du travail des équipes encadrantes, en particulier l'équipe vétérinaire.

Dans une première partie bibliographique, nous nous intéresserons d'abord aux utilisations de la thermographie dans l'ensemble de ses domaines d'applications. Nous nous concentrerons ensuite sur ses applications médicales afin de déterminer dans quelle mesure l'imagerie thermique peut représenter un atout pour l'équipe vétérinaire d'une course de chiens de traîneaux.

Puis dans une seconde partie, nous présenterons l'étude expérimentale réalisée au cours de la 16^{ème} édition de La Grande Odyssée. Cette étude a pour objectif principal d'évaluer la faisabilité de l'utilisation de l'imagerie thermique dans les conditions de cette course ainsi que les potentiels avantages qu'elle peut offrir à l'équipe vétérinaire.

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I. La thermographie

A. L'infrarouge et le rayonnement thermique

Le rayonnement infrarouge, détectée par les caméras thermiques, est un rayonnement électromagnétique de longueurs d'onde comprises entre 700 nm et 1 mm. C'est-à-dire supérieures à celles de la lumière visible mais inférieures à celles des micro-ondes. Tout objet dont la température est supérieure au zéro absolu émet spontanément un rayonnement infrarouge qualifié de rayonnement thermique. Ce rayonnement provient de la libération d'énergie produite par la mise en mouvement des atomes et molécules d'un corps à une température donnée.

La mise en évidence de ce rayonnement remonte aux années 1800, lorsque Sir William Herschel, un astronome et mathématicien anglais, décide de mesurer la température de chaque couleur grâce à une décomposition de la lumière blanche par un prisme. Il aura alors l'idée de placer son thermomètre au-delà de la bande rouge, là où aucune lumière n'est visible. Il mesure une température encore plus élevée, celle de la lumière infrarouge. En effet, l'émission d'infrarouges est directement liée à la chaleur d'un corps, puisque la température du corps détermine la longueur d'onde des rayons infrarouges émis. Pour des températures pouvant être compatibles avec le vivant (entre -40 et 100°C), le pic d'émission se trouve entre 8 et 12 μ m(6).

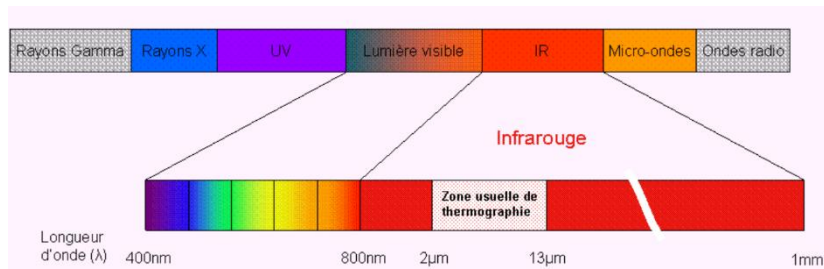


Figure 1 : Spectre des longueurs d'onde.
Source : www.ertherm.free.fr

B. Le principe de la thermographie

On définit la thermographie ou imagerie thermique (IT) comme l'ensemble des procédés donnant une image caractérisant l'émissivité des corps dans l'infrarouge(7).

En effet, comme nous venons de le voir, tout corps émet un rayonnement thermique dans le domaine de l'infrarouge qui se trouve être directement relié à sa température de surface (TS). L'enregistrement de ce rayonnement grâce à un capteur permet l'obtention d'une image appelée thermogramme où l'on peut trouver la TS calculée, en tout point de l'image. Il s'agit donc d'un moyen de mesure de l'énergie thermique émise par un corps.

Une caméra thermique mesure le rayonnement infrarouge R et calcule la température T grâce à la formule de Stefan Boltzmann(6) :

$$R = \epsilon\sigma T^4$$

Avec :

R : rayonnement infrarouge (W/m²)

ϵ = émissivité de la surface : capacité d'une surface à émettre des rayons (aux alentours de 0,98 pour un corps animal en général).

σ = constante de Stefan Boltzmann = 5.67×10^{-8} W/m²/K⁴

T = Température (K).

Pour chaque point du champ d'observation, le rayonnement reçu par le capteur est converti en un signal électrique proportionnel à l'intensité du rayon. En effet, plus la température d'un corps ou d'un objet est élevée, plus le rayonnement est important. Ce signal permet la création d'une cartographie spatiale du flux thermique où chaque point est associé à la température de surface calculée grâce à la loi de Stefan Boltzmann. Différents gradients thermiques et échelles existent, mais la plupart du temps les températures proches du minimum de l'intervalle de température choisi sont dans des teintes violettes, et celles proches du maximum, dans des teintes rouges(8).

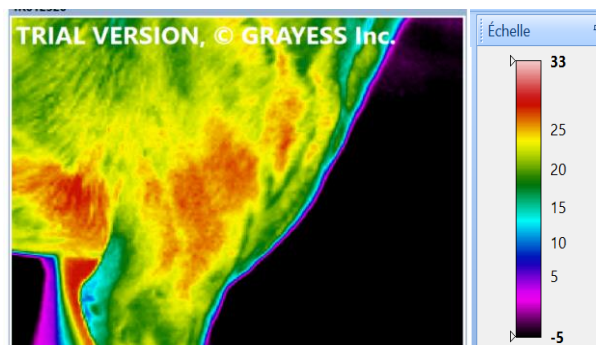


Figure 9 : Exemple de thermogramme avec son échelle centré sur l'épaule d'un chien de profil

Une caméra thermique possède de nombreuses caractéristiques qu'il convient de maîtriser pour être en mesure de choisir celle qui est le plus adaptée à notre utilisation :

- Type de capteur infrarouge : refroidi, offrant une meilleure qualité et précision d'image ou non-refroidi, moins précis mais moins onéreux.
- Game de mesure de la température : à minima entre -20°C et 150°C.
- Précision de la mesure : correspond à la valeur la plus élevée entre $\pm X^\circ\text{C}$ ou $X\%$ de 25°C.
- Sensibilité thermique : capacité à détecter une faible différence de température entre deux pixels. Elle est donnée au dixième de degré Celsius.
- La résolution du capteur : défini par rapport au champ de visée instantané qui correspond au plus petit élément que la caméra peut détecter.

- La taille du capteur : nombre de pixels composant une image.
- Caractéristiques de l'appareil photo numérique : certaines caméras possèdent un appareil photo intégré permettant de visualiser l'objet en plus de son thermogramme.

Une fois les images enregistrées, leur exploitation peut se faire directement sur l'écran de la caméra ou via un logiciel adapté permettant d'interpréter qualitativement (visualisation de zones de déperdition de chaleur par exemple) et quantitativement (température maximale enregistrée, température moyenne, etc) les données.

C. Avantages et limites

1. Avantages

L'imagerie thermique possède de nombreux avantages qui ont contribué à son développement. Les principaux sont :

- Son caractère non invasif et utilisable à distance. Ceci constitue un avantage de taille en médecine vétérinaire puisqu'il limite fortement la contention de l'animal et donc son stress. La patience de l'animal est conservée pour de potentiels examens supplémentaires. La distance allouée par la caméra permet également à l'utilisateur d'être en sécurité lorsqu'elle est utilisée sur des animaux sauvages ou particulièrement algique.
- Une utilisation sans source lumineuse possible. En effet, la détection des rayons infrarouges ne nécessite pas que la cible soit éclairée ce qui permet une utilisation de nuit ou dans des endroits sombres.
- Un résultat immédiat. La caméra produit instantanément un thermogramme et une première lecture qualitative peut être effectuée. Une analyse plus poussée peut ensuite être réalisée grâce à un logiciel d'analyse.
- Une simplicité d'utilisation.

L'imagerie thermique offre donc accès à des informations sur des objets ou animaux éloignés ou en mouvement, difficiles d'accès, dangereux (animaux sauvages, circuit électrique...) et de toute taille.

2. Limites

A ce jour, plusieurs limites empêchent un véritable développement de l'imagerie thermique dans le domaine médical. Les principales sont :

- L'émissivité de la matière composant la surface de l'objet. En effet, plus l'émissivité est faible, plus la quantité d'énergie réfléchie sera importante. Mais puisque l'énergie émise par une surface est proportionnelle à sa température, il devient difficile de déterminer la part

de rayonnement due à l'émission propre de l'objet et la part due à la réflexion. On considère que l'émissivité d'un corps noir (corps incapable de réfléchir de l'énergie) vaut 1. Il a été montré que l'émissivité d'une peau, avec ou sans fourrure, se situait aux alentours de 0,98(9, 10). Cette limite ne s'applique donc pas à l'utilisation de l'imagerie thermique dans le domaine médical. Au contraire par exemple, les métaux sont des matériaux caractérisés par une faible émissivité (aluminium $\epsilon = 0,3$, plomb $\epsilon = 0,4$)(11), qui se prêtent plus difficilement à l'utilisation de l'IT.

- Le milieu entre la caméra thermique et l'élément cible. Des artefacts peuvent être enregistrés lors de vent important, de rayonnement solaire direct chauffant l'objet ou encore lors d'humidité ambiante trop élevée. Pour s'affranchir de cela, une acquisition dans un endroit clos à courte distance de l'élément est recommandée(8).

- La précision de la mesure. La plupart des caméras proposent une précision à $\pm 2\%$, ce qui peut éventuellement poser problème lorsque l'on travaille avec des différences de températures d'un à deux degrés. Cependant, on peut facilement s'affranchir de cette limite grâce à la bonne sensibilité des caméras ($0,04^\circ\text{C}$ dans notre cas) qui permet de comparer deux objets censés avoir la même TS. Dans notre étude, on utilisera cette caractéristique pour comparer les articulations droites et gauches.

- La distance entre la caméra et la cible. Plus la distance augmente et plus la précision de notre mesure diminue. L'utilisation de l'IT à distance, dans le cas de la faune sauvage par exemple, doit donc se limiter à une appréciation qualitative des variations de températures car une approche quantitative présenterait trop d'erreurs de mesure.

- La quantité de poil recouvrant la surface cible. En effet une fourrure épaisse va créer une couche d'air entre la peau et la surface des poils. Or, l'air est un très bon isolant thermique et bloquera donc l'émission d'une partie des rayonnements thermiques, limitant la précision des mesures thermiques chez les animaux à poils longs(12).

La détection et la surveillance de la chaleur émise par le corps sont depuis longtemps utilisées comme moyens de surveillance de l'état clinique d'un patient. Durant l'Antiquité, Hippocrate drapait le torse de ses patients avec un linge recouvert de boue humide pour déterminer la zone la plus chaude, c'est-à-dire celle qui séchait en premier. Il réalisait alors, il y a plus de 2400 ans, le premier thermogramme.

Pour être capable d'interpréter une variation au niveau de la température de surface d'un homme ou animal, une compréhension des mécanismes physiologiques à l'origine de cette différence est nécessaire.

II. Thermorégulation

La thermorégulation correspond au mécanisme permettant le maintien d'une température corporelle optimale indispensable au fonctionnement de l'organisme, sans lequel il ne survivrait pas.

Il existe deux types d'espèces :

- Les poïkilothermes ou animaux à sang froid, qui maintiennent leur température corporelle dans les limites optimales quasi-exclusivement via des échanges d'énergies avec le milieu extérieur. Ils se déplacent dans un environnement plus chaud ou plus froid, selon la nécessité.

- Les homéothermes ou animaux à sang chaud, possèdent eux, de nombreux mécanismes leur permettant de réguler leur température corporelle, quel que soit la température extérieure. Tous les mammifères, dont le chien, appartiennent à cette catégorie(13).

Nous nous limiterons à la thermorégulation des homéothermes dans cette partie.

A. Physiologie de la thermorégulation

La thermorégulation est contrôlée par le cerveau, et plus précisément par l'hypothalamus, via un rétrocontrôle qui lui permet de minimiser les variations de températures autour d'une valeur « normale », qui est espèce et individu-dépendante.

1. La boucle de la thermorégulation

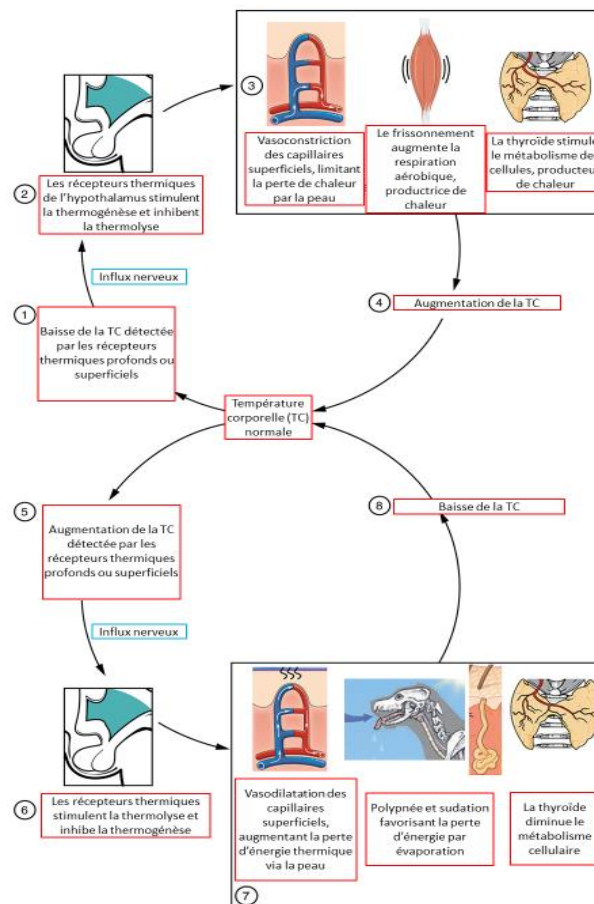


Figure 10 : La thermorégulation chez le chien
Adaptée d'une illustration provenant du livre « Anatomy and Physiology, J. Gordon Betts et al., OpenStax, 2013 »

Comme de nombreux systèmes de régulation physiologique, la thermorégulation peut se décrire suivant trois phases : les signaux thermiques afférents, la régulation centrale et les signaux efférents(14).

Le signal afférent est acquis via les thermorécepteurs, que l'on peut répartir en deux groupes.

Les récepteurs centraux, situés au niveau du territoire vasculaire viscérale, de la moelle épinière et de l'hypothalamus, permettant de réguler la température du noyau thermique (ou température centrale). Et les récepteurs cutanés, avec des récepteurs sensibles au chaud et d'autres au froid, ces derniers étant bien plus nombreux que ceux au chaud.

Une fois l'information perçue, elle est transmise à l'hypothalamus via les fibres nerveuses. En réponse à cette information, l'hypothalamus va stimuler la thermolyse et inhiber la thermogénèse ou inversement suivant le type d'information.

2. La thermolyse

La thermolyse peut être décomposée en deux parties : la thermolyse sensible qui provoque les sensations de chaud et froid et la thermolyse insensible qui se manifeste par l'évaporation d'eau.

La thermolyse sensible, qui est la première à se mettre en place, utilise les trois modes de transferts thermiques et nécessite un gradient de température élevé entre l'enveloppe et l'extérieur pour être efficace :

- La conduction, qui exige un milieu matériel en contact avec l'animal mais qui représente une faible part de la thermolyse.
- La convection, qui exige un renouvellement de la matière autour du corps (eau, air).
- Le rayonnement thermique, base de l'imagerie thermique.

Les tissus sont de mauvais conducteurs thermiques, à l'inverse du sang. Donc pour amener le plus de chaleur possible proche de la peau et disponible au transfert thermique c'est majoritairement par le sang que l'énergie est transférée. Deux processus permettent l'augmentation de cette redistribution sanguine : la vasodilatation des capillaires cutanés et l'ouverture d'anastomoses artérioveineuses.

La thermolyse insensible, correspondra chez le chien à l'évaporation par sudation et par polypnée thermique. Cette dernière se met en place quand la thermolyse sensible ne permet plus de compenser la thermogénèse et correspond au seul moyen de régulation efficace lorsque la température ambiante est supérieure à la température de surface corporelle.

3. La thermogénèse

La thermogénèse se divise en deux origines ; celle obligatoire qui correspond au métabolisme de base et celle facultative correspondant aux dépenses supplémentaires. Cette dernière peut se scinder en thermogénèse mécanique (frissonnement correspondant à une augmentation du tonus musculaire de muscles antagonistes) et chimique. La thermogénèse chimique provoque une accélération du métabolisme et la consommation du tissu adipeux brun. Elle est induite par la sécrétion de certaines hormones : adrénaline, glucagon et glucocorticoïdes principalement pour la réponse à court terme, et hormones thyroïdiennes pour l'adaptation à long terme. La redistribution sanguine sera également limitée avec une fermeture des anastomoses artérioveineuses et une vasoconstriction des capillaires cutanés(15).

La thermorégulation compte donc de nombreux acteurs assurant l'homéothermie, qu'il convient de maîtriser afin d'être capable d'interpréter un thermogramme. Par exemple, un animal venant de réaliser un effort physique émettra plus de chaleur puisqu'il est en train d'éliminer l'excès de chaleur produit par l'activité musculaire. A l'inverse lors de froid intense, la température de la peau des extrémités peut approcher la température ambiante suite à la vasoconstriction des vaisseaux périphériques.

Un autre type de modification thermique, qui nous intéresse particulièrement dans le contexte de notre étude, est celle liée aux lésions inflammatoires.

B. Utilisation de la thermographie lors de lésions inflammatoires

1. Physiopathologie de l'inflammation lors d'atteintes musculo-squelettiques

Lors de lésions ostéo-articulaires ou musculaires sans infraction cutanée, l'organisme met en place une réponse inflammatoire stérile(16). Classiquement, cette réponse se divise en trois phases :

- Une phase vasculaire, caractérisée par une vasodilatation avec augmentation du débit sanguin au niveau de la microcirculation irrigant la région lésée. On observera localement de la chaleur et une rougeur.

En parallèle, la perméabilité vasculaire augmente et les liquides plasmatiques se répandent dans les tissus, entraînant la formation d'un œdème et l'apparition de la douleur et de l'incapacité fonctionnelle, caractéristique d'une lésion inflammatoire.

- Une phase cellulaire, qui fait suite à l'augmentation de la perméabilité vasculaire facilitant le passage des leucocytes des vaisseaux sanguins vers le site lésé (diapédèse). Ces derniers permettront l'élimination des débris cellulaires par phagocytose.

- La réparation des tissus, qui se fait par régénération (prolifération de cellules de même type que les cellules détruites) ou remplacement (formation d'une cicatrice)(17).

2. Apport de l'imagerie thermique dans la mise en évidence d'atteintes musculo-squelettiques

La température de la peau reflète directement la circulation sanguine et le métabolisme du tissu sous-jacent(18, 19). Une image thermique anormale, peut donc indiquer une zone d'inflammation ou de circulation sanguine altérée. Il a été montré que, chez les chevaux, une augmentation de chaleur détectée par caméra thermique associée à une inflammation clinique était liée à une augmentation du métabolisme et de la circulation sanguine locale. A l'inverse, une région plus froide est associée à une diminution de la perfusion tissulaire secondaire à une vasoconstriction et à la fermeture des territoires de microcirculation(3).

Pour ce qui est de la cinétique thermique de l'inflammation, une étude réalisée sur des rats a montré que, lors d'un traumatisme, on observait dans un premier temps une chute de la température locale, mise en évidence 10 minutes après le traumatisme. En effet, le stimulus nociceptif entraîne l'activation du système nerveux sympathique conduisant à une vasoconstriction du territoire vasculaire de la région lésée. Cela provoque une ischémie locale qui se manifeste par une diminution locale de la température.

Cependant, cette diminution est rapidement remplacée par une augmentation de la température locale suite à la mise en place de l'inflammation. Au cours de cette même étude, l'augmentation maximale de température était détectée 72h après le traumatisme bien qu'elle soit déjà présente 24h après (pas de données disponibles entre 10 min et 24h post-traumatisme)(20).

Cette étude ne retranscrit qu'un type de traumatisme chez une seule espèce, mais elle permet d'envisager l'utilité potentielle de l'imagerie thermique dans le suivi des lésions inflammatoires. D'après certains auteurs, l'imagerie thermique permettrait également de mettre en évidence des modifications thermiques plusieurs semaines avant l'apparition des premiers signes cliniques ou radiographiques lors de lésions orthopédiques chez le cheval(3).

L'imagerie thermique semble donc bien représenter un outil diagnostique non invasif, portable et apportant un résultat rapide qui permet la mise en évidence de la réaction inflammatoire rencontrée lors de lésions ostéo-articulaires et musculaires. De plus, il se peut que cette technique présente une meilleure sensibilité quant à la détection précoce de certains types de lésions, par rapport à d'autres techniques d'imagerie. Cependant, sa spécificité reste faible puisque toute inflammation entraîne une production de chaleur. Elle doit donc être utilisée en association avec d'autres outils diagnostiques telles que l'échographie, la radiographie, l'IRM ou le scanner.

III. Applications de la thermographie infrarouge

A. Un peu d'histoire

Les premiers détecteurs thermiques, au sens moderne du terme, voient le jour durant la première guerre mondiale et servent, entre autres, à détecter des troupes ou avions ennemis. De nombreuses avancées technologiques verront le jour au cours des décennies futures et notamment durant la seconde guerre mondiale, mais il faudra attendre les années 60 pour voir la technologie être utilisée à des fins non militaires. Au cours de cette décennie de nombreuses études sont publiées à ce sujet et des groupes de scientifiques dédiés à l'imagerie thermique, tel que « The American Academy of Thermology », voient le jour.

Dans les années 70, l'arrivée des mini-ordinateurs ayant des écrans couleurs et des nouvelles puissances de calculs permettent l'analyse et le stockage des images thermiques. En 1982, la commission américaine du médicament (« The Federal Drug Commission »), approuve l'utilisation de l'imagerie thermique lorsque « des variations de températures cutanées peuvent être observées ». Il faudra attendre les années 90 pour voir un vrai développement des utilisations industrielles de l'imagerie thermique. Ce n'est qu'à ce moment-là que la production augmentera permettant une baisse des prix et une généralisation de son utilisation.

De nos jours, une seule image peut contenir plusieurs milliers de points de température, capturés en une fraction de seconde(10). Les systèmes offrent donc une image de haute résolution, qui, associée aux nouvelles technologies informatiques, permettent une analyse précise des thermogrammes. Au niveau médical, l'imagerie thermique est désormais reconnue comme un outil diagnostique fiable avec des applications standardisées dans de nombreux domaines(10, 21).

B. Applications non médicales

1. Utilisations militaires

Dans l'armée, l'imagerie thermique est principalement utilisée afin de détecter l'ennemi. On retrouve des caméras thermiques longues portées sur des véhicules, postes d'observation de bases militaires ou embarquées dans des avions, afin de localiser rapidement les dangers menaçant les forces armées. La thermographie est également intégrée dans les systèmes de détection de mouvement, en raison de sa capacité à fonctionner dans toutes les conditions météorologiques(22).

2. Amélioration de la compréhension de son environnement

Que cela soit pour les conducteurs de poids lourds, les capitaines de bateaux ou les pilotes d'avions, la conduite de nuit ou dans de mauvaises conditions météorologiques peut rapidement devenir fatigante et dangereuse. L'IT permet alors d'améliorer la vision du conducteur en lui permettant de voir jusqu'à 5 fois plus loin qu'avec des phares, ne nécessite aucune source de lumière et permet de voir à travers le brouillard et la pluie légère. Cette technologie est de plus en plus utilisée sur les véhicules d'urgence (camions de pompier, ambulance, ...). De plus, en cas d'incendie, les caméras thermiques des véhicules permettent aux pompiers de voir à travers la fumée, et donc de s'approcher du feu sans créer d'accident supplémentaire. Les caméras portables sont ensuite utilisées pour distinguer les points chauds ou localiser les personnes dans un bâtiment totalement enfumé.

Dans le cas des bateaux, en plus de faciliter la navigation, l'imagerie thermique peut permettre de localiser une personne tombée par-dessus bord s'il est impossible de la repérer visuellement(23).

3. Sécurité et sauvetage

Tout bâtiment nécessitant un système de surveillance (centrales nucléaires, entrepôts, installations pétrochimiques, ...) peut utiliser l'imagerie thermique. Là encore, cette technique permet de discerner des individus dans le noir ou lorsque les conditions météorologiques rendent impossible l'utilisation de caméra classique.

De la même façon, des personnes en détresse peuvent être localisées grâce à l'imagerie thermique par les équipes de secours(23).

4. Bâtiments, appareils électriques ... et arts

Une des utilisations les plus courantes de l'imagerie thermique est la visualisation des défauts d'isolation et autres anomalies de construction d'un bâtiment. Elle peut aussi permettre la mise en évidence de défaillances d'appareils électriques (surcharge, déséquilibre de phase, mauvais sertissage ...) afin de prévenir les incendies.

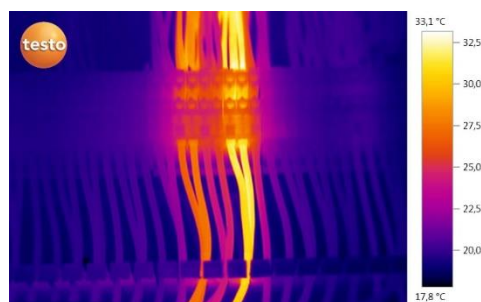


Figure 11 :

Thermogramme d'un circuit électrique où l'on observe une augmentation de température sur certains composants

Source : www.thethermographiclibrary.org

Une utilisation moins connue de l'imagerie thermique est celle dans le domaine de l'art. Elle peut être utilisée comme technique non destructive d'analyse des œuvres d'art, en particulier pour l'identification de défauts se trouvant au niveau des couches profondes, non visibles.

C. Utilisations en médecine humaine

L'utilisation médicale de l'imagerie thermique est d'ores et déjà très variées et ne cesse de se développer. Depuis plus de 50 ans, la thermographie a principalement été utilisée comme moyen de mesure pour la recherche. Elle a permis d'étudier de nombreuses maladies caractérisées par une inflammation ou une modification du flux sanguin. Cependant, en principe, cette technique peut aussi être utilisée à des fins diagnostiques.

1. Atteintes musculaires et ostéo-articulaires

Une des utilisations médicales qui vient le plus facilement à l'esprit lorsqu'on pense à l'utilisation d'une caméra thermique est la mise en évidence d'une lésion inflammatoire. L'imagerie thermique peut en effet être utilisée sur tous types d'inflammations se trouvant suffisamment proche de la peau pour être détectée par le capteur de la caméra. Nous détaillerons deux exemples parmi les plus couramment rencontrés.

- Arthrite inflammatoire et arthrose :

Depuis des centaines d'années les médecins se servent du toucher pour détecter une différence de chaleur entre deux articulations. Cependant certains changements plus subtils de températures, détectables à la caméra thermique, peuvent permettre une localisation plus précise de l'inflammation ou un suivi de l'amélioration/aggravation de la lésion au cours du temps. Cette technique a déjà été utilisée dans plusieurs travaux de recherches, afin, par exemple, de déterminer l'efficacité des anti-inflammatoires stéroïdiens dans la réduction de l'inflammation lors d'arthrite rhumatoïde(24, 25).



Figure 12 :
Thermogramme de la cheville d'un enfant souffrant d'arthrite juvénile idiopathique
Source : www.thethermographiclibrary.org

- Atteinte musculaire :

La contraction musculaire est la première source de production de chaleur métabolique. Des pathologies telles que les spasmes musculaires ou le syndrome myofascial douloureux (« myofascial trigger points »), peuvent être localisés grâce à l'imagerie thermique. Les lésions musculaires aiguës peuvent aussi être repérées suite à l'augmentation de température due à l'inflammation. Cependant, les blessures anciennes, cicatrices ou douleurs articulaires chroniques, apparaîtront plutôt hypothermiques suite à la diminution de la contraction musculaire entraînée par la douleur.

2. Le syndrome douloureux régional complexe

Ce syndrome neurologique est caractérisé par des symptômes tels que de la douleur, des troubles vasomoteurs et/ou une déminéralisation épiphysaire, touchant typiquement une extrémité après un traumatisme ou une intervention chirurgicale même minime. L'origine de ces symptômes est mal connue mais une dysfonction des fibres de petit calibre des nerfs périphériques protégeant des stimulations douloureuses et thermiques et/ou de grand calibre qui détectent les stimulations tactiles, est envisagée.

Une différence de température supérieure à 1°C entre le membre affecté et le membre sain est un des critères diagnostiques de ce syndrome(27). L'imagerie thermique est également utilisée pour suivre l'évolution clinique du patient au cours du traitement.

3. Les troubles de la circulation périphérique

Parmi ces troubles, la thermographie est principalement utilisée dans le cadre de la maladie de Raynaud, qui correspond à une diminution du flux sanguin vers les extrémités lors d'exposition au froid ou au stress. Elle est plus rarement utilisée lors du syndrome des vibrations affectant les doigts, mains et avant-bras en provoquant un blêmissement épisodique des doigts, une hypoesthésie, et la perte de la sensibilité nerveuse.

Un des tests classiques pour diagnostiquer un syndrome de Raynaud consiste à quantifier, par imagerie thermique, la réaction vasospastique observée suite à l'immersion des mains du patient dans un volume d'eau à 20°C durant une minute. Ce test est également utilisé lors d'essais cliniques sur des traitements vasodilatateurs(28).

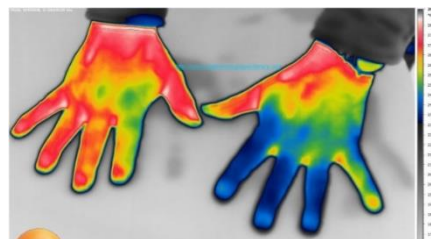


Figure 16 :

Mise en évidence d'un défaut de circulation sanguine au niveau de la main gauche chez un patient suspecté d'être atteint du syndrome de Raynaud.

Source : www.thethermographiclibrary.org

4. Détection de l'hyperthermie

Nous sommes actuellement au cœur de l'épidémie due au nouveau Coronavirus (COVID-19) dont un des principaux symptômes se trouve être la fièvre. De nombreux aéroports et autres lieux de transits se sont équipés de caméras thermiques afin de détecter les voyageurs présentant une hyperthermie. Cependant, plusieurs études(29, 30) ont montré que seule une image nette du visage prise à la bonne distance (environ 2m) permet de donner une réelle approximation de la présence ou absence de fièvre. Il n'est donc pas possible d'utiliser l'imagerie thermique sur un regroupement de personne éloigné du capteur et se déplaçant. Pour éviter ce genre de dérives, « The International Standards Organization » publie régulièrement des mises à jour de ses normes ISO sur les caractéristiques des caméras utilisables et sur les méthodes d'utilisation standardisées, qui ne sont malheureusement pas toujours respectées.

5. Pathologies tumorales

Les cellules cancéreuses sont caractérisées par une vitesse de croissance et multiplication élevées, ce qui entraîne une augmentation du flux sanguin (nécessaire à l'apport de métabolites) et du métabolisme cellulaire, deux processus générateurs de chaleur. Il y a plus de 60 ans déjà, les chercheurs croyaient au potentiel de cette technique dans le dépistage du cancer du sein. Malheureusement, la praticité et la fiabilité de la technique restaient limitées. Puis l'arrivée de l'échographie et de la mammographie lui ont rapidement fait perdre de l'intérêt.

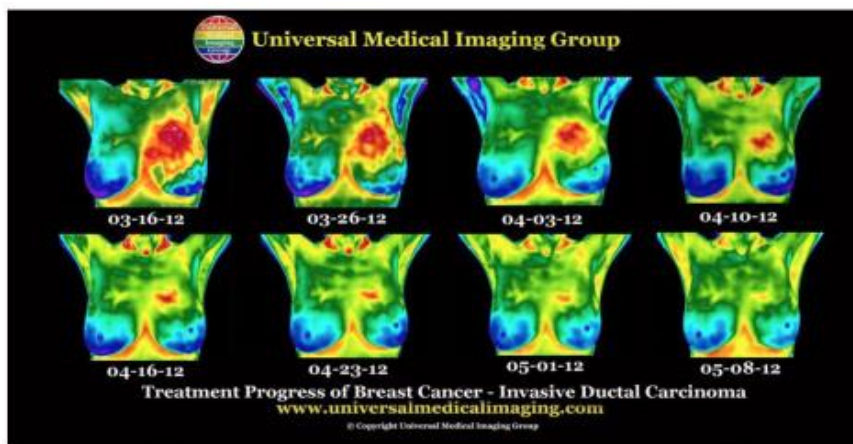


Figure 17 : Evolution du thermogramme d'une patiente traitée contre le cancer du sein.
Source : Universal Medical Imaging Group

Cependant, depuis une vingtaine d'année, l'utilisation de la thermographie comme outil diagnostique complémentaire connaît un réel essor et de nombreux chercheurs se sont penchés sur l'apport de la caméra thermique dans le dépistage et le suivi des cancers. Par exemple, la détection des cancers de la peau et principalement des mélanomes malins par l'IT est étudiée depuis des dizaines d'années mais c'est l'amélioration de la technologie qui,

d'après plusieurs études(31–33), permet aujourd'hui de considérer cette technique comme réellement prometteuse, bien que des études à plus grandes échelles soient encore nécessaires.

Une nouvelle utilisation de l'imagerie infrarouge a également vu le jour. Celle-ci s'appuie sur la détection d'un agent fluorescent sous infrarouge, injecté par voie veineuse et qui a la caractéristique de se concentrer autour des cellules tumorales(34). Cette technique est déjà utilisée lors de certaines chirurgies du foie ou du cerveau pour délimiter de la façon la plus précise possible la tumeur(35). Son utilisation semble également prometteuse dans la détection du cancer du sein et nécessite des études plus poussées(34).

6. Chirurgie à cœur ouvert

L'imagerie thermique est utilisée par les chirurgiens comme outil de prise de décision per-chirurgicale lors de chirurgie cardiaque. En effet, elle permet de mettre en évidence l'impact de différentes procédures chirurgicales sur la répartition du flux sanguin en temps réel. Les trois principales utilisations sont :

- La mise en évidence de défaut de perfusion myocardique due à l'obstruction de petites artères, non visible lors de l'artériographie coronaire. Le but étant d'être capable de rétablir la perfusion des tissus grâce à des procédés tels que la revascularisation laser trans-myocardique.

- La vérification de l'efficacité d'un pontage cardiaque en temps réel. Dans le cas d'une obstruction multiple de l'artère coronaire, l'imagerie thermique permet de voir si un pontage placé distalement à une des obstructions offre une perfusion antérograde ou rétrograde suffisante au myocarde. Si ce n'est pas le cas, un autre pontage peut être réalisé au cours de la chirurgie.

- La mise en évidence du développement de vaisseaux collatéraux suite à la mise en place d'un greffon, pouvant mettre en danger la perméabilité du pontage(36, 37).

7. Autres domaines d'application

Toutes les applications détaillées ci-dessus font parties des utilisations les plus courantes de la thermographie en médecine humaine et sont déjà utilisées par certains spécialistes. Cependant, la thermographie médicale est en plein développement et il existe de nombreux travaux de recherches visant à définir de nouvelles utilisations. On peut par exemple citer la détection précoce du diabète sucré, la visualisation d'inflammation dentaire, la gestion des envenimations ou encore la mise en évidence de thrombus veineux profond. La thermographie est également souvent utilisée dans le domaine de la recherche médicale comme moyen de mesure(10).

Enfin, certains professeurs de physiologie utilisent l'imagerie thermique comme application pratique lors de leur cours sur la thermorégulation afin d'expliquer les bases physiologiques de la circulation de chaleur dans le corps, illustrer la thermorégulation pendant et après l'effort ou encore déterminer le rythme cardiaque d'un modèle dans différentes situations (35).

D. Utilisations en médecine vétérinaire

1. Applications dans le domaine équin

La médecine équine est le domaine vétérinaire dans lequel l'imagerie thermique est le plus largement utilisé. La taille importante de l'animal combinée à la faible longueur des poils en font un sujet parfait pour la thermographie. De plus, les profits importants générés par les sports équestres, facilitent la recherche dans les domaines novateurs tels que l'IT.

Depuis 2009, la thermographie est considérée par la Fédération Internationale Equestre (FEI) comme une « méthode diagnostique potentielle »(38). Il existe également des structures spécialisées dans l'imagerie thermique équine qui proposent des examens thermographiques adaptés à l'animal et réalisés par des vétérinaires spécialisés.

a. Contrôle du bien-être des chevaux en compétition

Un des devoirs de la FEI est d'assurer le bien-être des chevaux lors de toutes compétitions ou rassemblement équin, et ce, via un contrôle vétérinaire exhaustif. L'imagerie thermique peut constituer une aide précieuse lorsqu'il s'agit de détecter des atteintes au bien-être animal. L'IT est par exemple utilisée pour détecter certaines pratiques illégales telles que l'application de produits chimiques irritants au niveau de l'extrémité des membres, causant de l'hypersensibilité cutanée et incitant le cheval à ne pas toucher la barre d'obstacle et ainsi éviter la faute lors des compétitions de saut d'obstacles(39). Une autre pratique vise à appliquer des produits irritants au niveau de la région périnéale pour obliger le cheval à tenir sa queue levée, améliorant ainsi son allure générale d'après les codes équins. Ces différentes techniques, non autorisées, entraînent de l'hypersensibilité mais également une élévation de température cutanée liée à l'inflammation provoquée, qui sont détectables par caméra thermique jusqu'à 8 jours après leur application(40).

Dans les protocoles de la FEI, publiés en 2012, il est précisé que si une différence de plus de 2°C est détectée entre deux régions symétriques ou qu'une région anatomique paraît anormalement chaude ou froide et que cette observation est associée à une anomalie lors de l'examen clinique, le cheval peut être disqualifié.

b. Utilisation de l'IT lors de l'ajustement de la selle

Une mauvaise adaptation de la selle à la conformation du cheval peut entraîner de nombreux problèmes musculaires (contractures, amyotrophie, ...), ligamentaires (desmite du ligament supra-épineux) ou même osseux (conflit de processus épineux). Afin d'ajuster au mieux l'ergonomie de la selle, des images thermiques du dos du cheval doivent être acquises au repos, pour détecter des lésions pré-existantes et juste après une séance montée d'au moins 20 minutes. Le second thermogramme met en évidence les zones de pression entre le dos et la selle, qui devraient être symétriques. Bien que, comme dans toute utilisation de l'IT, des facteurs externes puissent influencer le thermogramme. Ce dernier doit donc toujours être interprété avec prudence(38).

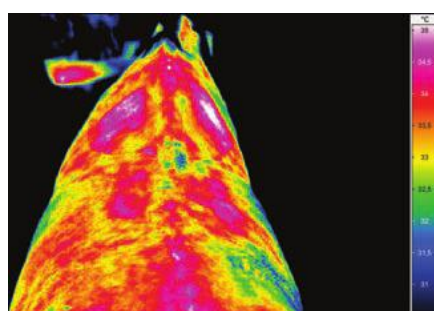


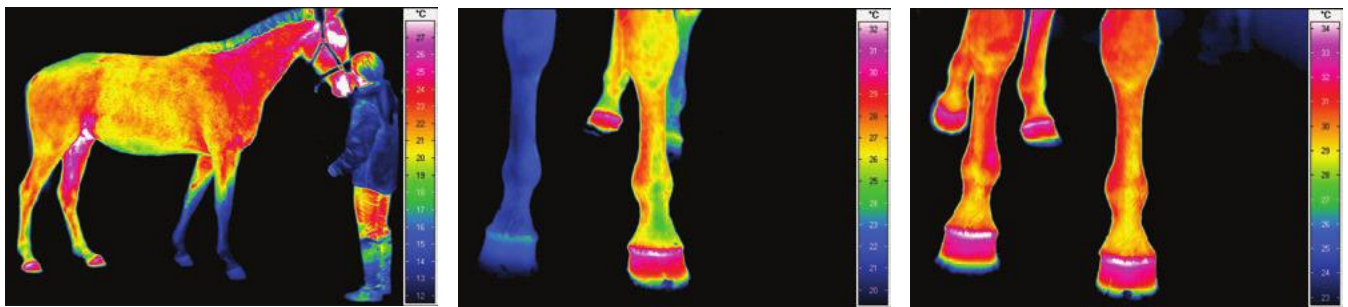
Figure 18 : Thermogramme dorsal d'un cheval après 30 minutes d'entraînement avec une selle de saut d'obstacle. Le milieu de la selle n'a aucun contact avec le dos du cheval. C'est un exemple classique de défaut d'ajustement.

Source: Equine Thermography in Practice, Soroko M., Davies Morel M., 2014

c. Contrôle des sabots

Une image thermique de sabot peut permettre de mettre en évidence plusieurs anomalies, telles que :

- Un abcès de la sole ou une fourbure.
- Une mauvaise répartition du poids entre deux membres ou au niveau du sabot. Par exemple, si le poids est majoritairement porté par la partie latérale du sabot (zone plus chaude), on peut supposer un fonctionnement incorrect du sabot et des tendons et ligaments distaux, pouvant affecter le fonctionnement des muscles crâniiaux. Le problème peut également provenir des muscles et se répercuter sur les sabots.
- Une mauvaise circulation sanguine due à la présence de fers. Il a été montré, par thermographie, que les fers pouvaient limiter la circulation sanguine au niveau de l'extrémité des membres en limitant le retour veineux normalement activé lors de l'appui de la corne du sabot sur le sol. La diminution du flux sanguin entraîne une diminution de l'apport de nutriments et d'oxygène aux tissus provoquant un affaiblissement de la corne ainsi qu'une diminution de capacité de régénération des tendons et ligaments. Cet affaiblissement peut, à termes, provoquer des blessures.



A : Cheval ayant les deux antérieurs ferrés et les deux postérieurs non ferrés

B : Cheval ayant l'antérieur droit ferré et l'antérieur gauche non ferré

C : Cheval B
2h après que le fer droit ait été retiré

Figure 19 : Mise en évidence d'une diminution de température cutanée liée à la présence de fer, probablement due à une diminution de la circulation sanguine.

Source : *Equine Thermography in Practice*, Soroko M., Davies Morel M., 2014

d. Contrôle des performances sportives

Le suivi thermographique de différentes régions du corps avant et après l'effort permet de vérifier que les structures les plus sollicitées ne présentent pas d'anomalie thermique. Par exemple, on sait que les chevaux de courses mettent plus de poids sur leurs antérieurs et plus spécifiquement sur les tendons fléchisseurs digitaux, ce qui se retrouve régulièrement à l'examen thermique(38). En sachant que ces chevaux se blessent majoritairement au niveau des membres antérieurs que postérieurs(41), il semble intéressant de pouvoir contrôler ces régions régulièrement et de manière non invasive. De plus, et comme nous l'avons déjà évoqué, l'IT peut permettre de détecter des inflammations subcliniques jusqu'à deux semaines avant qu'elles n'engendrent des boiteries(42). Une prise en charge précoce de ce type de lésions peut permettre d'enrayer la baisse de performance et de diminuer la durée du traitement associé.

e. Utilisation en physiothérapie

La physiothérapie, incluant massage, kinésithérapie et physiothérapie, est sûrement le domaine équin où la thermographie est la plus utilisée. Le but de la physiothérapie est d'améliorer le fonctionnement du système musculo-squelettique de l'animal en travaillant sur la récupération après l'effort, la souplesse et la rééducation après une blessure. La thermographie est utilisée afin de déterminer le plus précisément possible la région ou la structure affectée. Cela peut correspondre à une contracture au niveau du dos, un ligament/tendon enflammé ou encore une lésion chronique mal soignée. Le physiothérapeute pourra également suivre l'évolution du pattern thermique au fil des jours afin d'adapter son traitement.

f. Utilisations dans le cadre de la recherche

Comme évoqué précédemment, l'imagerie thermique est régulièrement utilisée par les chercheurs comme moyen de mesures ou comme sujet d'étude. Par exemple, certains chercheurs l'utilisent pour mesurer l'efficacité d'anti-inflammatoires dans le cas de maladies neurologiques(43). D'autres s'intéressent à l'estimation de la température corporelle grâce à la température cutanée mesurée aux coins des yeux(44).

Les connaissances acquises en thermographie équine constituent une solide base de travail pour les vétérinaires utilisant la thermographie dans les autres domaines tels que les médecines canine ou rurale où peu de données sont actuellement accessibles.

2. Applications en médecine des ruminants

a. Détection de maladies infectieuses

L'un des symptômes les plus communs aux maladies infectieuses est l'hyperthermie. Plusieurs études ont montré une différence significative de température superficielle détectée par une caméra thermique entre un bovin sain et un bovin infecté lorsque l'image est centrée sur les orbites. Les études ont notamment porté sur la BVD (Diarrhée Virale Bovine)(45), la fièvre aphteuse(46) et le syndrome BRD (Bovine Respiratory disease)(47). De manière encourageante, l'imagerie thermique permettrait une détection précoce de ces maladies. Dans un cadre d'inoculation expérimentale du virus de la BVD, la thermographie permet une détection de l'augmentation de température induite par le virus jusqu'à une semaine avant l'excrétion virale(45). En 2012, des chercheurs ont testé un système de caméra thermique positionnée juste au-dessus d'un abreuvoir, se déclenchant automatiquement lorsqu'un bovin équipé d'un collier GPS s'approche pour boire. Ce système permet un suivi régulier et non-contraignant de l'état clinique de l'animal et peut permettre à l'éleveur et au vétérinaire d'isoler précocement les animaux potentiellement malades(48).

L'imagerie thermique est également utilisable sur les ovins et caprins comme aide à la détection de la FCO (Fièvre Catarrhale Ovine), de la tuberculose ou de toute autre maladies infectieuses(21).

b. Détection des mammites

Les mammites, première pathologie des élevages laitiers, représentent un véritable défi économique pour les éleveurs puisqu'elles entraînent une perte importante de production. La détection précoce de cette pathologie, lors de sa phase subclinique, fait partie des points clés d'un plan de gestion efficace. Or, plusieurs études montrent qu'il y a une bonne voire une très bonne corrélation entre un taux de cellules élevé (associé à une mammite

clinique ou subclinique) et une augmentation significative de la température cutanée du trayon atteint(49, 50). M. Zaninelli, dans son étude publiée en mars 2018, évoque l'éventualité d'une automatisation de la procédure, comprenant une acquisition d'images thermiques juste avant la traite, afin d'obtenir un suivi régulier des pis et ainsi potentiellement améliorer la détection des mammites subcliniques(50). La validation de ce système nécessite néanmoins de plus amples investigations.

Une méthode similaire dans la détection des mammites par imagerie thermique chez les ovins(51) est à l'étude avec des résultats préliminaires prometteurs mais les données sont encore trop incomplètes pour que l'on puisse considérer cette approche comme fiable.

c. Autres applications en cours de développement

Dans les élevages bovins, une bonne détection des chaleurs fait partie intégrante d'un plan de reproduction efficace. Mais cette détection représente un véritable défi pour les éleveurs, surtout lorsque les vaches sont en pâtures. Des chercheurs se sont donc penchés sur une potentielle utilisation de l'IT dans la détection des chaleurs, parfois même en association avec d'autres techniques de détection tel que le collier accéléromètre. D'après une étude, une augmentation de la température cutanée de la vulve serait reliée à l'activité ovarienne et plus précisément à la présence de follicules ovariens(52), cependant une autre étude montre que cette mesure présente une spécificité moyenne (80%) et une faible sensibilité (21%) quant à la détection des chaleurs(53). Des recherches plus approfondies sont donc nécessaires.

De la même manière, on retrouve des études où l'imagerie thermique est utilisée afin de localiser l'origine des boiteries ou caractériser les atteintes digitales chez les bovins(54). Mais là encore, le manque de données incite à la prudence.

Une des principales limites à l'utilisation de l'IT dans le cadre de l'élevage est la propreté nécessaire à l'acquisition d'images sans artefacts. En effet, le thermogramme sera modifié et donc non interprétable si de la boue ou des déjections recouvrent la zone photographiée. Au nettoyage nécessaire s'ajoute un temps d'attente post-nettoyage puisque la friction ou l'humidification de la peau va également modifier le thermogramme.

3. Applications en médecine aviaire et porcine

Nous sommes ici dans le cadre de la médecine de population, c'est-à-dire que le but est de soigner le groupe et non plus l'individu. Pour cela l'éleveur doit combiner gestion sanitaire et gestion des conditions d'ambiance.

a. Utilisation de la thermographie dans le cadre du diagnostique

L'utilisation de la thermographie est limitée chez les oiseaux car les plumes, jouant un rôle d'isolant, bloquent la plupart des émissions infrarouge de la peau. Il a par contre été montré(55) que l'IT permet d'évaluer la qualité de la couverture du plumage de façon objective et plus précise qu'avec le score d'état du plumage couramment utilisé. Cette technique peut donc, par exemple, être utilisée lors d'études sur le bien-être animal en élevage.

L'IT semble également prometteuse pour l'aide à la détection des pathologies podales chez les volailles(56) mais nous manquons encore de données sur le sujet.

A l'inverse, la très faible pilosité des porcs facilite l'utilisation de l'IT chez ces animaux. Une revue publiée en 2015(57) fait un état des lieux de l'avancée de la recherche à ce sujet et met en lumière plusieurs études encourageantes sur la détection de l'hyperthermie et des lésions inflammatoires par imagerie thermique chez les porcs. A ce jour, nous manquons cependant d'études permettant de standardiser cette utilisation.

b. Apport de la thermographie dans la gestion des conditions d'ambiance

Dans les bâtiments d'élevage aviaire et porcin, le confort thermique dépend de 5 facteurs principaux : la température de l'air ambiant, la ventilation du bâtiment, l'hygrométrie ambiante, la température de la litière et celle des parois. Leur gestion est encore plus importante lorsqu'il s'agit de juvéniles qui ne sont pas encore en capacité d'assurer leur propre thermorégulation.

Que cela soit pour des élevages avicoles ou porcins, l'IT peut permettre de contrôler les déperditions de chaleurs dues à une mauvaise isolation, la stratification thermique ou encore le réglage des radiants dans les bâtiments de démarrage(58). Elle peut également être utilisée pour comparer différents types d'installation, comme par exemple les radiants classiques par rapport aux radiants en tube.

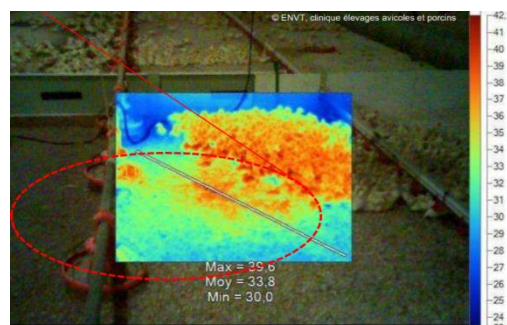


Figure 20 : Thermogramme d'un bâtiment de démarrage où l'on peut observer la répartition des poussins par rapport au radian. Les pointillés délimitent une zone trop chaude pour les poussins, le radian est mal réglé.

Source : Thermographie Infrarouge : applications en élevage avicole, LAGOUTTE F., GUERIN JL Clinique des Elevages Avicoles et Porcins, ENVT

4. Applications dans le domaine de la faune sauvage

Le principal avantage de la thermographie chez les animaux sauvages est la possibilité de récupérer des informations sur l'animal à distance sans aucune contention.

a. Détection d'animaux et estimation de la taille des populations

La thermographie peut tout d'abord être utilisée afin de localiser des individus ou groupes d'animaux dans des environnements où la visualisation directe est difficile. Cela peut être à cause d'un manque de luminosité (nuit) ou du fait du trop grand nombre d'informations visuelles (forêts tropicales).

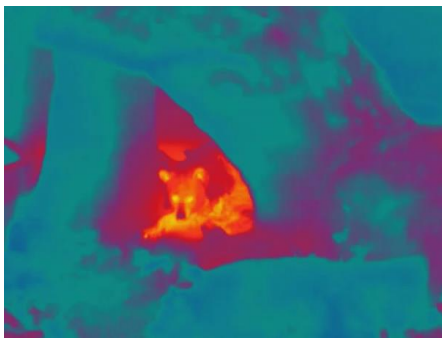


Figure 21 a :
Thermogramme d'un ours caché dans une forêt
Source : www.flir.com

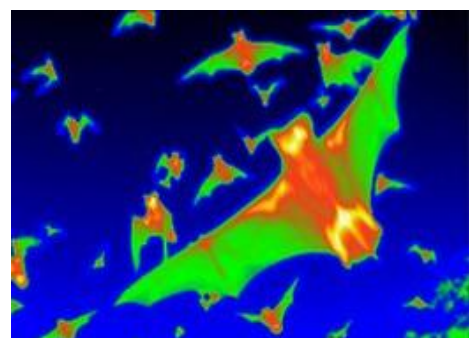


Figure 11b :
Thermogramme d'une colonie de chauve-souris volant de nuit
Source : news.bbcimg.co.uk

D'après une étude de 2015(59), il semblerait que la thermographie puisse également servir d'aide à la détection des braconniers dans la savane africaine avec une distance de détection supérieure à celle d'une lampe torche.

Enfin, certains scientifiques ont montré que l'IT pouvait être un moyen d'évaluation de la taille d'une population plus efficace que le comptage visuel. C'est le cas de l'étude Collier et al. en 2007 qui obtient 92,3% de détection des cerfs à queue blanche par imagerie thermique contre seulement 54,4% par comptage visuel(60).

b. Détection et suivi de pathologies

Comme pour les autres espèces, l'IT peut permettre de détecter des pathologies/lésions inflammatoires. La particularité ici, est qu'elle est parfois le seul outil utilisable ne nécessitant pas une sédation de l'animal.

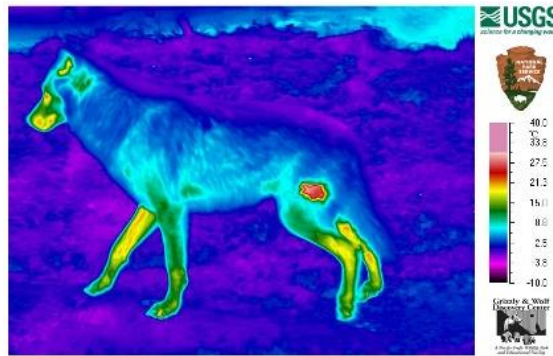


Figure 12 : Détection d'une zone hypertherme chez un loup du Parc National du Yellowstone. Il s'avérera que le loup souffrait d'une infection par la gale.
Source : Wildlife Research News 2012, US Geological Survey 2016.

c. Etude de la thermorégulation

Là encore, de nombreux scientifiques se sont appropriés la thermographie afin d'étudier la thermorégulation de différentes espèces dans leur milieu naturel. On peut par exemple citer une étude de Speakman et Ward qui compare les processus de thermorégulation chez trois espèces de renard (renard roux, renard polaire et renard nain) et montre des variations dans leurs mécanismes de thermorégulation leur permettant de s'adapter à leur environnement(61).

d. Etude du comportement animal

L'imagerie thermique est utilisée pour observer les changements de température superficielles des animaux exposés à différents facteurs de stress. Par exemple, Nakayama et al. ont montré que la température de la région nasale des Macaques Rhésus chutait dans les 10 à 30 secondes suivant l'apparition d'une situation menaçante(62). L'IT associée aux technologies informatiques a aussi permis d'étudier le comportement et les trajectoires de colonies entières de chauve-souris(63).

5. Applications en médecine canine

L'utilisation de la thermographie en médecine canine a commencé à se développer bien plus tard que dans le domaine équin. Les données disponibles sur le sujet sont donc partielles et de nombreux domaines restent à explorer.

De plus, la forte pilosité de certaines races de chiens peut compliquer l'interprétation des thermogrammes. L'image obtenue ne rendra que partiellement compte de la température cutanée de la zone cible.

a. Utilisation de l'IT en orthopédie

Au sein de la médecine canine, l'orthopédie est le domaine où l'on trouve le plus grand nombre d'applications thermographiques. En effet, les pathologies rencontrées sont très souvent associées à une inflammation, qui plus est, localisée sur les zones où les poils sont relativement courts.

L'IT peut être utilisée en première intention suite à la détection d'une anomalie à l'examen orthopédique ou au contraire lorsqu'on ne détecte aucune anomalie à l'examen mais que l'anamnèse suggère une atteinte orthopédique. Cette première approche peut permettre de localiser la lésion, estimer son étendue et éventuellement suspecter la structure impliquée.

A ce jour, peu d'études ont été conduites chez le chien. Cependant, à partir des connaissances disponibles chez le cheval et l'humain de nombreux cliniciens utilisent déjà la thermographie pour mettre en évidence des contractures musculaires, des tendino- et ligamentopathies, de l'arthrose ou encore des ruptures du ligament croisé crânial (LCC) chez le chien(4). Cependant, une des limites de la thermographie est son manque de spécificité. Par exemple, il n'est pas possible de différencier un grasset arthrosique d'un grasset présentant une rupture du LCC(4).

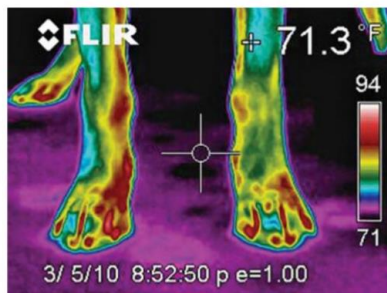


Figure 13 : Thermogramme des antérieurs d'un chien de traineaux acquis lors du check vétérinaire pré-course. L'IT a été utilisé pour vérifier une inflammation du carpe médial droit détectée à l'examen clinique. Elle a également permis de détecter une inflammation au niveau médial des doigts de l'antérieur droit et latéral des doigts de l'antérieur gauche. Ces zones inflammatoires ont été confirmées par palpation et le chien n'a pas pris le départ de la course.

Source : *Canine Sports Medicine and Rehabilitation*, Zink Chris, 2018

L'IT peut donc servir à orienter le diagnostic du clinicien mais doit encore être utilisée en complément d'autres outils diagnostiques telle que la radiographie ou l'échographie.

Pour d'autres pathologies telles que la dysplasie du coude ou les hernies discales, les études préliminaires(64, 65) semblent prometteuses mais des études supplémentaires sont nécessaires pour déterminer si la thermographie peut présenter un réel avantage par rapport à d'autres techniques d'imagerie.

b. Suivi lors de rééducation

Ici encore, les études portant sur le suivi de la rééducation/guérison par thermographie chez le chien sont peu nombreuses. Néanmoins, sachant que les mécanismes physiopathologiques de l'inflammation sont comparables entre le chien et l'humain et que la thermographie est un outil non-invasif et sans effet secondaire, certains cliniciens se basent sur les connaissances disponibles en médecine humaine(66) et utilisent la thermographie pour suivre l'évolution de lésions tels que des entorses ou des post-opératoires de TPLO (Tibial Plateau Leveling Osteotomy).

L'IT est également régulièrement utilisée par les physiothérapeutes canins pour suivre l'efficacité d'une rééducation.

c. Détection de processus tumoraux

Comme vu précédemment, les processus tumoraux sont associés à une augmentation du métabolisme et de la vascularisation à la périphérie de la lésion. D'après une étude(67), de la même façon qu'en médecine humaine, l'imagerie thermique permettrait de détecter la présence de tumeurs mammaires chez les chiennes. Il a également été montré qu'il était possible de différencier un membre atteint d'une tumeur osseuse d'un membre sain sur la base de leur thermogramme(68). Il est à présent nécessaire d'effectuer des études complémentaires afin de déterminer si la thermographie peut être considérée comme une aide diagnostique utile à la détection de processus tumoraux, en étudiant par exemple, la précocité de détection que peut offrir cette technique.

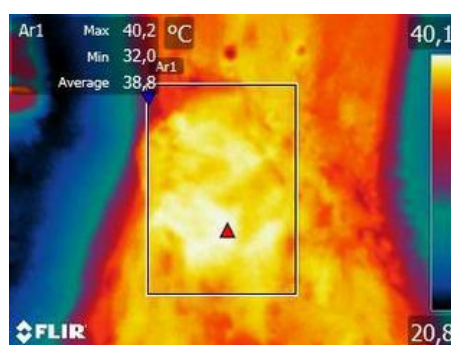


Figure 14 : Thermogramme d'une tumeur mammaire localisée sur la chaîne mammaire droite. En peut clairement identifier une augmentation de température au niveau de la tumeur par rapport au reste de l'abdomen.

Source : *Infrared Thermography in Dogs with Mammary Tumors and Healthy Dogs*, Paveleski M., 2015, *Journal of Veterinary Internal Medicine*

d. Autres applications de l'IT chez le chien

i. Utilisation de l'IT pour évaluer l'efficacité de l'acupuncture dans le cas d'arthrite

Trois semaines après avoir induit une arthrite du grasset chez 8 chiens, des scientifiques ont réalisé une fois par semaine et ce durant quatre semaines un examen thermographique sur l'ensemble des chiens. Ils ont alors montré que les chiens traités par acupuncture présentaient une diminution de la température moyenne du grasset au fil des semaines, à l'inverse des chiens non traités(69). Cette étude préliminaire semble indiquer que la thermographie peut s'avérer être un outil efficace pour suivre l'évolution clinique d'un patient souffrant d'une lésion inflammatoire traitée par acupuncture.

ii. Utilisation de l'IT dans le cadre de la recherche

Dans la recherche canine aussi, l'imagerie thermique est souvent utilisée comme outil de mesure. Augustin G et al. ont par exemple étudié l'augmentation de chaleur de l'os engendrée par un forage lors de chirurgie orthopédique. L'IT a montré que l'augmentation maximale de température se trouvait dans la corticale de l'os. Cette partie étant la plus dense et compacte, elle offre une résistance supérieure à celle de la cavité médullaire(70).

Des études s'intéressent également à l'utilisation de l'IT pour suivre l'état émotionnel de l'animal. Habituellement, cet état est principalement caractérisé grâce à des paramètres comportementaux, physiologiques (fréquence cardiaque et variabilité de cette fréquence) et endocriniens (ocytocine et cortisol). La difficulté réside dans l'interprétation de certains de ces paramètres puisque, par exemple, la fréquence cardiaque peut augmenter lors d'émotions positive et négative. De la même façon, le fait qu'un chien se lèche peut être considéré comme un comportement normal chez un chien détendu ou comme un signe d'anxiété. Pour ce qui est des paramètres endocriniens, ils nécessitent une prise de sang ce qui limite leur utilisation au domaine de la recherche. L'IT offre un accès à une valeur quantitative, acquise de manière non-invasive et donc non stressante pour l'animal.

Une étude a montré que la mesure de la température de surface des oreilles chez le chien pouvait permettre de suivre l'état de stress de l'animal. Dans cette étude, la situation de stress est déclenchée suite à la séparation avec le propriétaire dans un endroit inconnu, ce qui a pour effet de faire diminuer la TS des oreilles jusqu'à ce qu'une personne connue ou inconnue rentre dans la pièce(71). Une autre étude s'est intéressée à la variation de température du contour des yeux chez des chiens ayant une émotion positive, provoquée par l'administration d'une récompense alimentaire par le propriétaire. Cette stimulation positive provoque une augmentation de la température péri-oculaire comparée à celle mesurée avant et après la stimulation. Ici encore, la thermographie semble être un moyen fiable pour suivre

l'évolution émotionnelle de l'animal(72). Des études supplémentaires sont cependant nécessaires afin de confirmer et affiner ces observations.

L'IT a également été utilisée afin d'étudier l'impact de différents protocoles de sédation sur la perte de température. Vainionpaa M. et al. ont par montré que des animaux sédatisés avec un protocole butorphanol-médétomidine-vatinoxan présentaient une température superficielle des coussinets postérieurs supérieure à ceux sédatisés avec un protocole butorphanol-médétomidine seulement. En parallèle, les chiens ayant reçu le protocole vatinoxan ont présenté une température rectale plus faible que les autres. Cette étude suggère que l'ajout de vatinoxan dans le protocole de sédation pourrait entraîner une augmentation de la vasodilatation périphérique responsable d'une augmentation de la dissipation de chaleur.

e. Utilisation chez les chats

A ce jour, très peu d'études impliquant l'utilisation de l'imagerie thermique ont été réalisées chez le chat. Cependant, dans les domaines où les résultats des études thermographiques concordent pour plusieurs espèces (chien, cheval, homme) tel que l'orthopédie ou l'oncologie, il semble raisonnable d'imaginer qu'une extrapolation des résultats à l'espèce féline soit possible.

i. Utilisation dans le cas d'hyperthyroïdisme

Une étude réalisée sur 17 chats hyperthyroïdiens et 12 chats contrôles a montré que l'IT pouvait présenter un intérêt dans la détection de l'hyperthyroïdisme chez le chat. En effet, l'IT a permis de déterminer avec exactitude si un chat était hyperthyroïdien dans 80,5% des cas. Au cours de cette étude, les chats hyperthyroïdiens ont été traités par radiothérapie et ont été réévalués après un 1 mois de traitement. Tous les chats présentaient alors un taux de thyroxine dans les valeurs usuelles de l'espèce et l'IT a présenté un taux de détection de 92,86%. Cette étude a également montré des taux de détections comparables entre les images acquises, que les chats de l'étude soient rasés ou non, ce qui peut faciliter l'acceptation de l'examen par le propriétaire.

Il est évident que l'IT ne peut être utilisée comme seul outil de dépistage de l'hyperthyroïdie chez le chat à cause de son manque de spécificité puisque d'autres pathologies peuvent entraîner une augmentation de température cutanée au niveau de la zone ventrale du coup. Il semble cependant envisageable d'utiliser la thermographie en première intention chez des chats dont la contention est difficile ou dans les cas de regroupement d'animaux (élevage, refuge). Un traitement des images par un logiciel d'analyse est cependant nécessaire(5).

ii. Evaluation de la douleur par IT

La détection de la douleur chez le chat est particulièrement difficile et requiert de l'entraînement et une approche multidisciplinaire. Vainionpää M. et al. se sont donc demandés si l'IT pouvait être utilisée comme aide à l'appréciation de la douleur chez le chat. Pour cela ils ont comparé les observations détectées à l'examen clinique et à la palpation par le vétérinaire avec les potentielles modifications thermiques mises en évidence sur les thermogrammes. Les données de l'examen clinique et de la palpation ont également été comparées à celles d'un questionnaire rempli par le propriétaire et qui avait pour but d'évaluer le niveau de douleur de l'animal. Les résultats indiquent que lorsqu'elle est combinée à un examen clinique et à la palpation, l'imagerie thermique peut permettre de différencier un chat algique d'un chat qui ne l'est pas. De plus, dans cette étude, les anomalies mises en évidence à la palpation se retrouvent régulièrement lors de l'analyse des images thermiques ce qui suggère que la thermographie pourrait être un outil intéressant chez les chats difficilement abordables ou facilement stressés.

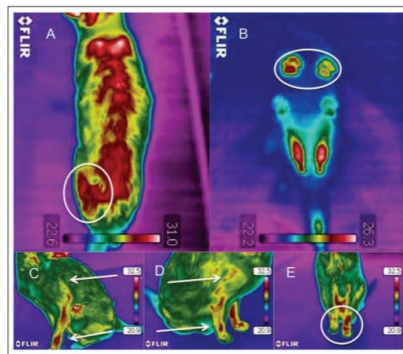


Figure 15 : Thermogrammes d'un chat suspecté de présenter de la douleur.
A : le cercle délimite une région anormalement chaude
B : report de poids sur l'antérieur droit
C, D et E : asymétrie de température entre les antérieurs droit et gauche

Source : A comparison of thermographic imaging, physical examination and modified questionnaire as an instrument to assess painful conditions in cats, Vainionpää M. et al, *Journal of Feline Medicine and Surgery*, 15, 124-131, 2012

Un des résultats complémentaires de cette étude est qu'un propriétaire non entraîné à évaluer la douleur chez son animal n'est pas apte à distinguer les signes caractéristiques de la douleur. Le vétérinaire peut donc difficilement se fier à l'appréciation du propriétaire quant aux signes de douleur que peut présenter l'animal à la maison et doit utiliser tous les outils à sa disposition pour déterminer le plus précisément possible le score de douleur du chat examiné(73).

iii. Détection de la thromboembolie aortique féline (TEA)

La TEA est caractérisée par une paralysie des membres affectés (postérieurs dans la majorité des cas), une absence de pouls, un refroidissement du ou des membres, de la douleur et une pâleur des coussinets. Lorsque que tous ces symptômes sont présents le diagnostic clinique laisse peu de doutes, cependant il est parfois difficile d'exclure les autres causes de paralysie (traumatisme, origines neurologiques, etc). Or, le diagnostic de certitude repose sur une visualisation échographique du thrombus, ce qui peut représenter une difficulté technique pour des vétérinaires peu entraînés.

Le service d'urgences-soins intensifs de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Lyon a conduit une étude sur 16 chats présentés aux services des urgences pour paralysie du train arrière. Le but de l'étude était de déterminer la fiabilité de l'IT dans la détection de la TEA chez des chats paralysés du train arrière. Le principal résultat est qu'une différence de température de plus de 2,4°C entre les membres affectés et non-affectés présente une excellente sensibilité (100%) et une très haute spécificité (90%) pour la détection d'une TEA. Or, une telle différence peut être difficile à détecter cliniquement. L'IT pourrait donc être utilisé dans les stades précoces de l'affection et ainsi permettre une mise en place rapide du traitement et une amélioration du pronostic vital de l'animal(74). Le faible nombre d'animaux inclus dans l'étude rend la vérification des résultats lors d'une étude à plus grande échelle nécessaire. Il semblerait également intéressant de comparer le taux de détection clinique et thermique de la TEA afin d'estimer le réel intérêt de cet outil en pratique vétérinaire(75).

6. Les lignes directrices de l'«American Academy of Thermology»

L'« American Academy of Thermology » (AAT) a été créé aux Etats-Unis en 1971 afin de promouvoir la recherche et les applications cliniques de l'imagerie thermique médicale. Suite à la démocratisation de la thermographie en médecine vétérinaire et l'élargissement constant de ses domaines d'application, l'AAT a mis à disposition des vétérinaires des « guidelines » disponibles sur leur site internet et destinées à accompagner ce dernier dans son utilisation. On y retrouve les principales indications de l'IT en médecine vétérinaire, ses limites et contre-indications, mais également les points essentiels des différentes étapes de l'examen thermique, de la communication avec le propriétaire à la présentation d'un rapport(76). Ces « guidelines » permettent aux vétérinaires non spécialisés en imagerie thermique d'utiliser cette technologie dans les meilleures conditions.

IV. La Grande Odyssée : Une course de chiens de traineaux moyennes distances à étapes.

A. Un format de course particulier

Depuis 2019, l'équipe organisatrice de La Grande Odyssée a pris la décision de raccourcir ses étapes pour être en capacité d'offrir aux mushers un parcours le plus proche possible du parcours prévisionnel qui leur est transmis plusieurs mois à l'avance. En effet, faute d'enneigement suffisant, de plus en plus d'étapes devaient être modifiées et raccourcies au fil des éditions. La « Grande Odyssée » est donc devenue une course de moyennes distances se courant sur 12 jours avec plus de 350 kilomètres parcourus, 11 400 mètres de dénivelé positif et une moyenne de 32 kilomètres par étape. L'édition 2020 a rassemblé 44 mushers et plus de 400 chiens.

L'effort demandé aux chiens est donc différent de celui demandé lors de beaucoup de courses très populaires telles que la Yukon Quest ou l'Iditarod, qui se déroulent sur de plus longues distances, dans des conditions de froid plus importantes mais majoritairement sur des terrains plats. Lors de La Grande Odyssée, les chiens doivent être capables de produire un effort intense sur plusieurs dizaines de kilomètres et avec des dénivelés positifs qui dépassent régulièrement les 1000 mètres par étape.

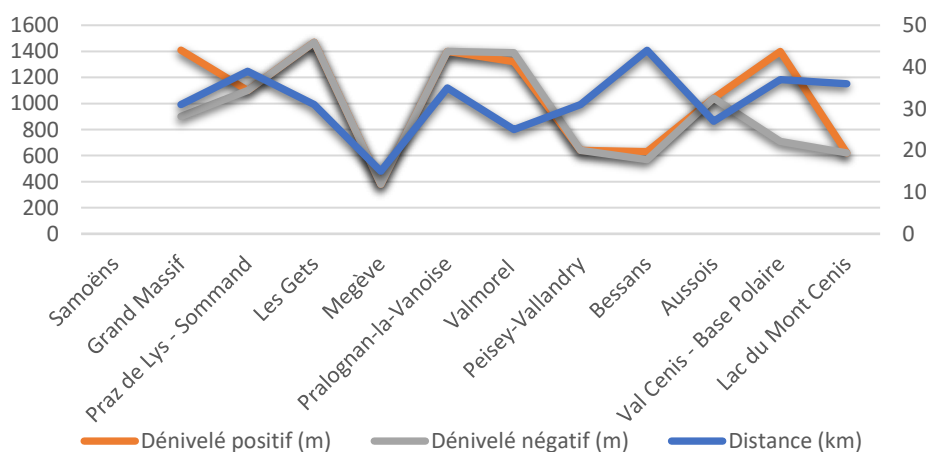


Figure 16 : Distances et dénivelés parcourus par les participants de La Grande Odyssée 2020

Les races de chiens sélectionnées pour ce type de courses le sont sur la base de leur endurance, leur vitesse et leur puissance. Les trois races les plus représentées sont le Husky de Sibérie, l'Alaskan Husky et l'Eurohound. L'Alaskan n'est pas une race à proprement parler mais un regroupement de différents croisements où le profil Husky prédomine mais avec un objectif d'amélioration de la performance. Le croisement peut être fait avec des chiens de type lévrier si le but est de produire un chien rapide, de type braque si c'est l'endurance qui

est recherchée ou encore avec des chiens-loups si c'est la résistance au froid qui prime. L'Eurohound correspond lui, à un croisement entre un Alaskan husky et un Pointer et s'est rapidement imposé comme le roi des courses types sprint et moyennes distances grâce à son potentiel de vitesse.

B. Impact sur les chiens et principales affections rencontrées

La Grande Odyssée est une course caractérisée par ses étapes à dénivelés importants et sujette aux variations de types de neiges.

Les affections les plus fréquemment rencontrées sur les courses de moyenne distance sont des affections aiguës, podales ou digestives. D'après une étude réalisée au cours de la 4^{ème} édition de la Grande Odyssée, en 2008, les affections rencontrées, de la plus fréquente à la moins fréquente sont : les traumatismes, les diarrhées, les maladies métaboliques, la fatigue et enfin les troubles cardiorespiratoires(77).

En ce qui concerne les affections podales, plusieurs paramètres entrent en compte dans le type d'affection et leur fréquence d'apparition. Par exemple, une neige dure semble favoriser l'apparition de coupures au niveau des coussinets alors qu'une neige lourde favoriserait l'accumulation de neige ou « snow balls » et l'apparition de dermites interdigitées(77). Un contrôle quotidien des coussinets de tous les chiens est donc indispensable pour pouvoir prendre en charge ces lésions le plus tôt possible et éviter l'apparition d'une boiterie par report de poids. Au cours d'une étude réalisée lors de La Grande Odyssée 2019, 23,4% des chiens inclus dans l'étude ont présenté des dermites interdigitées, et 17,5% ont présenté des blessures traumatiques des coussinets(78).

Les articulations sont également mises à rude épreuve puisqu'elles doivent être capables d'absorber les variations de type de neige, les changements de direction ou encore les montées ou descentes à fort pourcentage. Une étude réalisée sur l'Iditarod 2011 a montré que sur l'ensemble des chiens retirés de la courses, 43,3% l'étaient pour cause de lésions orthopédiques sur les membres antérieurs et seulement 7,3% dans le cas des membres postérieurs(79). Bien que l'Iditarod soit une course de longue-distance à faible dénivelé, il semble intéressant de considérer ces résultats puisque nous ne disposons pas d'étude de cette envergure sur les courses à fort dénivelé de moyenne distance. Il existe cependant une étude réalisée lors de La Grande Odyssée 2008 sur 36 cas cliniques qui montrent que, parmi les lésions orthopédiques, les membres antérieurs sont atteints dans 64% des cas(77). Au cours de ces deux études ce sont les épaules et les carpes qui ont été les plus atteints.

Un autre type d'affection fréquemment rencontrées dans ce type de course sont les diarrhées dites d'effort, infectieuses ou dues à un changement alimentaire. Les diarrhées d'effort surviennent généralement en fin de course ou peu de temps après. Elles ne deviennent préoccupantes que lorsqu'elles sont associées à une déshydratation ou à une

anorexie. Une prise en charge précoce avec un soutien de la fonction digestive grâce à des protecteurs gastriques et intestinaux, ainsi qu'une surveillance accrue peuvent cependant faciliter une normalisation du transit. Au cours de l'édition 2019 de La Grande Odyssée, 11% des chiens inclus dans l'étude de Marie Sigogneau ont présenté une diarrhée d'effort(78). Les deux autres types de diarrhées ne sont pas spécifiques des courses de chiens de traîneaux et représentent une part bien plus faible des diarrhées rencontrées.

V. Conclusion

La thermographie est une technique d'imagerie qui se développe depuis maintenant plus de 100 ans et qui possède des applications dans de nombreux domaines médicaux et technologiques. Malgré son caractère non-invasif, non-douloureux et portable, l'utilisation de l'imagerie thermique n'a jamais connu l'essor d'autres techniques d'imagerie telles que l'échographie ou la radiographie, principalement à cause de son défaut de spécificité vis-à-vis des affections.

Cependant, les innovations technologiques et numériques de ces dernières années ont permis de faciliter l'utilisation de l'imagerie thermique et ont ouvert de nouveaux horizons quant à son utilisation.

Le caractère portable de la caméra thermique et sa facilité d'utilisation permettent l'acquisition d'images dans des conditions où peu d'outils diagnostiques sont utilisables. Les courses de chiens de traîneaux font donc parties des situations où l'imagerie thermique pourrait présenter un réel intérêt pour les vétérinaires. Nous nous sommes donc intéressés à l'utilisation pratique de l'imagerie thermique des articulations chez le chien de traîneaux dans le cadre de la 16^{ème} édition de La Grande Odyssée.

ETUDE EXPERIMENTALE

INTRODUCTION

Dans cette partie, nous présentons une étude prospective réalisée lors de la course « La Grande Odyssée Savoie Mont-Blanc » entre le 11 et le 21 janvier 2020. Cette étude vise à évaluer la température superficielle des articulations appendiculaires d'un panel de chiens participant à la course, à l'aide d'une caméra thermique.

La présente étude fait suite à une utilisation préliminaire de la caméra thermique en novembre 2019 sur des chiens présentés au service d'anesthésie du centre hospitalier vétérinaire de Toulouse dans le cadre d'une prise en charge chirurgicale de diverses affections ou opérations de convenance. Cette utilisation préliminaire visait à :

- Se familiariser à l'utilisation de l'appareil.
- Déterminer les réglages adaptés à une utilisation sur des animaux (caméra destinée initialement à une utilisation dans le domaine de l'industrie et du bâtiment).
- Tenter d'évaluer les potentielle limites et contraintes imposée par l'utilisation d'une caméra thermique dans notre contexte.

Les données issues de cette première prise en main nous ont permis de confirmer certaines contraintes intrinsèques à notre étude, telle que l'influence de la longueur des poils, l'importance des paramètres d'ensoleillement et de température ou encore la difficulté de conserver une distance et un angle de visée constant lors d'une utilisation sur animaux vigiles.

Notre étude s'articulera en deux parties complémentaires qui s'appuient sur les deux types d'utilisation de l'imagerie thermique lors d'une course de chiens de traîneaux. En effet la thermographie peut être utilisée en prévention lors du contrôle vétérinaire ou en tant qu'examen complémentaire lors de suspicion de lésions musculo-squelettiques.

La première partie sera donc destinée à décrire l'utilisation de la caméra thermique lors du contrôle vétérinaire d'entrée sur site, sur un panel de chiens supposés sains puis 7 à 8 jours plus tard, sur les chiens du panel encore en course. Tous les chiens entrant sur l'espace canin de la course, qu'ils soient athlètes ou accompagnateurs, sont soumis à ce contrôle.

La deuxième partie sera, quant à elle, axée autour de la description de cas cliniques où la caméra thermique a été utilisée dans un contexte de lésions musculo-squelettiques, qu'elles soient suspectées ou avérées.

Après avoir exposé les objectifs et la mise en place expérimentale de notre étude, nous détaillerons nos résultats et en discuterons à la lumière des connaissances actuelles sur le sujet.

NB : Pour l'ensemble de l'étude, toutes les comparaisons thermiques droite/gauche seront présentées comme si l'on regardait l'animal de face, c'est-à-dire avec le membre gauche à droite et le membre droit à gauche.

PARTIE A :

Etude thermographique d'un panel de 24 chiens sains

I. Objectif de l'étude

Cette première partie a pour objectif de décrire l'utilisation de la caméra thermique, sur un échantillon de chiens considérés comme sains, suite à l'examen vétérinaire d'admission à La Grande Odyssée 2020 puis après 7 à 8 jours de course. Or, les données chiffrées actuellement disponibles sur l'utilisation de la caméra thermique chez le chien de sport sont très limitées et deviennent quasiment inexistantes lorsque l'on se restreint à son utilisation dans le domaine du chien de traîneaux. Il nous paraissait donc important de décrire les valeurs obtenues ainsi que les avantages et les contraintes liées à son utilisation dans le cadre d'une course telle que la Grande Odyssée Savoie Mont-Blanc en termes, entre autres, de praticité et de fiabilité.

Le contrôle vétérinaire d'admission permet à l'équipe vétérinaire de vérifier que tous les animaux sont en bonne santé et en capacité physique de participer à l'évènement. Dans ce contexte, un examen clinique et un examen orthopédique complets sont réalisés juste après les contrôles sanitaires règlementaires. Cependant, quelle que soit l'exhaustivité de l'examen orthopédique et comme tout examen, ce dernier présente une sensibilité limitée, qui plus est chez les chiens de travail qui ont tendance à présenter un seuil de tolérance à la douleur plus élevé que d'autres chiens, pouvant rendre la détection de lésions débutantes plus difficile. Il est donc possible que certaines lésions orthopédiques ne soient pas détectées lors d'un examen orthopédique et que l'animal soit considéré comme apte à prendre le départ au risque que la lésion s'aggrave durant la course.

C'est pourquoi nous nous sommes intéressés à l'utilisation de la caméra thermique comme outil d'aide à la détection d'affections musculo-squelettiques pré-lésionnelles et lésionnelles. Le but de cette partie est donc d'explorer le potentiel apport de l'examen thermique, en complément de l'examen clinique et orthopédique, dans le suivi des athlètes canins.

Dans cette première partie, notre but ne sera pas de confirmer ou infirmer une hypothèse principale mais bien de décrire objectivement les différentes observations que nous avons effectuées durant la course. Cependant, nous avons émis plusieurs hypothèses secondaires sur la façon dont allait probablement se comporter la température de surface suivant trois paramètres principaux : la latéralisation du membre, l'orientation de l'articulation lors de l'acquisition et le type racial des chiens. Dans un premier temps nous avons émis l'hypothèse que, chez des sains au repos, il n'y a pas de différence significative entre les températures de surface des articulations droite et gauche. A l'inverse, il nous

semblait probable, au vu de leur plus faible pilosité, que les chiens de type « Eurohound » présentent des températures de surface articulaire plus élevées que les chiens de type « Nordique ». Pour ce qui est de l'orientation de l'articulation, une étude réalisée uniquement au niveau du grasset montre que chez les chiens à poils courts, le profil est toujours plus chaud que l'aspect caudal de l'articulation(80). Nous avons donc émis la même hypothèse.

Il nous a également semblé intéressant de réitérer l'examen thermique chez les mêmes animaux 7 à 8 jours après le début de la course afin de pouvoir comparer les thermogrammes et déceler une potentielle évolution de la répartition thermique.

II. Matériel et méthode

A. Population étudiée et échantillonnage

Pour cette partie de l'étude, la population étudiée correspond à un échantillon de chiens de traîneaux sains participant à La Grande Odyssée 2020. Concernant l'échantillonnage, nous avons fait le choix de ne sélectionner qu'un faible nombre de chiens par attelage, nous permettant ainsi d'inclure un grand nombre d'attelages de niveaux d'entraînement différents. Nous nous étions fixés comme objectif de former une population échantillonnée comptant au minimum 20 chiens. Et puisque les 17 équipes inscrites ont toutes accepté de participer à notre étude nous avons pu nous limiter à une sélection d'un 1 à 2 chiens par attelage. Les animaux sélectionnés répondent tous aux critères d'inclusion et d'exclusion suivants :

Critères d'inclusion :

- Participant à la course (à l'inverse des chiens accompagnateurs)
- Inscrit dans la catégorie LGO Open ou LGO Limited. (Cf Partie A-IV-A)
- Appartenant à un musher ayant accepté de participer à l'étude. Au vu de la faible invasivité de l'examen thermique, un accord verbal a été jugé suffisant.
- Considéré comme apte à participer à la course par l'équipe vétérinaire, sur la base du contrôle sanitaire réglementaire et de l'examen clinique et orthopédique d'admission.

Critères d'exclusion :

- Participant à un Trophée, c'est-à-dire ne réalisant qu'une partie des épreuves.
- Les chiens présentant une anomalie à l'examen clinique et orthopédique d'admission, ne leur permettant pas de participer à une épreuve ou plus.

Parmi les attelages ayant accepté de participer à l'étude, nous avons réalisé une randomisation aléatoire s'appuyant sur :

- L'attribution d'un numéro à chaque équipe suivant son ordre d'arrivée au contrôle sanitaire, compris entre 1 et 17. 17 étant le nombre d'équipes inscrites dans les catégories LGO Open et Limited.

- L'attribution d'un numéro à chaque chien participant à la course, par ordre de passage à l'examen clinique et orthopédique d'admission : de 1 à N. N étant le nombre de chien composant chaque attelage et étant compris entre 6 et 14.

- La sélection de 1 à 2 chiens, de façon aléatoire suite à randomisation de l'ordre de passage effectuée en amont grâce au tableau suivant (**tableau 1**).

Les colonnes intitulées « Si $X > N$ » sont utilisées lorsque X est supérieur au nombre de chiens constituant l'équipe concernée. *Exemple : $X = 8$ alors que l'équipe concernée ne compte que 7 chiens.*

Ordre d'arrivée des attelages au contrôle sanitaire	Place du 1 ^{er} chien soumis à l'examen thermique dans l'ordre de passage à l'examen clinique		Place du 2 nd chien soumis à l'examen thermique <i>si besoin</i>	
		Si $X > N$		Si $X > N$
1 : Nom du 1 ^{er} attelage arrivé sur site	X_1	X_1'	X_a	X_a'
2 : Nom du 2 ^{ème} attelage	X_2	X_2'	X_b	X_b'
3 : Nom du 3 ^{ème} attelage	X_3	X_3'	X_c	X_c'
...	

Tableau 1 : Tableau de randomisation utilisé pour sélectionner les chiens participant à l'étude.

- $X_{1,2,...}$ et $X_{a,b,...}$ sont compris entre 1 et 14 (taille maximale du pool de chiens d'une équipe).

- $X_{1,2,...}'$ et $X_{a,b,...}'$ sont compris entre 1 et 6 (taille minimale du pool de chiens d'une équipe).

- N = nombre de chiens constituant un attelage

7 à 8 jours après la première acquisition, une seconde série de clichés est effectuée sur les chiens ayant participé à la première acquisition et étant encore en course.

B. Matériel

Afin de réaliser l'acquisition de l'intégralité des images thermiques, une caméra Infrarouge de la marque Fluke Corporation (Everett, Washington USA) et de la gamme TiR a été utilisée. Cette caméra a initialement été développée pour le diagnostic thermique de bâtiments, d'installation électrique, d'industries... Cependant, les gammes de température rencontrées dans un contexte vétérinaire étant similaires à celles rencontrées dans les situations précédemment citées, cet appareil a été considéré comme utilisable pour notre étude. Principales caractéristiques de la caméra utilisée lors de cette étude :

- Gamme de mesure : - 20 °C à + 150 °C
- Précision de la mesure : $\pm 2^\circ\text{C}$ ou 2 % (à 25 °C, selon la valeur la plus élevée)
- Sensibilité thermique : 0,04 °C (81)



Figure 17 : Caméra thermique Fluke utilisée lors de l'étude

La caméra est équipée d'une carte mémoire permettant le transfert des images acquises vers un ordinateur et l'analyse de ces dernières grâce au logiciel GRAYESS IRT Cronista 3.6 (Bradenton, USA). Les analyses seront détaillées plus tard.

C. Design expérimental

1. Recueil des informations, examens clinique et orthopédique

Lors de leur arrivée sur site, chaque chien est soumis à un examen clinique complet ainsi qu'un examen orthopédique de chaque articulation, tous deux réalisés par un des vétérinaires de l'équipe vétérinaire 2020.

L'examen clinique comprend, à minima, le contrôle de la fréquence cardiaque et respiratoire, l'évaluation de la couleur des muqueuses et du temps de remplissage capillaire, une palpation abdominale et des nœuds lymphatiques, une mesure de la température rectale, ainsi qu'une inspection approfondie des enveloppes tégumentaires.

Concernant l'examen orthopédique, nous avons fait le choix de laisser le choix à chaque vétérinaire de le réaliser suivant ses propres habitudes et n'avons donc pas imposé de protocole standardisé.

En parallèle, un recueil des données d'identification et démographiques de l'animal sélectionné est effectué. Parmi ces données, on retrouve : le nom de l'animal, le nom du musher, le sexe de l'animal, son âge, son numéro de transpondeur électronique et enfin sa race. Les trois races les plus représentées sont le Husky de Sibérie, l'Alaskan Husky et l'Eurohound. L'Alaskan Husky est une race de chien non définie par son ascendance mais par sa fonction, celle de chien d'attelage en milieu nordique. La plupart du temps le chien est le résultat d'un croisement entre plusieurs races (Husky de Sibérie, Chien-loup Tchécoslovaque, Pointer Anglais, Braque, etc). L'Eurohound est quant à lui le résultat d'un croisement entre un Alaskan Husky et d'un Pointer Anglais.

2. Acquisition des images thermiques

a. Périodes d'acquisition des images thermiques

La première série de clichés, notée J0, est réalisée le jour de l'arrivée des animaux sur site. L'acquisition est réalisée dans un intervalle de temps allant de l'arrivée sur site à quatre heures après l'arrivée des animaux. Les chiens venaient de réaliser un trajet plus ou moins long depuis leur lieu de résidence. Ils étaient alors directement sortis de leur cage ou déjà à l'extérieur, en liberté dans un parc ou attachés à la stake-out, la ligne permettant d'attacher les chiens lors de rassemblement de chiens de traîneau.

La seconde série de clichés, notée J7-8, est réalisée après 7 à 8 jours d'engagement dans La Grande Odyssée et généralement au cours de la matinée puisque la plupart des étapes ont eu lieu l'après-midi. L'acquisition se fait alors sur des animaux au repos dont la dernière sollicitation physique importante date à minima de la veille.

b. Modalités d'acquisition des images thermiques

Les clichés ont été systématiquement acquis à l'abris du soleil, sur des animaux ayant les poils secs et positionnés de sorte que leur poids soit réparti de la façon la plus symétrique possible et dans la mesure du possible immobiles.

La contention de l'animal, réalisée par le musher, le handler ou un membre de l'équipe vétérinaire, a été limité au strict minimum pour limiter l'échauffement de la surface du poil qu'elle risquerait d'entraîner. Les clichés ont ensuite été acquis avec la caméra positionnée le plus horizontalement possible par rapport à l'articulation cible. La distance objectif-articulation a été maintenue constante dans la mesure du possible avec environ 30 cm de distance pour les articulations du coude, du carpe, de la main, du grasset, du tarse et du pied tandis qu'une distance d'environ 50 cm distance était nécessaire pour les articulations de l'épaule et de la hanche afin d'avoir l'intégralité de l'articulation sur la photo.

Chaque série de clichés est constituée de 32 thermogrammes, avec un cliché de face et de profil de 4 régions anatomiques de chaque membre. Pour les membres thoraciques droit et gauche, l'épaule, le coude, le carpe et la main ont été photographiés. Pour les membres postérieurs droit et gauche ce sont la hanche, le grasset, le tarse et le pied qui ont été photographiés. Dans un souci de simplification de la notation, nous utiliserons la terminologie « face » que cela soit pour les membres antérieurs ou postérieurs, bien que les clichés de « face » des membres postérieurs correspondent en réalité à des clichés de la face caudale du membre, comme visualisable sur la **Figure 18**.

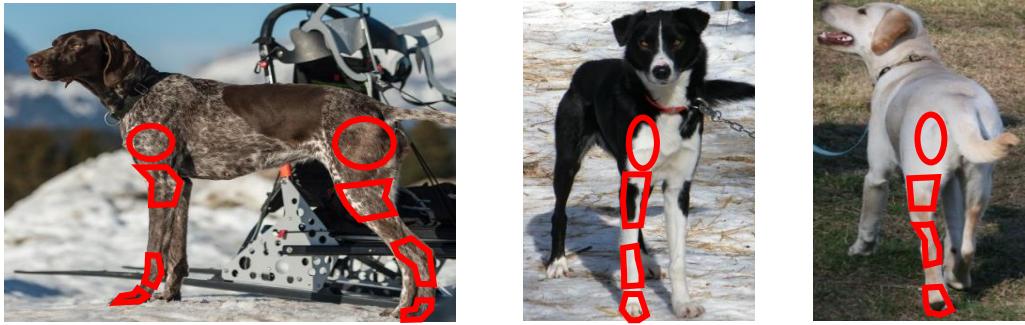


Figure 18 : Localisation des zones ciblées lors des acquisitions thermiques

c. Mesure de la durée d'acquisition des données

Pour chaque chien, les 32 thermogrammes ont été acquis à la suite les uns des autres sans interruption. La durée totale d'acquisition a été calculée par différence entre l'heure d'acquisition du dernier cliché et celle du premier cliché. Les heures d'acquisition, précises à la seconde, font partie des données fournies par la caméra thermique pour chaque thermogramme et sont disponibles via les propriétés de l'image sur tout ordinateur.

3. Réglage de la caméra thermique

Pour pouvoir comparer visuellement les articulations droites et gauches, il fallait que l'échelle de température utilisée pour un côté soit la même que pour l'autre. Les échelles ont donc été définies suivant les réglages automatiques de l'appareil lors de l'acquisition du premier cliché et conservés identiques pour l'acquisition de tous les clichés d'un même chien.

Pour ce qui est de la palette, d'après la littérature(10) et les conseils du Dr Vétérinaire Kimberley Hennaman, pionnière de l'imagerie thermique en médecine canine, la palette RContraste est la plus adaptée pour mettre en évidence de faibles différences de chaleurs. C'est donc celle qui a été utilisée pour traiter l'intégralité des thermogrammes. Le réglage se faisant directement sur la caméra, il a été effectué lors de l'acquisition du premier thermogramme et n'a plus été modifié par la suite.

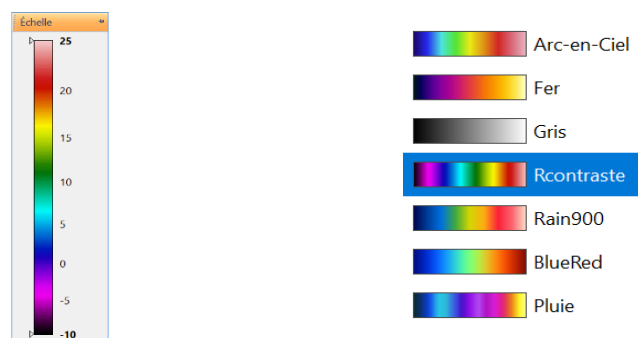


Figure 19 : Exemple d'échelle de température et de palettes utilisées lors de l'acquisition des données

Comme détaillé précédemment, tout corps possède une émissivité propre. Il convient de régler la caméra en fonction du type de matière émettant le rayonnement thermique que l'on souhaite étudier. Suite aux données collectées dans la littérature humaine et vétérinaire, l'émissivité a été réglée sur 0.98[°] (10) afin de se rapprocher au maximum de l'émissivité des corps animaux.

4. Traitement des images, extractions des données et analyse statistique

a. Récupération des données brutes

La lecture et exploitation des images thermiques s'est faite à l'aide du logiciel GRAYESS IRT Cronista 3.6 (Bradenton, USA).

Avant d'exploiter les thermogrammes, un tri des données a été effectué articulation par articulation suivant les critères d'inclusion et d'exclusion présentés ci-dessous.

Critères d'inclusion :

- Image thermique nette
- Zone d'intérêt entièrement délimitable sur l'image

Critères d'exclusion :

- Evidence d'une interférence type soleil ou poils humides faussant l'interprétation du thermogramme. Ce type d'interférence est facilement mise en évidence car il entraîne des anomalies thermiques sur toutes ou quasiment toutes les articulations.

Si malgré plusieurs essais de prise de mesure, le thermogramme considéré ne répond pas à un critère d'inclusion ou répond à un critère d'exclusion, il n'est pas pris en compte pour la suite de l'étude.

Sur chaque thermogramme inclus dans l'étude, la zone cible (articulation) a été délimitée et les températures minimale, moyenne et maximale de cette surface ont été relevées et répertoriées dans un tableur Excel. La délimitation a systématiquement été effectuée par la même personne. Pour les épaules et les hanches, les délimitations de face et de profil ont été réalisées à l'aide de cercles centrés sur les articulations de sorte que le rayon soit maximal tout en maintenant l'intégralité de la surface du cercle sur la projection des membres. Pour le coude, le carpe, la main, le grasset, le tarse et le pied, les délimitations de face et de profil ont été réalisées à l'aide de polygones en se basant sur les zones de projection des repères anatomiques de l'articulation, comme illustré sur l'exemple présenté sur la **Figure 20** ou en **Annexe 3**. La température moyenne est ensuite calculée par le logiciel par moyenne arithmétique des températures calculées pour chaque pixel de la zone délimitée.

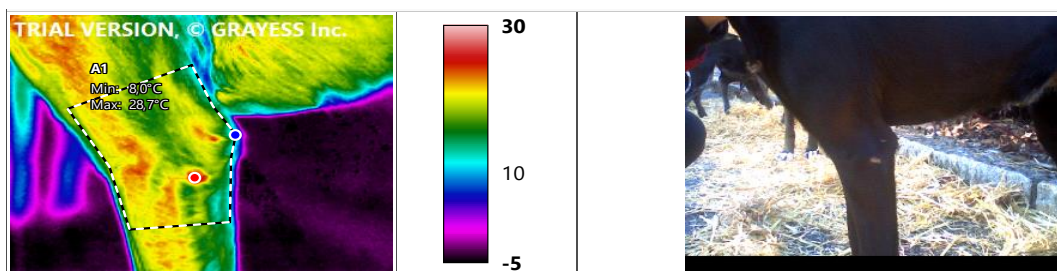


Figure 20 : Exemple de délimitation d'une articulation via le logiciel GRAYESS IRT Cronista

Les différences de température minimale, maximale et moyenne entre chaque articulation droite et gauche, de face et de profil ont ensuite été calculées.

De plus, sur chaque image, la température extérieure a été mesurée en un point situé hors des zones influencées par une source de chaleur (chien, homme, moteur, etc). Une moyenne a ensuite été calculée à partir des 32 mesures réalisées, permettant de compenser l'imprécision de la mesure et d'obtenir une température extérieure moyenne pour chaque animal.

Une fois l'ensemble des données répertoriées dans le fichier Excel, on obtient un tableau tel que celui présenté par la **Tableau 2**. Par soucis de simplification, ce tableau d'exemple ne présente que les données de l'épaule de face avec les valeurs de l'épaule droite et de l'épaule gauche.

Date	Nom	Musher	T° Moy ext.	Ep DF	T° ext	T° max	T° moy	T°min	Notes
11/01	Brave	V.	-3,978125		-2	25,9	18,8	13,6	RAS

Ep GF	T° ext	T° max	T° moy	T°min	Notes	Diff max	Diff moy	Diff min
	-2	30,1	19,3	13,5	RAS	4,2	0,5	0,1

Tableau 2 : Exemple de tableau Excel répertoriant les données acquises grâce au logiciel d'analyse

- T° Moy ext. = température moyenne calculée grâce aux 32 mesures effectuées
- Ep DF = Epaule droite de face Ep GF = Epaule gauche de face
- T° ext = température extérieure relevée via le logiciel pour ce thermogramme
- T° max/moy/min = température maximale/moyenne/minimale mesurée de la zone cible
- Diff max/moy/min = différence de température calculée entre les températures maximales/moyennes/minimales des articulations droites et gauches

b. Comparaisons des températures moyennes

Après description des données brutes, nous avons choisi de ne retenir que les températures moyennes afin d'évaluer l'influence de certains paramètres sur les températures mesurées. Les quatre comparaisons réalisées sont :

- la comparaison des températures moyennes des articulations entre elles,
- la comparaison des températures moyennes des articulations droite et gauche
- la comparaison des températures moyennes de face et de profil pour chaque articulation
- la comparaison des températures moyennes chez les chiens de type « Nordique » et ceux de type « Eurohound ». Le type « Nordique » comprend des chiens de race Husky ou de race Alaskan Husky.

En résumé, nous nous intéresserons à l'influence de l'articulation, de la latéralisation, de l'orientation et de la race sur la température moyenne de surface.

Par la suite les températures moyennes obtenues lors de l'examen d'admission, notées J0 et celles obtenues lors de l'examen thermique de contrôle 7 à 8 jours plus tard, notées J7-8 ont été comparées.

Les températures moyennes de l'environnement à J0 et J7 ont également été relevées à chaque mesure par la caméra thermique et les moyennes de ces relevés à J0 et J7 ont été comparées.

c. Traitement statistique des données

Une série de statistiques descriptives a été menée pour chaque triptyque articulation/latéralisation/orientation (exemple : Epaule Gauche de Face) ainsi que pour chaque articulation par sous-groupe d'intérêt. Le test de Shapiro-Wilk a permis d'évaluer la normalité des données et les comparaisons entre les divers groupes ont donc pu être traités avec des tests paramétriques. Ainsi, pour chaque période considérée, les comparaisons des températures moyennes par articulation entre deux sous-groupes (orientation, latéralisation et race) ont été réalisées à l'aide d'un test de Student bilatéral tandis qu'une ANOVA à un seul facteur a permis de comparer les températures des articulations entre elles. Enfin un test de Student univarié a été utilisée pour comparer les températures (des articulations et de l'environnement) entre J0 et J7-8. Une valeur de $p \leq 0,05$ est considérée comme significative. Un test post-hoc de Dunnett associée à une correction de Bonferroni a été appliquée si nécessaire.

Les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide des logiciels Real Statistics Using Excel® (Real Statistics Resource Pack software (Release 6.2). Copyright (2013 – 2019) Charles Zaiontz) et R® (R Development Core Team (2005). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria).

III. Résultats

D. Première partie : groupe de chiens sains thermographiés lors de l'examen d'admission

1. Données démographiques

Au total et après randomisation, 24 chiens sont sélectionnés pour faire partie du premier groupe de l'étude. Parmi eux, 15 chiens sont des chiens de type « Eurohound » et 9 sont des chiens de type « Nordique ». La moyenne d'âge du groupe est de $3,8 \pm 2,22$ ans et l'on retrouve 8 femelles et 16 mâles.

2. Utilisation pratique de la caméra thermique

Afin d'évaluer si la caméra thermique est adaptée à une utilisation prophylactique et diagnostique en conditions de course, nous détaillerons ci-dessous les principales caractéristiques de son utilisation au cours de notre étude :

- Facilité de réglage :

- Palette de couleur et émissivité identiques pour l'ensemble des acquisitions
- Réglage de l'échelle une fois par animal, qui s'effectue en quelques secondes.

- Temps d'acquisition d'un thermogramme complet sur un chien :

- Moyenne : 7 minutes et 20 secondes \pm 1 minutes et 33 secondes.
- Minimum : 6 minutes et 13 secondes, Maximum : 9 minutes et 22 secondes.

- Tolérance des animaux à l'examen : Très bonne chez les chiens de traineaux. Aucune résistance à la contention n'a été observée.

3. Températures de surface obtenues sur les articulations de 24 chiens

Sur une population initiale de 24 individus, les températures de surfaces obtenues sont décrites dans le tableau présenté ci-dessous. Les valeurs correspondent aux moyennes arithmétiques calculées à partir des températures minimales, moyennes et maximales relevées sur chaque articulation droite et gauche, de face et de profil. Chaque valeur correspond donc à la moyenne de $24 \times 4 = 96$ températures.

	Epau	Coude	Carpe	Main	Hanche	Grasset	Tarse	Pied
Max.	23,27 \pm 4,51	24,55 \pm 4,10	20,31 \pm 4,34	17,72 \pm 5,35	21,78 \pm 5,96	23,63 \pm 4,63	19,10 \pm 3,35	15,72 \pm 3,76
Moy.	17,77 \pm 5,03	17,66 \pm 4,16	13,28 \pm 3,39	9,89 \pm 3,57	15,43 \pm 6,13	17,04 \pm 5,08	11,90 \pm 3,40	9,16 \pm 2,92
Min.	12,54 \pm 5,25	9,96 \pm 4,43	7,43 \pm 3,50	1,20 \pm 3,07	9,88 \pm 5,91	9,08 \pm 4,47	5,09 \pm 2,52	1,84 \pm 2,57

Tableau 3 : Températures de surface (moyenne \pm écart-type) de chaque articulation à J0

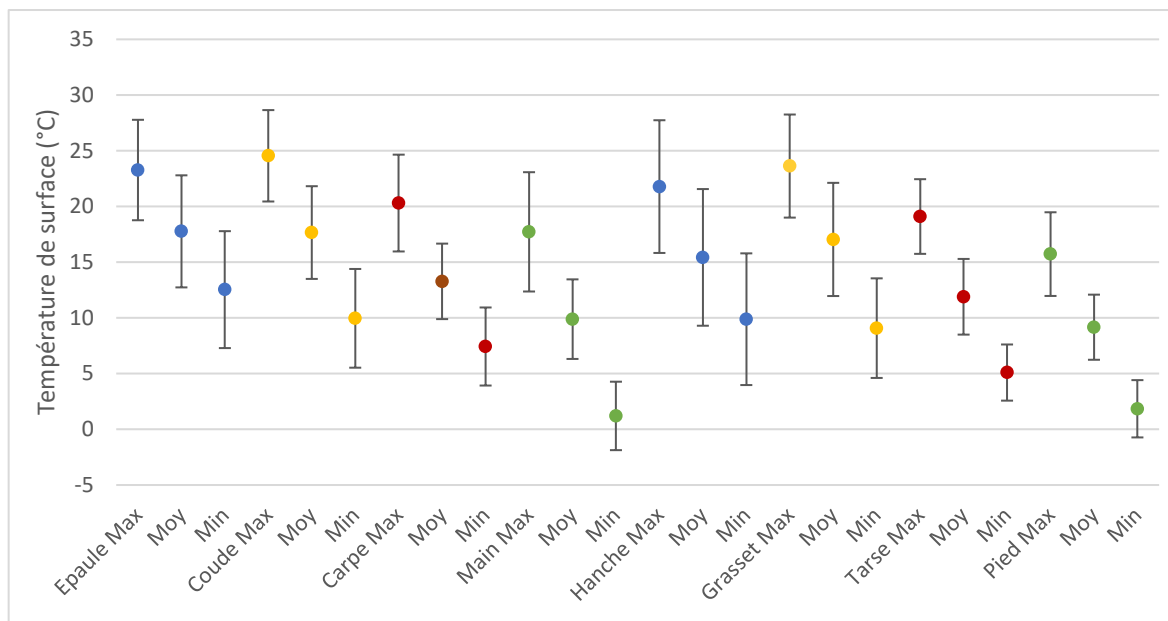


Figure 21 : Température de surface (moyenne \pm écart-type) en fonction de l'articulation à J0

4. Influence de la latéralisation sur la température moyenne

Afin d'obtenir les résultats présentés dans le **tableau 4**, les données « face » et « profil » ont été groupées pour chaque articulation.

Quelle que soit l'articulation, il n'y a pas de différence de température moyenne significative entre les côtés droit et gauche. Cela nous permet de considérer les articulations droites et gauches comme équivalentes pour la suite des analyses et donc de les regrouper dans un même sous-groupe.

	<i>Epaule</i>	<i>Coude</i>	<i>Carpe</i>	<i>Main</i>
Droite	17,95 \pm 5,08	17,88 \pm 3,95	13,65 \pm 3,53	10,04 \pm 3,39
Gauche	17,58 \pm 5,08	17,43 \pm 4,39	12,92 \pm 3,23	9,72 \pm 3,77

	<i>Hanche</i>	<i>Grasset</i>	<i>Tarse</i>	<i>Pied</i>
Droite	15,31 \pm 6,04	16,88 \pm 5,14	11,99 \pm 3,41	9,46 \pm 3,00
Gauche	15,41 \pm 6,29	17,19 \pm 5,07	11,84 \pm 3,42	8,86 \pm 2,84

Tableau 4 : Température de surface (moyenne \pm écart-type) en fonction de la latéralisation à J0.

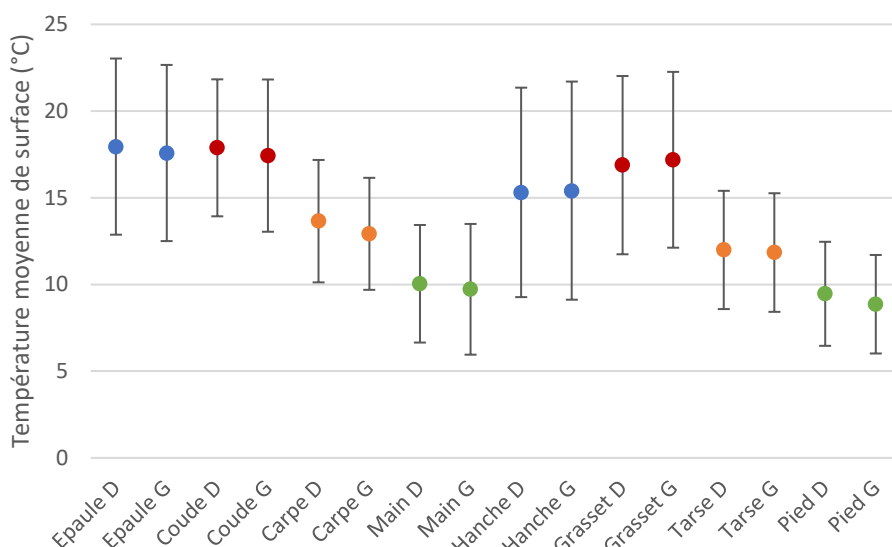


Figure 22 : Température moyenne de surface (moyenne \pm écart-type) en fonction de la latéralisation à J0

5. Influence de l'orientation sur la température moyenne

Afin d'obtenir les résultats présentés dans le **tableau 5**, les données « droite » et « gauche » ont été groupées pour chaque articulation.

On retrouve des différences significatives entre les orientations pour ce qui est de l'épaule et du carpe concernant les membres thoraciques, et pour la hanche, le grasset et le tarse concernant les membres pelviens. Aucune différence significative n'a donc été mise en évidence pour les articulations du coude, de la main et du pied. Lorsqu'une différence significative existe, le profil est toujours plus chaud que la face.

	<i>Epaule</i>	<i>Coude</i>	<i>Carpe</i>	<i>Main</i>
Face	16,57 \pm 4,93	17,10 \pm 3,34	12,49 \pm 4,95	9,91 \pm 3,28
Profil	18,95 \pm 4,16	18,21 \pm 3,73	14,09 \pm 4,13	9,86 \pm 3,44

	<i>Hanche</i>	<i>Grasset</i>	<i>Tarse</i>	<i>Pied</i>
Face	13,12 \pm 6,05	15,73 \pm 2,39	9,76 \pm 5,43	9,02 \pm 2,85
Profil	17,59 \pm 5,72	18,35 \pm 2,67	14,08 \pm 3,99	9,04 \pm 3,17

Tableau 5 : Température de surface (moyenne \pm écart-type) en fonction de l'orientation à J0

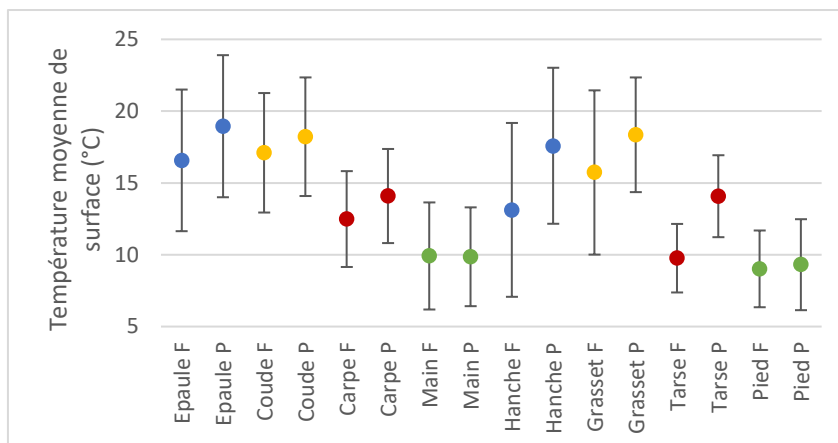


Figure 23 : Température moyenne de surface (moyenne ± écart-type) en fonction de l'orientation (F= Face /P= Profil) à J0

6. Influence du type racial sur la température moyenne

Afin d'obtenir les résultats présentés dans le **tableau 6**, les données « droite », « gauche », « face » et « profil » ont été groupées pour chaque articulation.

Des différences significatives ont été mises en évidence au niveau des températures moyennes des articulations de l'épaule, du coude et du carpe, ainsi que de celle de la hanche et du grasset. A l'inverse, les températures moyennes des articulations de la main, du pied et du tarse ne présentent pas de différence significative. Lorsqu'une différence est mise en évidence c'est toujours le groupe « Eurohound » qui présente une température moyenne de surface supérieure au groupe « Nordique ».

	<i>Epaule</i>	<i>Coude</i>	<i>Carpe</i>	<i>Main</i>
Eurohound	20,58 ± 3,51	20,08 ± 2,87	13,89 ± 3,06	9,81 ± 2,71
Nordique	12,77 ± 3,12	13,76 ± 2,71	12,28 ± 3,70	10,01 ± 4,70

	<i>Hanche</i>	<i>Grasset</i>	<i>Tarse</i>	<i>Pied</i>
Eurohound	18,60 ± 4,58	19,99 ± 3,24	12,09 ± 3,35	9,60 ± 2,61
Nordique	9,29 ± 3,53	11,85 ± 3,23	11,56 ± 3,49	8,45 ± 3,28

Tableau 6 : Température de surface (moyenne ± écart-type) en fonction de la race à J0

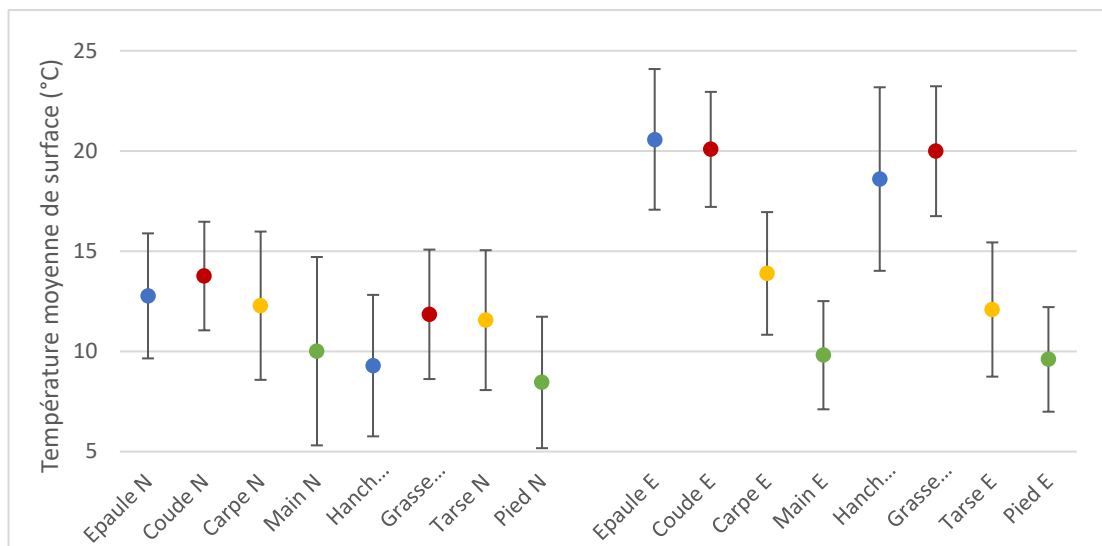


Figure 24 : Température moyenne de surface (moyenne \pm écart-type) en fonction du type racial (N= Nordique / E= Eurohound) à J0

7. Comparaison des températures moyennes entre les différentes articulations

Afin d'obtenir les résultats présentés dans le **tableau 7**, les données « droite », « gauche », « face » et « profil » ont été groupées pour chaque articulation.

Les températures moyennes de la majorité des articulations présentent une différence significative avec les autres articulations. Les seules différences non significatives se retrouvent lorsque l'on compare :

- le grasset avec l'épaule, le coude et la hanche
- l'épaule avec le coude
- la main avec le pied

	Epaule	Coude	Carpe	Main	Hanche	Grasset	Tarse	Pied
Moy.	17,77 \pm 5,03 ^{cdegh}	17,66 \pm 4,16 ^{cdegh}	13,28 \pm 3,39 ^{abdefgh}	9,89 \pm 3,57 ^{abcefg}	15,43 \pm 6,13 ^{abcdgh}	17,04 \pm 5,08 ^{cdgh}	11,90 \pm 3,40 ^{abcdefh}	9,16 \pm 2,92 ^{abcefg}

Tableau 7 : Température moyenne de surface (moyenne \pm écart type) des différentes articulations à J0.

a : différence significative par rapport au groupe Epaule ; b : différence significative par rapport au groupe Coude
c : différence significative par rapport au groupe Carpe ; d : différence significative par rapport au groupe Main
e : différence significative par rapport au groupe Hanche ; f : différence significative par rapport au groupe Grasset
g : différence significative par rapport au groupe Tarse ; h : différence significative par rapport au groupe Pied

On observe de façon globale, que plus l'articulation est distale, plus la température moyenne est faible. A l'exception de l'articulation du grasset dont la température moyenne s'avère être supérieure à celle de la hanche.

E. Deuxième partie : groupe de chiens sains thermographiés 7 à 8 jours après la première acquisition

1. Données démographiques

Cette seconde série de clichée est effectuée sur les chiens ayant participé à la première acquisition et étant toujours en course. Ce second groupe est constitué de 14 chiens dont 8 chiens de type « Nordique » et 6 chiens de type « Eurohound », répartis en 8 mâles et 6 femelles, dont l'âge moyen est de 2,5 ans. Les 10 chiens ne faisant plus partis de l'étude ont tous été retirés de la course suite à un abandon de l'équipe. Aucun chien n'a été retiré de l'étude suite à une blessure.

2. Température de surface moyenne en fonction de l'articulation

Afin d'obtenir les résultats présentés dans le **tableau 8**, les données « droite », « gauche », « face » et « profil » ont été groupées pour chaque articulation.

Sur une population initiale de 14 individus, les températures de surfaces obtenues sont représentées dans l'histogramme suivant :

	Epaule	Coude	Carpe	Main	Hanche	Grasset	Tarse	Pied
Moy.	11,17 ± 7,0	11,01 ± 6,3	8,15 ± 4,98	6,35 ± 5,87	6,91 ± 8,13	8,73 ± 7,84	6,63 ± 5,93	4,14 ± 5,99

Tableau 8 : Température moyenne de surface (moyenne ± écart-type) en fonction de l'articulation à J7-8

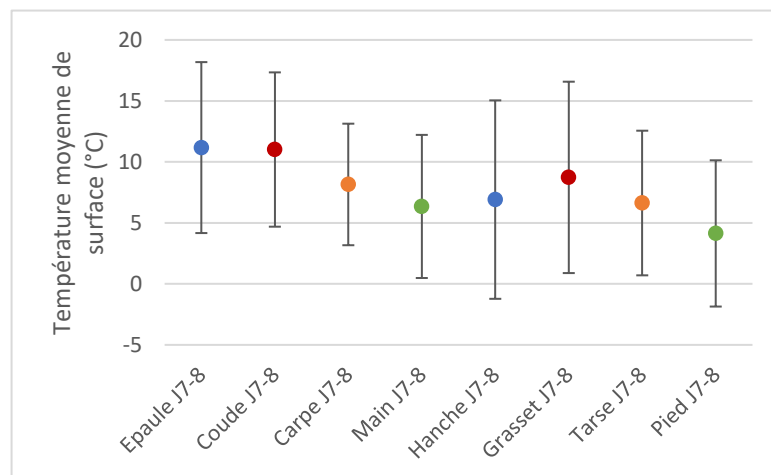


Figure 25 : Température moyenne de surface (moyenne ± écart-type) en fonction de l'articulation à J7-8

3. Influence de la latéralisation sur la température moyenne

Afin d'obtenir les résultats présentés sur la **figure 26**, les données « face » et « profil » ont été groupées pour chaque articulation.

Ici encore, quelle que soit l'articulation considérée, aucune différence significative de température n'a été mise en évidence entre les températures moyennes des articulations droite et gauche. Cela nous permettra encore une fois de considérer les articulations droites et gauches comme équivalentes et donc de les regrouper dans un même sous-groupe pour la suite des analyses.

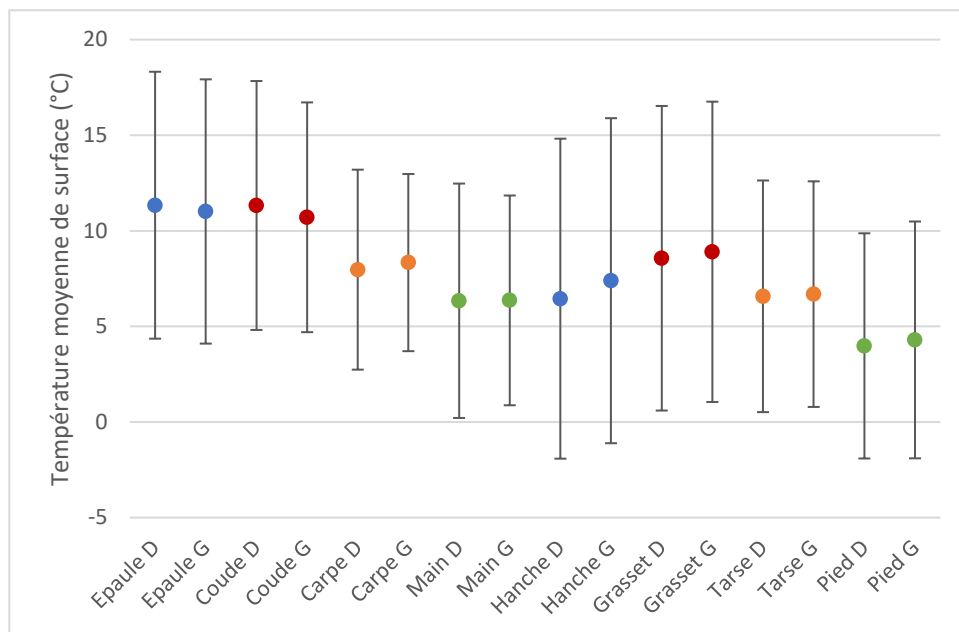


Figure 26 : Température moyenne de surface (moyenne \pm écart-type) en fonction de l'articulation et de la latéralisation à J7-8

4. Influence de l'orientation sur la température moyenne

Afin d'obtenir les résultats présentés dans la **figure 27**, les données « droite » et « gauche » ont été groupées pour chaque articulation.

On retrouve des différences significatives entre les orientations pour ce qui est du tarse, de la hanche et du grasset. Aucune différence n'a donc été mise en évidence pour les articulations du membre thoracique ainsi que pour la zone du pied. Lorsqu'une différence significative existe, et de la même façon que lors de l'examen thermique d'admission, le profil est toujours plus chaud que la face.

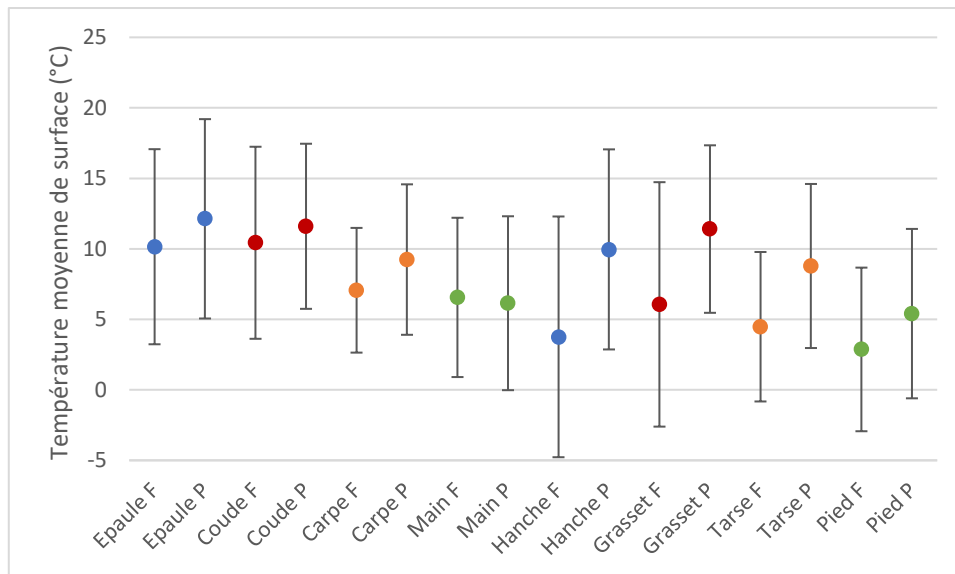


Figure 27 : Température moyenne de surface (moyenne \pm écart-type) en fonction de l'orientation (F = Face / P = Profil) à J7-8

5. Influence du type racial sur la température moyenne

Afin d'obtenir les résultats présentés dans le **tableau 9**, les données « droite », « gauche », « face » et « profil » ont été groupées pour chaque articulation.

Des différences significatives ont été mises en évidence au niveau des températures moyennes de toutes les articulations, avec le groupe « Eurohound » toujours plus chaud que le groupe « Nordique ».

		Epaule	Coude	Carpe	Main	Hanche	Grasset	Tarse	Pied
J7-8	Eurohound	17,16 \pm 4,49	16,85 \pm 3,11	12,25 \pm 3,60	11,57 \pm 4,13	13,3 \pm 6,56	14,88 \pm 5,63	11,62 \pm 4,44	9,34 \pm 4,52
	Nordique	5,58 \pm 3,26	5,91 \pm 3,15	4,55 \pm 2,71	1,78 \pm 2,1	1,13 \pm 4,9	3,35 \pm 5,04	2,26 \pm 2,7	-0,41 \pm 2,17
J0	Eurohound	20,58 \pm 3,51	20,08 \pm 2,87	13,89 \pm 3,06	9,81 \pm 2,71	18,60 \pm 4,58	19,99 \pm 3,24	12,09 \pm 3,35	9,60 \pm 2,61
	Nordique	12,77 \pm 3,12	13,76 \pm 2,71	12,28 \pm 3,70	10,01 \pm 4,70	9,29 \pm 3,53	11,85 \pm 3,23	11,56 \pm 3,49	8,45 \pm 3,28

Tableau 9 : Température moyenne de surface (moyenne \pm écart-type) en fonction du type racial à J7-8 et J0

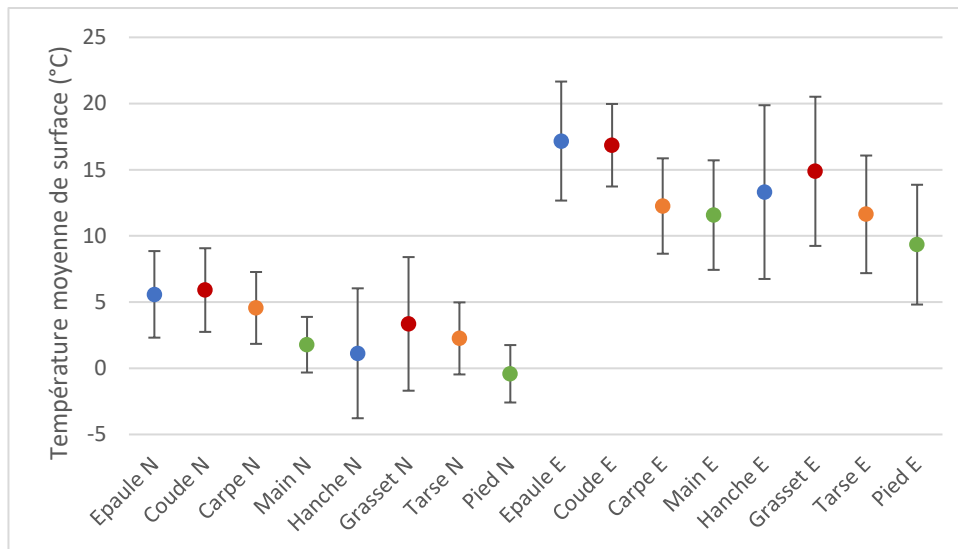


Figure 28 : Température moyenne de surface (moyenne \pm écart-type) en fonction du type racial (N = Nordique / E = Eurohound) à J7-8

6. Comparaison des températures moyennes de surface entre les différentes articulations

Afin d'obtenir les résultats présentés dans le **tableau 10**, les données « droite », « gauche », « face » et « profil » ont été groupées pour chaque articulation.

Parmi les 28 comparaisons simples effectuées, 15 sont considérées comme présentant une différence significative. On peut noter que la température moyenne de la zone du pied présente une différence significative avec les températures moyennes de toutes les autres articulations. Il en est de même pour l'articulation de l'épaule, sauf par rapport à l'articulation du coude.

A l'inverse, on peut noter que la température moyenne de surface de l'articulation du grasset ne présente aucune différence significative avec les autres articulations, sauf celle du pied.

	Epaul	Coude	Carpe	Main	Hanche	Grasset	Tarse	Pied
Moy.	11,17 \pm 7,0 ^{cdegh}	11,01 \pm 6,3 ^{cdegh}	8,15 \pm 4,98 ^{abh}	6,35 \pm 5,87 ^{abh}	6,91 \pm 8,13 ^{abh}	8,73 \pm 7,84 ^h	6,63 \pm 5,93 ^{abh}	4,14 \pm 5,99 ^{abcdefg}

Tableau 10 : Température moyenne de surface (moyenne \pm écart type) des différentes articulations à J7-8.

a : différence significative par rapport au groupe Epaul ; b : différence significative par rapport au groupe Coude
c : différence significative par rapport au groupe Carpe ; d : différence significative par rapport au groupe Main
e : différence significative par rapport au groupe Hanche ; f : différence significative par rapport au groupe Grasset
g : différence significative par rapport au groupe Tarse ; h : différence significative par rapport au groupe Pied

7. Comparaison des températures moyennes des différentes articulations et des températures extérieures à J0 et J7-8

Afin d'obtenir les résultats présentés dans le **tableau 10**, les données « droite », « gauche », « face » et « profil » ont été groupées pour chaque articulation et chaque série d'acquisition.

Lorsque l'on compare articulation par articulation, les valeurs de température moyenne obtenues lors de l'examen d'admission et lors du contrôle thermographique effectué 7 à 8 jours plus tard, toutes les températures moyennes obtenues à J7-8 sont significativement plus basses que celles enregistrées à J0.

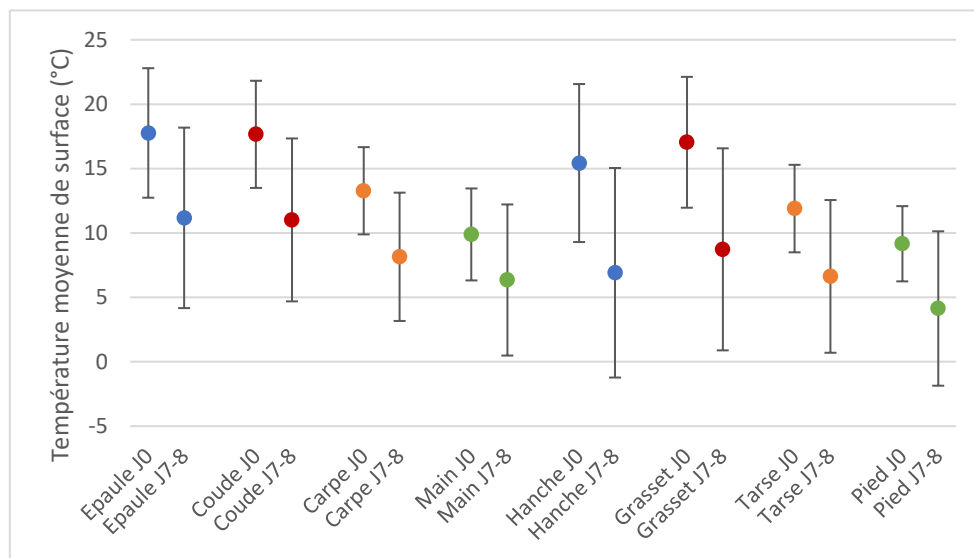


Figure 29 : Température moyenne de surface (moyenne \pm écart-type) en fonction de l'articulation et du jour d'acquisition (J0 = Examen à l'admission / J7-8 = Examen 7 à 8 jours plus tard)

Nous avons également comparé les moyennes des températures moyennes extérieures dont les résultats, significativement différents, sont présentés ci-dessous :

- J0 : - 3,49 \pm 2,40 °C

- J7-8 : - 10,38 \pm 5,91 °C

IV. Discussion

Cette première partie de l'étude nous a permis de montrer, qu'en termes de faisabilité, l'imagerie thermique était un outil adapté à une utilisation lors d'évènements sportif canin tel que La Grande Odyssée 2020. En effet, la caméra thermique s'est avérée être un outil facile d'utilisation, pouvant résister aux conditions environnementales imposées par ce type de course et offrant un résultat instantané. De plus, nous avons mis en évidence que les températures moyennes de surface des différentes articulations étudiées dans notre population suivaient toutes une loi normale, ce qui est encourageant quant à la répétabilité d'une telle expérience.

Concernant les températures minimales et maximales, les rares articulations ne suivant pas une loi normale s'en approchaient cependant de sorte que nous avons estimé que la variation inter-individuelles associée à la précision de la mesure et de l'opérateur rendaient ces mesures plus soumises à des biais externes que la température moyenne qui a donc été retenue pour l'analyse statistique.

Le choix des quatre paramètres comparés s'appuie sur la probabilité que ces derniers influent sur les températures de surfaces observées.

Nous avons émis des hypothèses portant sur l'influence de la latéralisation, de l'orientation, du type racial et de l'articulation considérée, sur la température moyenne de surface obtenue lors de l'examen d'admission et 7 à 8 jours plus tard. Nous allons voir que globalement les températures moyennes de surface se comportent de la même façon lors de l'examen d'admission et de contrôle.

En ce qui concerne la latéralisation, nous avons montré que la température de surface des articulations droites et gauches ne présentait aucune différence significative quelle que soit l'articulation étudiées, et ce, lors des deux séries d'acquisition. Cela nous a tout d'abord permis de regrouper les données « droite » et « gauche » dans un même sous-groupe, facilitant ainsi les analyses statistiques des trois autres variables étudiées. Cela nous a également permis d'appuyer l'hypothèse selon laquelle, lors de lésions unilatérales, il était possible d'utiliser le membre controlatéral en tant que témoin afin d'interpréter une anomalie de température. Or, la grande majorité des caméras thermiques possèdent une sensibilité de l'ordre du dixième de degré, permettant d'effectuer des comparaisons même lorsque la différence de températures entre les deux membres est minime. L'absence de différence significative de température entre une articulation et sa controlatérale chez le chien sain nous permet donc de faire l'hypothèse que l'observation d'une différence même minime entre 2 articulations controlatérales chez un même animal pourrait témoigner de l'existence d'une lésion.

Dans la littérature on ne trouve qu'une seule étude menée sur 10 chiens, ayant montré une répartition symétrique de la température de surface au niveau des membres chez un sujet

sain(7). Il existe cependant d'autres études, menées chez l'homme et le cheval, mettant en évidence cette répartition symétrique des températures de surface(82, 83).

De la même façon, nous avons pu confirmer que les chiens de type « Eurohound » présentaient des températures de surfaces plus élevées que les chiens de type « Nordique » pour la plupart des articulations, exceptés les zones de la main, du pied et du tarse lors de l'examen d'admission. Cela peut s'expliquer par le fait que les « Nordiques » possèdent des poils plus longs et un sous-poil plus épais que les « Eurohound », ce qui crée une couche d'air isolante entre la peau et le poil, limitant ainsi la propagation du rayonnement thermique. De plus, cette différence de pilosité est beaucoup moins importante au niveau des parties distales des membres, ce qui peut selon nous expliquer le fait que l'on ne retrouve pas de différence significative au niveau des zones sus-citées.

Lors de l'examen de contrôle le groupe « Eurohound » présente une température moyenne significativement plus haute que le groupe « Nordique » pour toutes les articulations, mêmes les plus distales. De plus, les écarts de températures sont bien plus importants puisque lors de l'examen de contrôle on enregistre des écarts de 7,7°C à 12,17°C alors qu'ils sont compris entre 0,2°C et 9,31°C à J0. Cela peut s'expliquer par une température extérieure beaucoup plus faible lors de l'examen de contrôle qui va majorer l'impact de la couche d'air isolante présente chez les chiens à poils longs.

Ces observations concordent avec une étude comparant les températures de surface des grassets de deux groupes de chiens classés suivant la longueur de leurs poils. Au cours de cette étude, il a été montré que les chiens à poils courts présentaient une température de surface supérieure à ceux à poils longs. Cependant il n'existe aucune étude comparative quantifiant ces conclusions(80).

Cette même étude s'intéresse également à l'influence de l'orientation sur la température de surface et a mis en évidence que chez les chiens à poils courts, l'aspect latéral du grasset est significativement plus chaud que son aspect caudal, alors que la différence est non significative pour les chiens à poils longs. Ces conclusions ne coïncident qu'en partie avec nos observations puisque dans notre étude, la température moyenne de surface du profil est supérieure à celle de la face ou de l'aspect caudal pour 5 articulations sur 8 à J0 et pour seulement 3 articulations sur 8 à J7-8. Les articulations restantes ne présentant pas de différence significative de température entre la face et le profil. Cette différence peut venir du fait que lors de notre analyse nous avons regroupés les données des chiens à poils courts et à poils longs, ce qui n'est pas le cas dans l'étude pré-citée. Cette étude montre également que dans tous les cas, la température de surface médiale est supérieure à celle que l'on mesure sur les trois autres orientations, ce qui peut être dû au fait que les poils sont plus courts sur cette zone du grasset. Bien que plus difficile à mettre en œuvre en pratique, il semblerait donc intéressant de considérer la face médiale comme une orientation à ne pas négliger lors de l'examen thermographique, surtout chez les chiens à poils longs.

Afin d'aller plus loin, il aurait donc été intéressant de pouvoir thermographier les quatre orientations de chaque articulation, cependant cela aurait été beaucoup trop chronophage que ça soit pour les mushers ou pour notre équipe et peu réalisable en pratique courante. Toutefois, il semble envisageable d'acquérir des images des quatre orientations lorsque l'on a une suspicion d'atteintes lésionnelles afin de renforcer la précision de nos observations thermiques.

Pour ce qui est de la comparaison des températures moyennes des différentes articulations, on observe lors des deux séries d'acquisition que l'articulation proximale est globalement toujours plus chaude que l'articulation qui la suit anatomiquement. La seule exception concerne le membre pelvien, où le grasset apparaît plus chaud que la hanche. En effet, plus les articulations sont proches du corps, plus elles ont une taille importante. Or, dans les conditions de froid de l'étude cela va avoir pour conséquences de diminuer l'impact de la perte de chaleur par convection puisque le rapport poids/surface augmente. Dans le même temps, les articulations proximales sont celles qui vont produire le plus de chaleur du fait de leur masse musculaire. Ces deux phénomènes physiologiques complémentaires permettent d'expliquer le gradient de température observé.

Ici encore les écarts de températures observés sont plus importants lors du contrôle effectué à J7-J8, ce qui peut s'expliquer par l'écart de températures extérieures enregistré. En effet, la convection thermique est alors majorée par augmentation du gradient thermique qui se crée entre la peau et le milieu extérieur, alors que la production de chaleur n'augmente pas. Or les articulations distales, plus petites et moins poilues sont particulièrement sujettes à la perte thermique par convection.

Concernant la comparaison des températures moyennes de chaque articulation entre J0 et J7-8, nous avons mis en évidence que les températures enregistrées à J7-8 étaient toujours plus basses que celles enregistrées à J0. Cependant, puisque la température moyenne extérieure à J7-8 est inférieure à celle de J0 de plus de 7°C, il est probable que l'écart de températures de surface mis en évidence soit en grande partie influencée par cet écart. Afin de s'affranchir de ce biais dans une prochaine étude, il conviendrait de réaliser les examens thermiques dans une pièce dont la température ambiante est régulée.

Le fait que la plupart des observations coïncident entre l'examen d'admission et celui de contrôle permet de faire l'hypothèse, qu'à priori, la course n'a pas d'impact majeur sur une articulation en particulier puisqu'aucune des articulations ne semblent avoir une température de surface beaucoup plus élevée que les autres, ce qui aurait pu évoquer la présence d'une inflammation par sur-sollicitation. Pour confirmer cette hypothèse une étude comparative de plus grande envergure est nécessaire.

De plus, cette concordance entre les observations est encourageante quant à la répétabilité présumée des résultats, bien qu'une fois encore, la confirmation de l'hypothèse nécessite une étude réalisée sur un grand effectif et/ou en conditions standardisées.

Enfin, il aurait été intéressant d'analyser les images juste après l'acquisition afin de compléter ou de réitérer l'examen orthopédique à la lumière des éventuelles anomalies mises en évidence sur le thermogramme. Cette analyse n'a malheureusement pas pu être réalisée car trop chronophage par rapport au rythme des arrivées des animaux sur site.

V. Limites de l'étude

A. Limites intrinsèques

Une des principales limites de cette étude concernent les conditions d'acquisition des images. En effet, il nous était impossible de les acquérir dans une salle à l'abris du vent, de la lumière et dont la température était régulée. Et même si tout a été mis en œuvre pour limiter l'impact des conditions extérieures, plusieurs séries d'images ont été influencé par le rayonnement solaire ou par le fait que le chien se soit couché sur un flanc juste avant l'acquisition. Cependant, dans la majorité des cas, ces anomalies affectaient l'ensemble des articulations du membre et il était donc aisé de les différencier d'une anomalie lésionnelle. Dans une utilisation pratique de la caméra thermique, il conviendra donc de porter une attention particulière aux différents éléments pouvant influencer le thermogramme avant de procéder à l'acquisition des images afin de ne pas surinterpréter une anomalie thermique.

Cette absence d'abris est également à l'origine d'un écart important entre les températures extérieures relevées à J0 et à J7-8, ne nous permettant pas de conclure sur l'effet course concernant les différences de température observées sur chaque articulation entre ces deux séries d'acquisition, ni de les mettre en commun dans une optique de description de valeurs de références.

De plus, lors du contrôle 7 à 8 jours après le début de la course, les thermogrammes ne sont pas associés à un examen orthopédique car compte tenu du travail liés aux blessures et contraintes de la course, il aurait été trop compliqué de mobiliser à nouveau un vétérinaire durant toute la période du contrôle. Cependant aucune anomalie thermique majeure, qui aurait motivé un examen orthopédique approfondi, n'a été mise en évidence au cours de ces contrôles.

Dans une moindre mesure, il convient de souligner plusieurs limites mineures de notre étude. Tout d'abord les thermogrammes n'ont été interprétés que par une personne initialement naïve concernant leur interprétation, bien qu'ayant été entraînée à leur lecture grâce aux recherches bibliographiques et à l'étude préliminaire. Il convient également de noter que lors du contrôle seuls 14 chiens sur les 24 initialement admis dans l'étude ont pu être contrôlé, puisque 10 chiens ont été retiré de la course suite à un abandon de l'équipe. Cette perte d'effectif entraîne une diminution de la puissance statistique des résultats présentés, par rapport à ceux de l'examen d'admission.

De plus, chez les chiens de type « Nordique », les articulations de l'épaule, de la hanche et du grasset présentent une pilosité particulièrement importante qui limite l'interprétation

des images thermiques et ce pour deux raisons. Tout d'abord, il semble très probable, bien que cela n'ait pas été prouvé, que la présence d'un pelage long et épais diminue la sensibilité de détection et de délimitation d'une anomalie thermique. De plus, ce type de pelage aura tendance à dissimuler les repères anatomiques rendant la délimitation de la région d'intérêt moins précise. L'interprétation des thermogrammes chez ces chiens-là doit donc toujours être associé à une analyse du potentiel impact de leur fourrure sur les images obtenues.

B. Biais de sélection

En épidémiologie, on parle de biais de sélection, lorsque l'échantillon analysé n'est pas représentatif de la population visée par l'étude et ne permet donc pas de confirmer ou d'infirmer objectivement les hypothèses émises. Dans les études basées sur le volontariat, le risque de biais de sélection est considérable.

Afin de le minimiser, nous avons décidé d'intégrer dans notre échantillon le maximum d'attelage en ne sélectionnant qu'un à deux chiens par attelage, permettant ainsi d'alléger la procédure pour chaque musher. Cette option, s'est avérée particulièrement chronophage puisqu'il a fallu trouver, pour chaque attelage, le moment convenant le mieux aux chiens et au musher mais beaucoup plus intéressante en termes statistiques puisque tous les attelages ont accepté de participer à notre étude. De plus le choix des chiens a été fait par randomisation de l'ordre de passage du chien à l'examen vétérinaire d'admission, permettant à nouveau de diminuer ce biais. Cependant, pour l'examen thermique de contrôle, plusieurs attelages avaient déclaré forfait et n'ont donc pas pu être contrôlé, créant de fait, un biais de sélection entre les deux groupes.

VI. Conclusion

Cette première partie de l'étude correspond à la première utilisation de l'imagerie thermique dans le cadre de La Grande Odyssée et nous a permis de montrer que la thermographie était un outil adapté à une utilisation dans le cadre d'un tel évènement canin. En effet, elle répond aux exigences météorologiques, d'itinérance et d'efficacité imposées par la course. La principale conclusion de cette étude concerne l'absence de différence significative, concernant les températures moyennes, entre articulations controlatérales. Cela nous permet d'interpréter une anomalie thermique entre ces deux articulations comme un potentiel signe de lésion et donc d'envisager une utilisation diagnostique de la caméra thermique. Nous détaillerons cette utilisation à travers l'analyse de cas clinique dans la deuxième partie de notre.

Cependant, une étude complémentaire s'intéressant à la fiabilité de la thermographie dans le cadre de la détection des lésions musculo-squelettiques dans le cadre de course de chiens de traîneaux reste indispensable avant de pouvoir affirmer que la thermographie est adaptée à une utilisation prophylactique et diagnostique par les équipes vétérinaires.

Partie B :

Description de cas cliniques utilisant l'imagerie thermique chez des chiens présentant des lésions musculo-squelettiques, suspectées ou avérées, apparaissant au cours de la course.

I. Objectif de l'étude

Au cours de cette seconde partie nous allons nous intéresser à l'utilisation de la caméra thermique en conditions de blessure au cours de la course, c'est-à-dire dans le contexte de lésions musculo-squelettiques, qu'elles soient suspectées ou avérées.

En effet, au cours des 12 jours d'épreuves, l'organisme des chiens est mis à rude épreuve. Comme vu précédemment, les lésions musculaires et articulaires font parties des affections fréquemment rencontrées par l'équipe vétérinaire. Certaines entraînent des symptômes francs tels que des boiteries ou des gonflements, quand d'autres ne sont parfois détectables que par l'œil entraîné du musher, qui observe alors une modification de l'attitude du chien durant la course sans toujours être capable de localiser le problème. Or nous avons vu, dans la partie bibliographique, que l'imagerie thermique pouvait permettre de détecter mais aussi de préciser la localisation de certaines atteintes musculo-squelettiques. Nous avons par ailleurs décrit dans notre première partie expérimentale un contexte d'utilisation de la caméra chez un panel de chiens sains.

Nous nous sommes donc intéressés, dans cette deuxième partie de l'étude expérimentale, aux chiens qui ont été examinés par l'équipe vétérinaire suite à une suspicion de lésions musculo-squelettiques, afin d'explorer l'éventuelle utilité de la caméra thermique dans ce contexte. Ici, aucune hypothèse principale n'a été émise puisque l'objectif était de décrire objectivement les différents cas cliniques rencontrés au cours de l'évènement à la lumière de l'examen thermique réalisé.

II. Matériel et méthode

A. Description des populations étudiées

A la fin de chaque étape, l'état de santé des chiens est rapidement contrôlé par un duo vétérinaire-étudiant vétérinaire sur la ligne d'arrivée. Puis, chaque équipe reçoit la visite d'un vétérinaire dans l'heure suivant son arrivée afin de vérifier qu'aucun d'eux n'a besoin de soins. C'est à ce moment-là que le musher peut informer le vétérinaire des potentielles anomalies observées durant la course. Des lésions peuvent également être détectées par le vétérinaire

au cours d'un examen clinique ou orthopédique. Pour être intégrés à l'étude, les chiens doivent répondre aux critères suivants :

- Présenter une affection orthopédique et/ou ostéo-articulaire, fortement suspectée ou avérée sur la base de l'anamnèse, de l'examen clinique et des éventuels examens complémentaires. L'inclusion peut se faire suite à un examen clinique de routine, à la demande du musher ou à la demande du vétérinaire ou de l'étudiant vétérinaire chargé de vérifier l'état physique des chiens sur la ligne d'arrivée de chaque étape, et ce, à n'importe quel moment au cours des 12 jours de course. Il peut par exemple d'agir de l'observation sur la ligne d'arrivée d'une franche boiterie ou au contraire d'une demande d'examen de la part du musher suite à une simple baisse de performance.

- Appartenir à un musher acceptant de participer à l'étude. Comme précédemment, un accord verbal a été jugé suffisant.

B. Matériel

Le matériel utilisé est le même que pour la première partie de l'étude et ne sera donc pas redétaillé.

C. Méthode

1. Recueil des données, examens clinique et orthopédique, réglage de la caméra

Concernant le recueil des données, les examens clinique et orthopédique et le réglage de la caméra, la méthode utilisée est identique à celle détaillée précédemment.

Cependant, puisque nous travaillons à présent dans le cadre de lésions, la composante douleur est à prendre en compte. Pour cela, une grille d'évaluation de la douleur a été définie en adaptant des grilles préexistantes aux spécificités de l'examen orthopédique. Nous nous sommes inspirés du score de Glasgow (*Glasgow Composite Measure Pain Scale*), de la grille d'évaluation de l'Université du Colorado et d'une grille, plus orientée vers les atteintes orthopédiques, utilisée dans une étude portant sur l'arthrose(84, 85). Un score entre 0 et 9 permet de classer la douleur en 4 catégories : absence de douleur, douleur légère, douleur moyenne, douleur sévère (**Annexe 4**).

Lorsque cela est possible, un contrôle thermographique est réalisé quelques jours après mise en évidence de la lésion et suivant la même méthode que lors de la première acquisition.

2. Acquisition des clichés

Pour ce qui est de l'acquisition des clichés, les conditions de positionnement de l'appareil et de contention restent identiques. Seul le nombre de clichés réalisés diffère par

rapport à la première partie de l'étude. En effet, seules les articulations concernées et leur controlatérales ont été thermographiées afin de diminuer le temps d'acquisition et donc de préserver la patience de l'animal pour d'éventuels examens complémentaires.

3. Analyse des données

Dans un premier temps, les images thermiques acquises au cours des 12 jours de course sont analysées qualitativement à l'aide du logiciel d'analyse thermique IRT Cronista en comparant visuellement le membre/région potentiellement lésé et son controlatéral. Une différence de température ou de pattern thermique entre les deux images est recherchée.

Dans un second temps, une analyse quantitative est réalisée via la comparaison des températures minimales, moyennes et maximales de la région d'intérêt et de sa controlatérale. On considère qu'il y a une anomalie lorsque les différences de températures avoisinent au minimum les 2°C(38) et que le pattern thermique peut correspondre à un pattern lésionnel. En effet, une différence importante de température peut également être due à un artefact. Par exemple si un chien est couché sur un de ses membres peu de temps avant l'acquisition, la plupart des articulations d'un même côté seront plus chaudes, mais on ne distinguera aucune zone pouvant correspondre à une unité anatomique.

Les données thermiques sont ensuite comparées aux données cliniques afin d'évaluer la concordance entre les anomalies observées à l'examen clinique et orthopédique et les anomalies thermiques.

III. Résultats

A. **Données démographiques**

Au cours des 12 jours d'épreuve, 10 chiens ont été inclus dans l'étude. Parmi eux, 4 chiens de type « Nordique » et 6 de type « Eurohound » dont 6 femelles et 4 mâles. L'âge moyen des chiens est de $2,5 \pm 1,35$ ans.

B. **Description des cas cliniques**

1. Linouk

a. Anamnèse, examen orthopédique et examens complémentaires

Linouk est un Husky de Sibérie mâle de 4,5 ans examiné le 13 janvier pour une boiterie légère du membre thoracique gauche. Le propriétaire de Linouk, nous rapporte qu'un mousqueton a été coincé dans l'espace interdigité du membre atteint, 15 jours avant l'apparition de la boiterie. Aucune anomalie n'avait été observé à l'examen clinique et

orthopédique d'admission réalisé le 11 janvier. Linouk a participé à l'épreuve du 12 janvier et la boiterie a été remarquée le 13 au matin.

Aucune anomalie n'a été observée à l'examen clinique. L'examen orthopédique montre un gonflement médial du carpe gauche, associé à un score de douleur de 3/9 suivant notre grille de douleur et une boiterie d'appui intermittente du membre thoracique gauche.

A l'échographie, une inflammation proximale du ligament collatéral médial gauche est mise en évidence. La radiographie montre, quant à elle, un gonflement des tissus mous en regard du carpe gauche.

b. Examen thermique

Afin de limiter les artefacts dus à la manipulation des articulations et aux conditions extérieures, les images thermiques ont été acquises avant la réalisation de la radiographie et de l'échographie dans le camion de l'équipe vétérinaire. Les 4 zones thoraciques (épaule, coude, carpe, main) ont été photographiées sur les deux membres, de face et de profil par abord latéral.

Il convient de rappeler que pour tous les thermogrammes présentés le membre droit est positionné à gauche et inversement afin de se placer dans la même configuration que lorsqu'on se place face à l'animal.

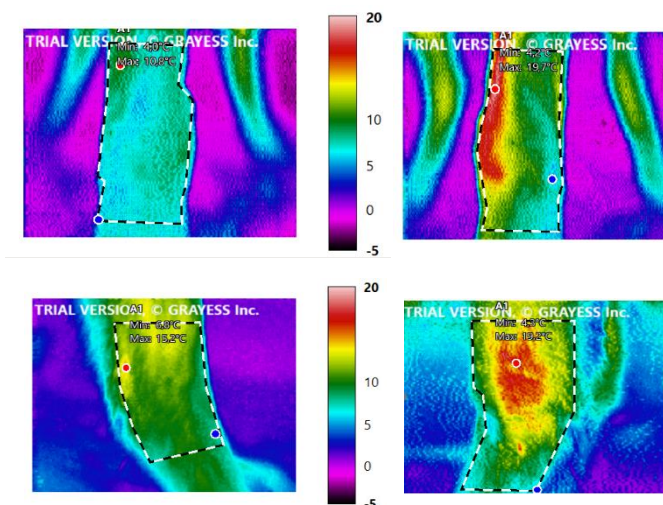


Figure 30 : Thermogrammes des carpes gauche et droit, de face et de profil de Linouk, le 13/01 (Husky)

De façon qualitative, on observe une nette différence de température entre le carpe gauche (plus chaud) et le droit, que cela soit sur la vue de profil ou de face. Sur la vue de face, on peut noter une zone plus chaude (mise en évidence par la couleur rouge) dans la région médiale du carpe gauche, pouvant correspondre à une atteinte pré-lésionnelle ou lésionnelle du carpe, ce qui coïnciderait avec les observations faites lors de l'examen orthopédique et les examens d'imagerie. Sur la vue de profil, la différence de température entre les deux carpes paraît moins importante.

	Carpe Droit	Carpe Gauche	Différence de T°
Face	7,3	11,1	3,8
Profil	10,6	11,8	1,2

Tableau 11 : Températures moyennes en °C mesurées au niveau du carpe de Linouk le 13/01

De façon quantitative, la différence entre les températures moyennes est bien plus importante sur la vue de face (3,8°C) que sur la vue de profil (1,2°C). Cette différence est cependant notable et peut être due à une répercussion de l'inflammation médiale. En effet, une inflammation même localisée affecte également les tissus environnants.

On a ici une concordance des observations réalisées grâce aux différents types d'exams (orthopédique, thermique, échographique et radiographique) permettant d'affirmer que Linouk souffre d'une inflammation du ligament collatéral médial du carpe gauche. A la suite de ce diagnostic, Linouk a été considéré comme inapte à continuer la course et a donc été déclassé en chien « accompagnant ». Il a été mis au repos jusqu'à la fin de l'évènement et une application régulière de Doloflamil® (gel de massage à base d'extraits et d'huiles essentielles de plantes) a été conseillée.

c. Contrôle thermique le 20/01

7 jours après le premier examen, un contrôle clinique et thermique a été effectué.

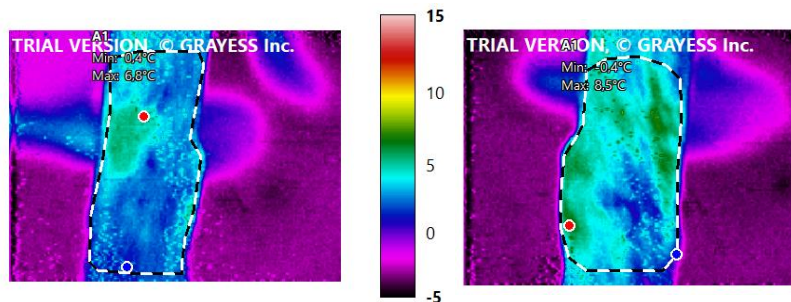


Figure 31 : Thermogrammes des carpes gauche et droite, de face de Linouk, le 20/01

	Carpe Droit	Carpe Gauche	Différence de T°
Face	3,1	4,1	1

Tableau 12 : Températures moyennes en °C mesurées au niveau du carpe de Linouk le 20/01

L'examen orthopédique a mis en évidence une diminution du gonflement du carpe gauche et une nette amélioration de la boiterie, qui était devenue difficilement perceptible. La thermographie a mis en évidence, que ce soit de manière qualitative ou quantitative, une diminution notable de la différence de températures moyennes entre les deux carpes. Sur la face, la différence de température moyenne n'est plus que de 1°C contre 3,8°C le 13 janvier.

Dans ce cas-là, l'imagerie thermique a donc permis d'appuyer la suspicion lésionnelle mais a également permis un suivi aisé et non invasif de la lésion au cours du temps. On peut facilement imaginer que si l'équipe vétérinaire n'avait pas eu accès à un matériel d'imagerie avancée (échographie et radiographie), l'imagerie thermique aurait permis d'avoir accès à de nouvelles informations concernant la localisation de la lésion.

2. Mystic

a. Anamnèse et examen orthopédique

Mystic est une femelle Eurohound de 3,5 ans. Le 14 janvier au matin, alors que Mystic a déjà couru deux étapes, une légère inflammation du tarse gauche est notée par sa propriétaire. Aucune anomalie n'avait été rapportée la veille après la course.

A l'examen orthopédique et ostéopathique, un gonflement latéral du tarse gauche est mis en évidence sans atteinte de la mobilité de l'articulation et sans douleur notable. Une échographie est réalisée et ne montre aucune atteinte ligamentaire ou tendineuse.

b. Examen thermique

Les images ont été acquises dans le camion de la musher afin de limiter les artéfacts dus au soleil. Les 4 zones du membre pelvien (hanche, grasset, tarse, pied) ont été photographiées de dos et de profil.

	Tarse Droit	Tarse Gauche	Différence de T°
Face	18,2	17,2	1
Profil	23,8	21,2	2,6

Tableau 13 : Températures moyennes en °C des tarses de Mystic, le 14/01

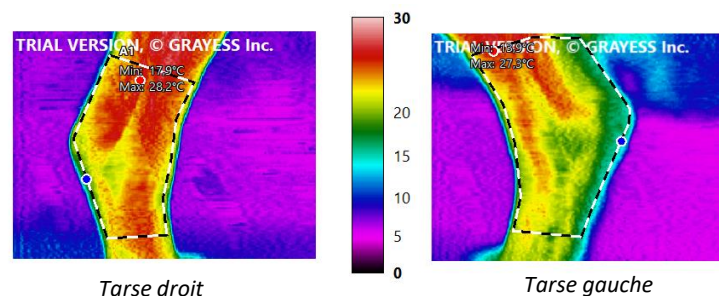


Figure 32 : Thermogrammes des tarses gauche et droit, de profil de Mystic, le 14/01

Que cela soit de façon qualitative ou quantitative, aucune anomalie thermique n'est mise en évidence, que cela soit sur la vue de dos ou de profil. Sur les vues de profils, on peut même observer une zone plus chaude à droite qu'à gauche. Cependant cette différence de température semble plus ou moins uniforme et se retrouve également sur les vues de profil des pieds. Cela semblerait donc plutôt correspondre à un artéfact qu'à la manifestation d'une

atteinte inflammatoire. Cependant, on ne peut pas exclure que la diminution de température du tarse gauche de plus de 2°C sur la vue de profil ne soit pas la manifestation d'une inflammation sur aigue bénigne suite à un faux mouvement par exemple. Ici l'imagerie thermique ne nous a pas permis d'arriver à une conclusion.

Mise à part le léger gonflement du tarse, aucune anomalie n'a été observée au cours des différents examens. Mystic a donc seulement été surveillée de près par son équipe et aucune autre anomalie n'a été signalée jusqu'à la fin de la course. Il est difficile dans ce cas bénin de conclure fermement quant à l'apport de l'imagerie thermique dans l'aide au diagnostic.

3. Paco

a. Anamnèse et examen orthopédique

Paco est un mâle Eurohound de 3,5 ans. Après l'épreuve du 14 janvier, une boiterie du membre thoracique droit est observée par son propriétaire. Paco est mis au repos pour la nuit et examiné par un membre de l'équipe vétérinaire le 15 janvier au matin, qui met en évidence une raideur de l'antérieur droit et un blocage scapulo-thoracique lors de l'examen ostéopathique. La boiterie n'est par contre plus observée et Paco ne montre aucun signe de douleur.

b. Examen thermique

L'acquisition des images s'est faite dehors, à l'abris de la lumière. Aucune anomalie n'est mise en évidence lors de l'examen thermique.

Aucun traitement n'a été mis en place et Paco n'a présenté aucun autre problème locomoteur à la suite de cela, et ce, jusqu'à la fin de la course.

4. Rübe

a. Anamnèse et examen orthopédique

Rübe est une femelle Eurohound de 1,5 ans. Le 15 janvier au matin, une légère boiterie d'appui de l'antérieur droit est mise en évidence. Elle est associée à une légère réticence à l'extension du coude, une légère tension dans le tendon du biceps et un score de douleur de 1/9.

b. Examen thermique

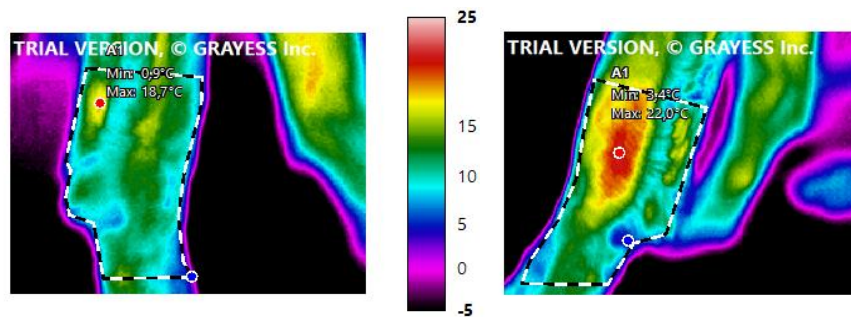


Figure 33 : Thermogrammes des carpes droit et gauche, de profil de Rübe, le 15/01 (Eurohound de Sylvia Ulrich)

A l'examen thermique aucune anomalie ne correspond aux anomalies détectées lors de l'examen orthopédique. La seule anomalie observable se trouve au niveau du carpe gauche de profil, qui présente une zone chaude. Cette anomalie ne se retrouve pas sur les vues de face. Cette zone de chaleur peut correspondre à un artefact ou à un début d'inflammation, d'un ligament collatéral par exemple. Afin d'écarter l'hypothèse d'un artefact, il aurait fallu réitérer l'examen 1h après la première acquisition en prenant garde à ce que le chien ne se couche pas sur ses carpes.

Etant donné qu'aucune lésion grave n'a été mise en évidence et que la boiterie était possiblement due à une contracture musculaire, seuls des massages réguliers et en profondeur ont été conseillés par l'équipe vétérinaire. Le suivi thermique n'a malheureusement pas pu être effectué du fait des contraintes de la course.

5. Winnie

a. Anamnèse et examen orthopédique

Winnie est une femelle Eurohound de 3,5 ans. Le 15 janvier au matin, un léger gonflement du carpe droit associé à de la chaleur est mis en évidence. Aucune douleur ne semble être associée à cette inflammation.

b. Examen thermique

Lors de l'analyse thermographique on remarque que le carpe droit est significativement plus chaud que le carpe gauche. Cependant on note également que l'intégralité du membre thoracique droit est diffusément plus chaud que le gauche sur les images de face. La différence de température n'est donc pas interprétable puisqu'elle résulte très probablement d'une exposition au soleil du membre thoracique droit juste avant l'acquisition. L'examen thermique ne permet donc pas de mettre en évidence une anomalie thermique. Rappelons cependant qu'une sensation de chaleur avait été détectée au niveau

du carpe gauche lors de l'examen orthopédique. Les examens thermique et orthopédique ne coïncident donc pas dans ce cas.

L'inflammation s'avérant légère et non douloureuse, seule une application pré et post course de froid a été conseillé par l'équipe vétérinaire.

6. Peak

a. Anamnèse et examen orthopédique

Peak est un mâle Eurohound de 2,5 ans. Le 14 janvier au soir, après la course, une boiterie d'appui du membre thoracique droit associée à une gêne au niveau du carpe droit a été observée. Le 15 au matin, la boiterie s'était résolue et la gêne n'était plus présente. A l'examen orthopédique aucun gonflement ou chaleur n'a été mis en évidence. Des manipulations ostéopathiques ont permis de libérer les derniers blocages présents.

b. Examen thermique

L'acquisition des images a été effectué le 15 au matin, avant toute manipulation ostéopathique. Les seules anomalies thermiques notables se situent au niveau du carpe de face et de profil. On peut donc considérer les données comme interprétables.

	Carpe Droit	Carpe Gauche	Différence de T°
Face	16,2	13,4	2,8
Profil	17,0	13,9	3,1

Tableau 14 : Températures moyennes en °C des carpes de Peak, le 15/01 (Eurohound)

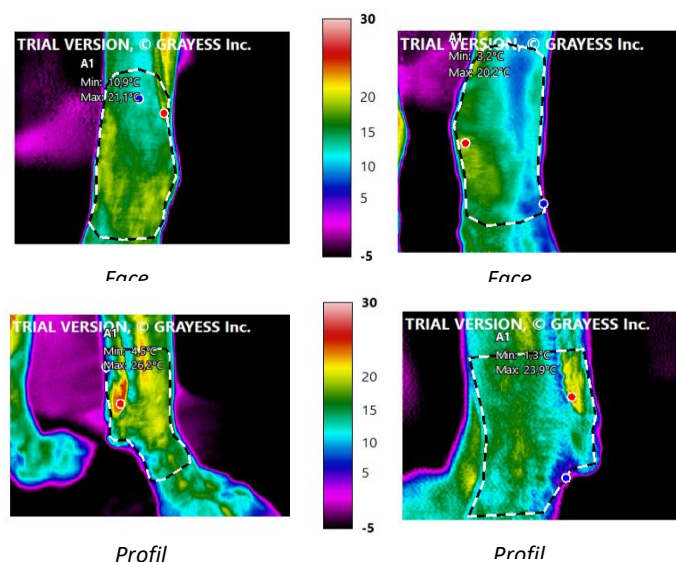


Figure 41 : Thermogrammes des carpes droit et gauche, de face et de profil de Peak, le 15/01 (Eurohound)

De manière qualitative, on observe des zones plus chaudes au niveau du profil et de la face droite. Cependant ces zones semblent plutôt diffuses, c'est-à-dire qu'elles ne permettent pas d'identifier une structure anatomique particulière pouvant donner une information sur la cause de la boiterie. La température moyenne du carpe droit est supérieure à celle du carpe gauche de 2,8°C sur la vue de face et de 3,1°C sur la vue de profil. On peut donc conclure que le carpe droit présente une température moyenne de surface significativement supérieure au carpe gauche. Cette différence coïncide avec les observations rapportées par le musher.

Au vu de l'amélioration de la boiterie durant la nuit et en l'absence de douleur, Peak a été autorisé à continuer la course avec des contrôles ostéopathiques régulier et l'administration d'Algicroc® deux fois par jour a été conseillé. L'Algicroc® est un complément alimentaire à base de plante qui vise à améliorer le confort articulaire et musculaire grâce à des propriétés anti-inflammatoires.

Un suivi thermique aurait été intéressant mais n'a pas pu être effectué à cause des contraintes liées à la course.

7. l'Run

a. Anamnèse, examen orthopédique et prise en charge

l'Run est un mâle Husky de Sibérie de 6,5 ans. Le 18 janvier, alors qu'l'Run était dans sa cage, un autre chien a mordu l'extrémité de son membre thoracique droit. Après l'incident, l'Run présentait une boiterie de soutien du membre thoracique droit, une douleur gradée à 6-7/9 et une plaie de 1,5cm x 1cm sur la face latérale des métacarpes droits. A la manipulation une fracture a été suspectée. Sous sédation, la plaie a été tondue, désinfectée et pansée. Les radiographies ont confirmé la suspicion clinique par la visualisation de fractures des métacarpes 3 et 4. Un pansement contentif type Robert-Jones a été réalisé et un traitement antibiotique (fracture ouverte), anti-inflammatoire et analgésique a été mis en place.

b. Examen thermique

L'examen thermique a été réalisé dans le camion vétérinaire avant la tonte, environ 30 minutes après la morsure, mais seules les faces ont pu être acquises pour le confort de l'animal.

	Main Droite	Main Gauche	Différence de T°
Face	9,7	1,8	7,9

Tableau 15 : Températures moyennes en °C des mains d'l'Run, le 18/01 (Husky)

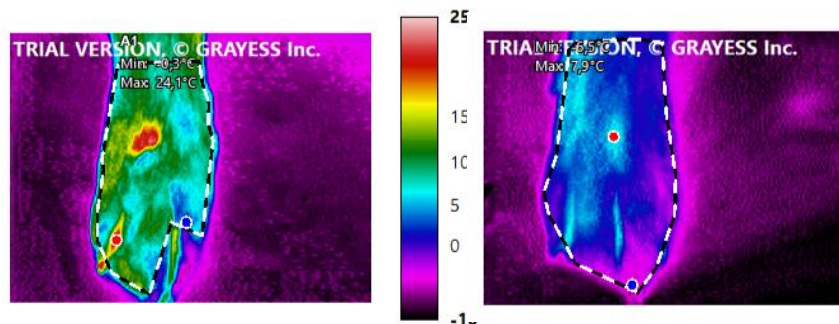


Figure 35 : Thermogrammes des métacarpes droit et gauche de face d'I'Run, le 18/01 (Husky)

On peut observer que l'extrémité droite est globalement plus chaude que la gauche. La différence entre les températures moyennes droite et gauche est de 7,9°C. Il faut cependant rester prudent lors de l'interprétation de ces données car avant l'acquisition des clichés, le membre droit avait été manipulé et donc inévitablement réchauffé. Il est donc difficile d'estimer à quel point les manipulations ont influencé la température de surface de la zone. La zone rouge au centre de l'extrémité droite correspond à la plaie qui était, alors, recouverte de sang.

Un suivi thermique aurait été intéressant mais n'a pas pu être réalisé à cause de la présence du pansement contentif.

Dans cette situation, l'examen thermique tel qu'il a été réalisé n'a qu'un intérêt très limité puisqu'il n'apporte aucune information supplémentaire primordiale au vétérinaire. Cependant, malgré le risque de biais lié à la manipulation, il s'agit de la blessure la plus grave qu'on ait pu observer sur cette édition, et elle est associée aux différences droite-gauche les plus importantes en termes de thermogramme. De plus, dans le cadre d'une pratique classique, le suivi thermique d'une fracture lors des visites de contrôle peut permettre de suivre l'évolution de l'inflammation et la réponse au traitement.

8. Noisette

a. *Anamnèse, examen orthopédique et examens complémentaires*

Noisette est une femelle Eurohound de 2,5 ans. Le 18 janvier, après l'étape du jour, Noisette a présenté une boiterie d'appui franche du membre thoracique gauche et un gonflement dorsal du carpe gauche. Une sensibilité à la flexion et extension mais pas à la latéralisation a été mise en évidence. Le 19 au matin, l'examen orthopédique a été réitéré et n'a montré aucune boiterie ou douleur à la flexion/extension forcée. Une sensibilité à la flexion médiale et latérale a cependant été mise en évidence, signe d'une sensibilité des ligaments collatéraux. Le gonflement dorsal du carpe était quant à lui toujours présent. Sa localisation a amené les vétérinaires à suspecter une origine traumatique, ce qui a motivé la réalisation de radiographies. Ces dernières n'ont montré aucune anomalie. L'échographie a, quant à elle, mis en évidence une capsulite et un épanchement en face dorsale du carpe gauche.

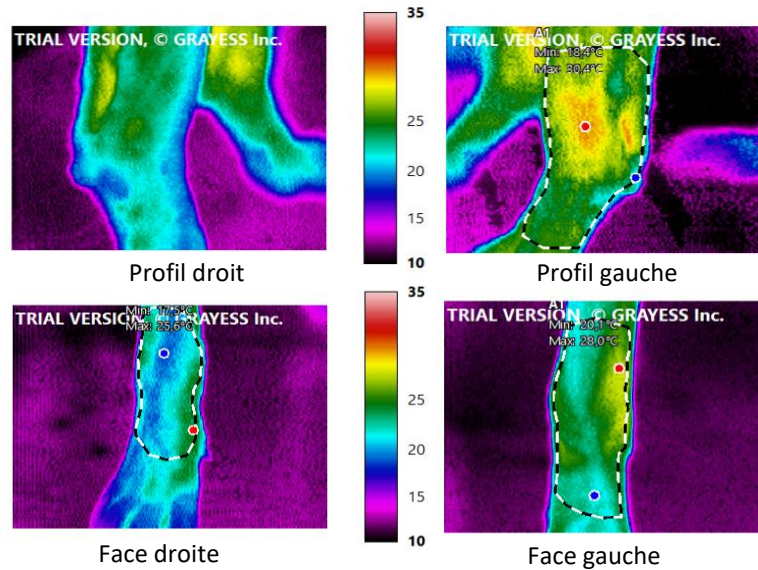


Figure 36 : Thermogrammes des carpes droit et gauche, de face et de profil de Noisette, le 19/01 (Eurohound)

b. Examen thermique

L'acquisition des images s'est déroulée le 19 janvier au matin afin de s'affranchir des modifications thermiques engendrées par l'activité physique intense de l'étape du 18 janvier. Noisette se trouvait dans une salle à l'abris de la lumière, à une température avoisinant les 20°C et aucune manipulation des membres n'avait été effectuée.

	Face			Profil		
	Droite	Gauche	Différence	Droite	Gauche	Différence
Coude	26,3°C	25,6°C	- 0,7°C	25,5°C	27,7°C	2,2°C
Carpe	21,4°C	24,1°C	2,7°C	22,5°C	26,1°C	3,6°C
Main	18,7°C	20,3°C	1,6°C	19°C	21,2°C	2,2°C

Tableau 16 : Températures moyennes en °C des coudes, carpe et main gauches et droites de Noisette, le 19/01 (Eurohound)

L'analyse qualitative des images thermiques montrent une différence de température entre les carpes droit et gauche, que cela soit de face ou de profil. De profil, on remarque également une différence de température entre le coude et la main gauche et leurs controlatérales, bien que les écarts de température soient plus faibles.

D'après les données chiffrées et les images thermiques, nous pouvons affirmer qu'il existe une différence significative entre les températures moyennes du carpe gauche et du carpe droit, avec un carpe gauche plus chaud. Donc, malgré une amélioration notable des signes cliniques entre le 18 janvier au soir et le 19 au matin, les informations obtenues grâce à l'échographie et l'imagerie thermique nous permettent d'affirmer que Noisette présentait une inflammation du carpe, vraisemblablement d'origine traumatique. Le fait que l'on retrouve des températures plus élevées au niveau du coude et de la main peut s'expliquer par

le fait que l'inflammation ne se limite pas à une structure précise et entièrement délimitée mais qu'elle affecte plusieurs structures adjacentes.

L'équipe vétérinaire a conseillé une mise au repos et l'administration d'extrait de Scrofulaire. La scrofulaire est une plante utilisée en phytothérapie pour son action anti-inflammatoire entre autres.

La course se terminant le 20 janvier, le suivi thermique n'a malheureusement pas pu être réalisé.

9. Maïko

a. Anamnèse et examen orthopédique

Maïko est un mâle Husky de Sibérie de 3 ans. Après l'étape du 20 janvier, Maïko a présenté une boiterie d'appui franche du membre thoracique gauche associée à une douleur à la manipulation du tendon du biceps brachial gauche et des muscles fléchisseurs des doigts. Lors de l'examen ostéopathique des contractures au niveau du muscle infra-épineux et du muscle brachio-céphalique ont été mises en évidence. Le 21 au matin, la boiterie était toujours présente mais plus discrète. L'échographie a mis en évidence des contractures au niveau des muscles fléchisseurs des doigts et du tendon du biceps brachial.

b. Examen thermique

Les images thermiques ont été acquises le 21 au matin dans une salle à l'abris de la lumière, à une température avoisinant les 20°C et avant toute manipulation des membres. Aucune anomalie n'a été mise en évidence que cela soit à l'analyse des données chiffrées ou lors de l'analyse qualitative. Cependant, dans notre protocole, seules les faces et profils des membres antérieurs sont photographiés. Or ici, l'hypothèse porterait davantage sur une atteinte des muscles fléchisseurs des doigts qui se trouvent sur la face caudale du membre. Des images de cette face auraient donc été intéressantes, bien que plus difficiles à réaliser en pratique étant donné la position dans laquelle il aurait fallu placer la caméra thermique.

Une mise au repos ainsi que des massages décontractants ont été conseillés par l'équipe vétérinaire.

10. Braveheart

a. Anamnèse, examen orthopédique et examens complémentaires

Braveheart est un mâle Husky de Sibérie de 3,5 ans. Le 21 janvier au matin, Braveheart présentait une boiterie d'appui du membre thoracique gauche associée à un gonflement du carpe, une sensation de chaleur et une sensibilité à la pronation. D'après son propriétaire, le gonflement était déjà présent la veille au soir, sachant que Braveheart avait participé à l'épreuve du 20 janvier.

La radiographie a permis de mettre en évidence un léger épanchement synovial et un ostéophyte de petite taille au niveau de l'aspect dorsal du carpe gauche. L'échographie a montré une entésopathie distale sur le ligament collatéral médial du carpe gauche.

b. Examen thermique

L'acquisition des images a été réalisé le 21 janvier au matin dans une salle à l'abris de la lumière, à une température avoisinant les 20°C et avant toute manipulation des membres. Aucune anomalie significative n'a été mise en évidence que cela soit à l'analyse qualitative ou quantitative. Or, une chaleur au niveau du carpe avait été détectée lors de l'examen orthopédique. L'examen thermique et orthopédique ne coïncident donc pas.

Au vu des résultats des examens d'imagerie, une entésopathie du ligament collatéral médial du carpe gauche a été diagnostiquée. Une mise au repos jusqu'à disparition de l'instabilité à la pronation ainsi des massages et étirements ont été conseillé par l'équipe vétérinaire.

C. Récapitulatif des cas cliniques

1. Localisation des lésions

Parmi les 10 cas cliniques que nous venons de détailler, neuf chiens présentent une atteinte d'un membre thoracique et un chien seulement présente une atteinte du membre pelvien. Concernant l'articulation lésée, le carpe est atteint cinq fois, tandis que les métacarpes et le tarse ne sont atteints qu'une fois chacun. Les trois derniers cas sont des atteintes musculaires plus ou moins bien localisées.

2. Examens thermiques sans anomalie

Au sein des 10 cas cliniques composant l'étude, 5 examens thermiques ne présentent aucune anomalie. Il convient de noter qu'il s'agit de cas bénins et globalement auto-résolutif. Cependant, parmi ces 5 cas cliniques, deux chiens (Winnie et Braveheart) présentaient une

élévation de température au niveau du carpe à l'examen orthopédique non détectable par imagerie thermique.

3. Examens thermiques présentant des anomalies concordant avec l'examen orthopédique

Parmi les 10 cas cliniques, 3 examens thermiques présentent des anomalies concordant avec l'examen orthopédique et les examens complémentaires. Dans les trois cas, c'est le carpe qui est en jeu. Dans deux des cas (Linouk et Noisette), les blessures étaient suffisamment sévères pour entraîner un retrait du chien de la course. Pour, le troisième cas, celui de Peak, la boiterie et la gêne détectée la veille ayant totalement disparu le lendemain, il a été autorisé au musher de continuer à faire courir Peak. De plus dans le cas de Linouk, l'apparition précoce de la lésion (le 13 janvier) nous a permis de réaliser un suivi thermique sept jours plus tard et d'observer une diminution de la différence de température entre les deux articulations et donc une diminution de l'inflammation, qui coïncidait avec l'amélioration clinique de Linouk.

L'imagerie thermique a donc permis de détecter des lésions graves comme moins graves et d'effectuer le suivi d'un cas clinique de manière satisfaisante.

4. Autres cas

Les deux derniers cas sont un peu plus particuliers. En effet, pour le cas d'Run, qui présentait une fracture des métacarpes 3 et 4 de l'antérieur droit, l'imagerie thermique ne semblait pas réellement indiquée puisque les informations que peut fournir la thermographie ne modifieront pas la prise en charge d'une fracture. Par contre, l'utilisation de l'imagerie thermique peut s'avérer utile lors du suivi post-opératoire. Pour le cas de Rube qui présentait une légère boiterie de l'antérieur droit associé à une tension au niveau du tendon du biceps, l'anomalie thermique mise en évidence se situait au niveau du carpe droit. Puisque les informations provenant de l'examen orthopédique et de l'examen thermique ne coïncident pas, il aurait été intéressant de réitérer l'examen thermique une heure plus tard afin de confirmer les anomalies thermiques.

IV. Discussion et perspectives

Les cas cliniques décrits ci-dessus permettent d'illustrer la complexité de l'utilisation de la caméra thermique dans le cadre de la recherche d'atteintes pré-lésionnelles ou lésionnelles. En effet, cette dernière nécessite une bonne connaissance du fonctionnement de la caméra, de solides bases en physiopathologie de la régulation thermique et une certaine expérience dans l'interprétation des images thermiques afin d'être en capacité d'exploiter correctement les thermogrammes obtenus. De plus, son utilisation doit s'inscrire dans une démarche globale où tous les facteurs sont pris en compte, puisque comme nous l'avons vu,

en particulier dans le cas de Winnie et Braveheart, les images obtenues ne coïncident pas toujours avec ce que l'on peut observer à l'examen clinique. Comme pour tout examen complémentaire, il est donc capital de conserver un esprit critique lors de l'interprétation d'un thermogramme.

Concernant la répartition des affections, elle se rapproche de ce qui est décrit dans la seule étude disponible sur les affections orthopédiques lors de ce type de course à fort dénivelé. En effet lors de la Grande Odyssée 2008, 64% des atteintes orthopédiques concernaient le membre thoracique. Mais c'était l'épaule qui était le plus souvent touchée devant le carpe qui se trouvait en deuxième position(77). Cependant au cours de notre étude nous n'avons pas pris en compte les atteintes des coussinets, qui avaient peu de probabilités d'être détectable par caméra thermique, et certaines atteintes orthopédiques qui n'ont pas pu être enregistré du fait de mon indisponibilité au moment où le vétérinaire réalisait l'examen orthopédique. Il faudra donc attendre les résultats de l'étude de Margot Leroux pour connaître la répartition exacte des différentes affections au cours de La Grande Odyssée 2020.

Les examens thermiques ne présentant aucune anomalie peuvent être répartis en trois catégories :

- L'affection atteignant le membre évalué n'est pas à l'origine d'une inflammation.
- L'inflammation induite est de trop faible intensité pour être détectée suivant notre protocole.
- Au moment de l'acquisition, l'inflammation ne s'est pas encore totalement mise en place et n'est donc pas encore détectable par imagerie thermique.

Parmi les cinq examens thermiques sans anomalie, deux présentaient une augmentation de température superficielle détectée par le vétérinaire lors de l'examen orthopédique. Or, normalement la caméra thermique possède une sensibilité bien supérieure à celle de la main pour détecter une différence de température. Une des hypothèses permettant d'expliquer cela serait la présence trop importante de poils empêchant les rayonnements thermiques d'atteindre le capteur de la caméra. Cependant bien que Braveheart soit un Husky, Winnie est une chienne de race Eurohound qui ne possède donc que peu de poils au niveau du carpe. Une autre hypothèse est l'erreur humaine. Il est possible que nos sens soient influencés par ce que l'on recherche. Cependant, les examens orthopédiques ont été réalisés par des vétérinaires ayant une véritable expérience pratique en orthopédie nous permettant d'attribuer une grande confiance à leurs examens.

Concernant les cas où les conclusions des examens thermique et orthopédique concordent, nous avons vu que le carpé était mis en jeu dans les trois cas. Cela peut s'expliquer par le fait que, comme nous l'avons vu précédemment, le carpe est une des articulations la plus souvent atteinte dans ce type de course et qui, de surcroît, présente des poils

relativement courts par rapport à ceux du coude ou de l'épaule, ce qui améliore la sensibilité de notre examen thermique.

En pratique, l'imagerie thermique est déjà utilisée lors de course de chiens de traîneaux comme outil de détection d'atteintes pré-lésionnelles ou lésionnelles. On peut citer le Dr Henneman, vétérinaire de l'Iditarod depuis 2010 et diplômée du « American Board of Thermology », qui utilise cette technologie lors de l'examen vétérinaire d'admission ainsi qu'au cours de la course afin de compléter ses observations cliniques. Au cours d'un échange, le Dr Henneman nous a fait part d'un de ses nombreux cas cliniques où la thermographie lui a permis de mettre en évidence une atteinte musculo-squelettique. Lors de l'examen vétérinaire d'admission, l'examen thermique montrait une augmentation anormale de température au niveau du 3^{ème} doigt du membre thoracique gauche (**Figure 28**). L'examen orthopédique a permis de confirmer la présence d'une tendinite au niveau de ce doigt et le chien a été retiré du groupe de chiens autorisés à prendre le départ de la course. En effet même si une telle lésion peut paraître bénigne, les animaux autorisés à prendre le départ de la course s'apprêtent à effectuer plus de 1000 kilomètres de course en autonomie. Laisser un chien prendre le départ alors qu'il n'est pas au maximum de ses capacités correspond à faire courir un risque de blessure de fatigue au chien et un risque d'abandon au musher.

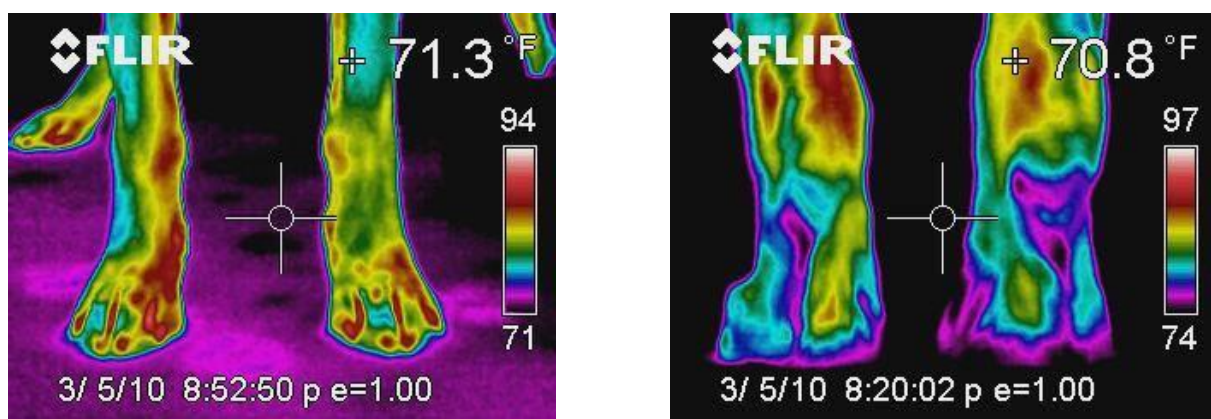


Figure 37 : Thermogrammes de face et de profil de l'extrémité distale des antérieurs d'un chien réalisé lors de l'examen vétérinaire d'admission à l'Iditarod. Mise en évidence d'une tendinite au niveau du doigt 3 de l'antérieur droit. Images fournies par le Dr Henneman

Dans cet exemple l'imagerie thermique a donc permis à la vétérinaire d'orienter et de préciser son examen orthopédique, mettant ainsi en évidence une lésion qui n'aurait peut-être pas été détectée sans cet outil.

Par ailleurs, lors de notre étude un examen thermique complet hors interprétation des images thermiques, membre par membre et articulation par articulation, nécessitait entre 5 et 9 minutes d'acquisition. Or en pratique, et comme illustré sur la **figure 38**, il est possible d'observer plusieurs articulations et/ou plusieurs membres sur un même thermogramme ce qui constitue un gain de temps important. Le temps consacré à cet examen se justifie donc

aisément que cela soit lors de la prise en charge d'une lésion orthopédique ou dans le cadre d'un examen thermique prophylactique réalisé lors de l'examen d'admission.

Au vu de son faible encombrement, de sa résistance aux températures extrêmes et aux chocs et de la rapidité d'analyse des images acquises, la caméra thermique semble être un outil adapté et pouvant apporter une véritable plus-value à l'expertise vétérinaire dans le cadre des courses de chiens de traîneaux.

Pour aller plus loin dans cette étude il aurait été intéressant de faire un suivi clinique et thermique des cas rencontrés afin d'estimer s'il y était envisageable de considérer la thermographie comme un outil permettant de suivre l'évolution d'une lésion musculo-squelettiques. Durant la course et par manque de temps, nous n'avons réussi à réaliser qu'un seul suivi sur Linouk, qui se montre cependant encourageant puisqu'il a permis de mettre en évidence une diminution de la différence de température entre les membres droit et gauche par rapport aux températures obtenues lors de la première acquisition, ce qui concordait avec l'amélioration clinique observée.

V. Limites de l'étude

A. Limites intrinsèques

Le fait que cette étude soit réalisée durant une course a entraîné un certain nombre de contraintes qui s'avèrent être, pour certaines, les principales limites de notre étude.

En effet, puisque les premiers signes d'atteinte lésionnelle sont, pour la plupart, apparus au cours d'une épreuve il nous était impossible de connaître précisément les circonstances et l'heure de la lésion. Ce sont donc des informations manquantes concernant les commémoratifs des cas cliniques décrits.

De plus, le choix a été fait d'attendre le jour suivant l'apparition de la lésion pour réaliser les acquisitions thermiques par soucis d'organisation et afin d'éviter que l'échauffement thermique induit par l'exercice physique n'influence les thermogrammes. De ce fait nous avons pris le risque de ne pas détecter certaines anomalies rapidement résolutive. Il aurait également été intéressant d'effectuer un suivi thermique très rapproché de ce genre d'affection avec des images acquises le jour de la lésion et lendemain afin de conforter le vétérinaire dans sa décision de laisser l'animal en course en ne traitant pas ou de façon peu agressive.

Ensuite, afin de minimiser le temps d'acquisition et donc le temps que devait nous accorder les mushers dans leur planning de course très serré, seules les articulations sur lesquelles une suspicion lésionnelle avait été émise ont été thermographiées. Ce choix a eu pour conséquence de diminuer l'exhaustivité de notre examen thermique puisque qu'il nous était donc souvent impossible de vérifier que les autres articulations étaient exemptes d'anomalie thermique.

Enfin, et de la même façon que dans la première partie de l'étude, les thermogrammes ont été lus et interprétés par une personne ayant une expérience nouvelle en imagerie thermique. Des anomalies thermiques peu visibles n'ont donc éventuellement pas été mise en évidence.

B. Biais de sélection

Dans cette partie de l'étude, la sélection des cas cliniques s'est faite sur la base des cas évoqués au cours de la mise en commun des informations, effectuée chaque soir par l'intégralité de l'équipe vétérinaire.

En effet, lors de cette mise en commun, chaque vétérinaire récapitule les principales informations concernant les animaux qu'il a examiné au cours de la journée (lésions, évolution, traitement, etc). A partir de ce récapitulatif, une liste des animaux présentant ou susceptibles de présenter des lésions musculo-squelettiques était établie et servait de base pour le choix des animaux thermographiés le lendemain. Cette liste pouvait être adaptée suivant l'évolution clinique de l'animal sur la nuit. Cette méthode de sélection est à l'origine d'un biais de sélection important puisqu'elle impose que le musher ait considéré qu'une intervention du vétérinaire était nécessaire. Or, suivant les mushers, le seuil de demande d'un avis vétérinaire est très variable. En effet, certains mushers vont contacter l'équipe vétérinaire très rapidement alors que d'autres ne le feront quasiment jamais, et pour cause, certains mushers sont eux-mêmes vétérinaires.

VI. Conclusion

Cette seconde partie, bien que purement descriptive, permet d'illustrer le potentiel de la thermographie dans la prise en charge des lésions musculo-squelettiques dans le cadre de course de chiens de traîneaux. En effet, nous avons vu grâce à ces quelques cas cliniques que la thermographie semble effectivement en mesure de détecter des lésions orthopédiques lorsque ces dernières présentent une certaine gravité.

Lors d'affections orthopédiques et à l'exception de rares cas, il est très difficile de poser un diagnostic lésionnel sur la seule base de l'examen orthopédique. Il est alors nécessaire d'avoir recours à l'imagerie. La thermographie pourrait donc représenter l'examen réalisé en première intention lors d'une suspicion lésionnelle afin d'aiguiller le clinicien et d'affiner les premières conclusions obtenues grâce à l'examen orthopédique. De plus, au vu de la rapidité d'acquisition des clichés, cette technique pourrait permettre un suivi régulier des lésions améliorant ainsi la prise en charge à moyen et long termes.

Cependant, même si certains vétérinaires utilisent déjà cette technologie sur le terrain, il n'y a encore que trop peu d'études disponibles pour pouvoir affirmer que la thermographie est un outil fiable dans le cadre de la détection de telles lésions. Un développement de son utilisation et une systématisation de la description des lésions permettraient de compléter les connaissances disponibles dans ce domaine et ainsi objectiver la fiabilité de cette technique.

CONCLUSION

Les chiens de traineaux, et à fortiori les chiens sélectionnés pour participer à des courses telles que La Grande Odyssée, nécessitent une prise en charge médicale correspondant à leur statut d'athlètes de haut niveau. A cette fin, de plus en plus d'études sont réalisées sur le sujet.

Dans la première partie de notre étude portant sur 24 chiens participant à l'intégralité de la course, nous avons étudié les données des températures de surface des articulations appendiculaires ainsi que l'impact de différents facteurs sur les températures moyennes calculées par la caméra thermique, lors de l'examen d'admission et 7 à 8 jours plus tard. De nombreux facteurs sont en mesure d'influencer un thermogramme mais il nous semblait particulièrement intéressant, d'étudier dans un premier temps, l'influence de l'articulation, de la latéralisation, de l'orientation et de la race sur les températures obtenues. Cela nous a permis de montrer qu'il est possible de comparer une articulation et sa controlatérale afin de déterminer s'il existe des anomalies thermiques au niveau d'une des articulations, postulat indispensable à toute utilisation de l'imagerie thermique dans le cadre de lésions orthopédiques. Nous avons également pu confirmer que les chiens présentant une fourrure dense et longue ont une température de surface plus faible et que le profil d'une articulation est toujours plus chaud que sa face. De manière très intéressante il apparaît également que les articulations distales sont toujours plus froides que les articulations proximales. Ces éléments sont autant d'informations permettant à un vétérinaire d'interpréter un thermogramme de la manière la plus juste possible.

Malgré ces résultats encourageants, il apparaît que la température extérieure semble avoir un impact non négligeable sur les températures obtenues de sorte qu'il est aujourd'hui difficile d'établir des intervalles de références standardisées chez le chien sain, indépendamment de la race considérée. Cet impact semble plus important chez le chien Nordique.

Notre seconde partie, purement descriptive, nous a permis de mettre en lumière le potentiel de l'imagerie thermique en termes de détection lésionnelle dans le cadre des courses de chiens de traineaux. Cette étude de cas nous a également permis d'évaluer la faisabilité d'une telle utilisation. En effet, même si l'on considère toutes les limites précédemment détaillées de l'imagerie thermique, sa facilité et rapidité d'utilisation et d'interprétation en font un outil qui semble totalement adapté à une utilisation prophylactique et diagnostique, au chevet du patient. La thermographie permettrait donc à l'équipe vétérinaire d'améliorer la prise en charge des athlètes canins en complétant son éventail d'examen complémentaires disponibles. Lors d'une course telle que La Grande Odyssée, durant laquelle l'équipe vétérinaire a la possibilité de réaliser des examens radiographiques et échographiques, l'imagerie thermique peut permettre d'avoir une première estimation de l'étendue de la lésion. Toutefois, si l'on se place dans le cas de courses

itinérantes telle que l'Iditarod durant lesquelles il est beaucoup plus difficile d'avoir accès à des appareils d'imagerie conventionnels, la caméra thermique devient alors le seul outil d'imagerie facilement transportable et utilisable dans presque toutes les conditions météorologiques.


Cette étude représente une des premières analyses descriptives de l'utilisation de la thermographie chez le chien de sport. Les résultats s'avèrent encourageant et appellent à réaliser une étude sur de plus grands effectifs afin de tenter d'établir des intervalles de référence et d'étudier l'influence de la température extérieure sur les résultats obtenus pour pouvoir, ensuite, évaluer la sensibilité de la thermographie dans le cadre de la détection d'affections musculo-squelettiques lésionnelles ou pré-lésionnelles.

AGREMENT SCIENTIFIQUE

En vue de l'obtention du permis d'imprimer de la thèse de doctorat vétérinaire

Je soussignée, Géraldine JOURDAN, Enseignant-chercheur, de l'École Nationale Vétérinaire de Toulouse, directrice de thèse, certifie avoir examiné la thèse de Canelle FAUQUET intitulée « Étude de l'utilisation pratique de l'imagerie thermique des articulations chez le chien de traîneau en condition de course : description chez le chien sain et application à des cas cliniques lors de la Grande Odyssée 2020 » et que cette dernière peut être imprimée en vue de sa soutenance.

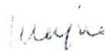
Fait à Toulouse, le 25/09/2020
Enseignant-chercheur de l'École Nationale
Vétérinaire de Toulouse
Docteure Géraldine JOURDAN



Yu :
Le Directeur de l'École Nationale
Vétérinaire de Toulouse
M. Pierre SANS



Vu :
Le Président du jury
Professeur Christian VIRENQUE



Vu et autorisation de l'impression :
Le Président de l'Université Paul Sabatier
M. Jean-Marc BROTO



Mme Canelle FAUQUET
a été admis(e) sur concours en : 2015
a obtenu son diplôme d'études fondamentales vétérinaires le : 05/09/2019
a validé son année d'approfondissement le : 16/07/2020
n'a plus aucun stage, ni enseignement optionnel à valider.



Université
de Toulouse

BIBLIOGRAPHIE

1. SINDING, Mikkel-Holger S. et al. Arctic-adapted dogs emerged at the Pleistocene–Holocene transition. *Science*. 26 juin 2020. Vol. 368, n° 6498, pp. 1495-1499. DOI 10.1126/science.aaz8599.
2. CHEVALLIER, Charlotte. *Le chien de trait, d’hier à aujourd’hui. Thèse de doctorat vétérinaire*. l’Université Paul-Sabatier de Toulouse, 2013.
3. EDDY, A. L., VAN HOOGMOED, L. M. et SNYDER, J. R. The role of thermography in the management of equine lameness. *Veterinary Journal (London, England: 1997)*. novembre 2001. Vol. 162, n° 3, pp. 172-181.
4. IGNA, Cornel et al. Thermal imaging of the dogs with cranial cruciate ligaments ruptures. *Lucrări științifice medicină veterinară*. 1 janvier 2017. Vol. VOL. L.
5. WADDELL, Robert E., et al. Medical infrared thermal imaging of cats with hyperthyroidism. *American Journal of Veterinary Research*. 23 décembre 2014. Vol. 76, n° 1, pp. 53-59.
6. MCCAFFERTY, Dominic J. Applications of thermal imaging in avian science. *Ibis*. 2013. Vol. 155, n° 1, pp. 4-15.
7. LOUGHIN, Catherine A. et MARINO, Dominic J. Evaluation of thermographic imaging of the limbs of healthy dogs. *American Journal of Veterinary Research*. octobre 2007. Vol. 68, n° 10, pp. 1064-1069.
8. John Wiley & Sons. Measurements in Infrared Thermography. *Infrared Thermography*., Ltd, 2009. pp. 15-40.
9. KWON, Claire J. et BRUNDAGE, Cord M. Quantifying body surface temperature differences in canine coat types using infrared thermography. *Journal of Thermal Biology*. mai 2019. Vol. 82, pp. 18-22.
10. RING, E. F. J. et AMMER, K. Infrared thermal imaging in medicine. *Physiological Measurement*. mars 2012. Vol. 33, n° 3, pp. R33-46.
11. HERVÉ, Philippe. *Mesure de L’emissivite Thermique*. Ed. Techniques Ingénieur, 2005. Google-Books-ID: FMwHGcT3wMcC
12. CILULKO, Justyna, et al. Infrared thermal imaging in studies of wild animals. *European Journal of Wildlife Research*. 1 février 2013. Vol. 59, n° 1, pp. 17-23.
13. LOTH, Gloria et RODRIGUEZ, Emily. Thermoregulation | physiology. *Encyclopedia Britannica* 2018.
14. KURZ, Andrea. Physiology of thermoregulation. *Best Practice & Research. Clinical Anaesthesiology*. décembre 2008. Vol. 22, n° 4, pp. 627-644.

15. KLEIN, Bradley G. *Cunningham's textbook of Veterinary Physiology*. 5th. elsevier, 2012.
16. FOURNIER, P.E, LEAL, S et ZILTENER, J.L. Anti-inflammatoires non stéroïdiens : utilisation en médecine du sport. *Revue Médicale Suisse* 2008.
17. DELVERDIER. La réaction inflammatoire - mécanismes et signification biologique. Unité d'anatomie pathologique de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse. Septembre 2016.
18. PRAKASH, Raghu. *Infrared Thermography*. BoD, 2012.
19. LOVE, Tom J. Thermography as an Indicator of Blood Perfusion. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 1980. Vol. 335, n° 1, pp. 429-437.
20. CAŁKOSIŃSKI, Ireneusz et al. The Use of Infrared Thermography as a Rapid, Quantitative, and Noninvasive Method for Evaluation of Inflammation Response in Different Anatomical Regions of Rats. *BioMed Research International* Vol. 2015.
21. REKANT, Steven I., et al. Veterinary applications of infrared thermography. *American Journal of Veterinary Research*. janvier 2016. Vol. 77, n° 1, pp. 98-107.
22. Imagerie thermique : l'avenir de la surveillance et de la guerre. 2 février 2018. Article provenant du site mku.com, visité le 05/04/2020.
23. ANONYME. *L'imagerie thermique : Une technologie prête à conquérir le reste du monde*. FLIR Commercial Vision Systems.
24. BIRD, H. A., RING, E. F. et BACON, P. A. A thermographic and clinical comparison of three intra-articular steroid preparations in rheumatoid arthritis. *Annals of the Rheumatic Diseases*. 1 février 1979. Vol. 38, n° 1, pp. 36-39.
25. ESSELINCKX, W., et al. A thermographic assessment of three intra-articular prednisolone analogues given in rheumatoid synovitis. *British Journal of Clinical Pharmacology*. mai 1978. Vol. 5, n° 5, pp. 447-451.
26. Romanò, C.L., et al. Healing of surgical site after total hip and knee replacements show similar telethermographic patterns. *J Orthopaed Traumatol* 12, 81–86 (2011)
27. RHO, Rhichard H. et al. Complex regional pain syndrome. *Mayo Clinic Proceedings*. février 2002. Vol. 77, n° 2, pp. 174-180.
28. AMMER, Kurt. Cold challenge to provoke a vasospastic reaction in fingers determined by temperature measurements: A systematic review 2009.
29. NGUYEN, An V. et al. Comparison of 3 Infrared Thermal Detection Systems and Self-Report for Mass Fever Screening. *Emerging Infectious Diseases*. novembre 2010. Vol. 16, n° 11, pp. 1710-1717. D
30. CHUI, W T. Infrared thermography to mass-screen suspected SARS patients with fever. *Asia Pac. J. Public Health*. 2005.

31. PIRTINI ÇETİNGÜL, M. et HERMAN, C. Quantification of the thermal signature of a melanoma lesion. *International Journal of Thermal Sciences*. 1 avril 2011. Vol. 50, n° 4, pp. 421-431.
32. SANTA CRUZ, G. A., et al. Dynamic infrared imaging of cutaneous melanoma and normal skin in patients treated with BNCT. *Applied Radiation and Isotopes*. 1 juillet 2009. Vol. 67, n° 7, Supplement, pp. S54-S58.
33. BENJUMEA ET AL. Characterization of thermographic images of skin cancer lesions using digital image processing. *Journal of Physics : Conference Series*. 2019. N° 1221 012076.
34. MAMBOU, Sebastien Jean, et al. Breast Cancer Detection Using Infrared Thermal Imaging and a Deep Learning Model. *Sensors (Basel, Switzerland)* 2018. Vol. 18, n° 9.
35. BOOGERD, LS. Laparoscopic detection and resection of occult liver tumors of multiple cancer types using real-time near-infrared fluorescence guidance. *Surgical Endoscopy*. 31 février 2017.
36. LEKAS, Raimundas, et al. Monitoring changes in heart tissue temperature and evaluation of graft function after coronary artery bypass grafting surgery. *Medicina (Kaunas, Lithuania)*. 2009. Vol. 45, n° 3, pp. 221-225.
37. RUDDOCK, Wayne. Infrared Imaging and Open Heart Surgery Advanced Infrared Resources. *Infrared Thermography* . 4 juillet 2020.
38. SOROKO, Maria et DAVIES MOREL, Mina. *Equine thermography in practice*. First. Cabi, 2014.
39. VAN HOOGMOED, L.M, SNYDER, J.R, ALLEN, A.K et WALDSMITH, J.D. Use of infrared thermography to detect performance-enhancing techniques in horses. *Equine Veterinary Education*. 2000. N° 12, pp. 102– 107.
40. TURNER, Tracy A. et SCOGGINS, R.D. Thermographic detection of gingering in horses. *Journal of Equine Veterinary Science*. 1985. N° 5, pp. 8-10.
41. PELOSO, J.G, MUNDY, G.D et COHEN, N.D. Prevalence of, and factors associated with, musculoskeletal racing injuries of Thoroughbreds. *Journal of the American Medical Association*. 1994. N° 204, pp. 620-626.
42. SOROKO, Maria, HENKLEWSKI, R et FILIPOWSKI, H. The effectiveness of thermographic analysis in equine orthopedics. *Journal of Equine Veterinary Science*. 2013. N° 33, pp. 760-762.
43. PUROHIT, R.C, PASCOE, D.D, DEFRANCO, B et SCHUMACHER, J. Thermographic evaluation of the neurovascular system of the equine. *Thermology International*. 2004. N° 14, pp. 89-92.
44. JOHNSON, S.R et ET AL. Thermographic eye temperature as an index to body temperature in ponies. *Journal of Equine Veterinary Science*. 2011. N° 31, pp. 63-66.

45. SCHAEFER, A. Early detection and prediction of infection using infrared thermography. *Journal of animal science*. 2004. N° 84, pp. 73-80.
46. RAINWATER-LOVETT, k et ET AL. Detection of foot-and-mouth disease virus infected cattle using infrared thermography. *Veterinary Journal*. 2009. N° 180, pp. 317-324.
47. SCHAEFER, A. The use of infrared thermography as an early indicator of bovine respiratory disease complex in calves. *Research in Veterinary Science*. 2007. N° 83, pp. 376-384.
48. SCHAEFER, A. The non-invasive and automated detection of bovine respiratory disease onset in receiver calves using infrared thermography. *Research in Veterinary Science*. 2012. N° 93, pp. 928-935.
49. POLAT, B., et al. Sensitivity and specificity of infrared thermography in detection of subclinical mastitis in dairy cows. *Journal of Dairy Science*. août 2010. Vol. 93, n° 8, pp. 3525-3532.
50. ZANINELLI, Mauro, et al. First Evaluation of Infrared Thermography as a Tool for the Monitoring of Udder Health Status in Farms of Dairy Cows. *Sensors (Basel, Switzerland)* [en ligne]. 14 mars 2018. Vol. 18, n° 3.
51. MARTINS, Rafael Felipe Saraiva, et al. Mastitis detection in sheep by infrared thermography. *Research in Veterinary Science*. juin 2013. Vol. 94, n° 3, pp. 722-724.
52. RADIGONDA, Vinicius Luiz, et al. Infrared thermography relationship between the temperature of the vulvar skin, ovarian activity, and pregnancy rates in Braford cows. *Tropical Animal Health and Production*. décembre 2017. Vol. 49, n° 8, pp. 1787-1791.
53. TALUKDER, S., et al. Evaluation of infrared thermography body temperature and collar-mounted accelerometer and acoustic technology for predicting time of ovulation of cows in a pasture-based system. *Theriogenology*. 1 mars 2015. Vol. 83, n° 4, pp. 739-748.
54. HARRIS-BRIDGE, G., et al. The use of infrared thermography for detecting digital dermatitis in dairy cattle: What is the best measure of temperature and foot location to use? *The Veterinary Journal*. 1 juillet 2018. Vol. 237, pp. 26-33.
55. PICHOVÁ, K., BILČÍK, B. et KOŠT'ÁL, L'. Assessment of the effect of housing on feather damage in laying hens using IR thermography. *animal*. avril 2017. Vol. 11, n° 4, pp. 661-669.
56. MOE, Randi Oppermann, et al. Hot chicks, cold feet. *Physiology & Behavior*. 1 octobre 2017. Vol. 179, pp. 42-48.
57. SOERENSEN, Dennis Dam et PEDERSEN, Lene Juul. Infrared skin temperature measurements for monitoring health in pigs: a review. *Acta Veterinaria Scandinavica* [en ligne]. 3 février 2015. Vol. 57, n° 1.
58. BRELAZ, Marie. *Intérêts et limites de la thermographie infrarouge en tant qu'outil diagnostic en aviculture. Thèse de doctorat vétérinaire*. l'Université Paul-Sabatier de Toulouse, 2011.

59. HART, Adam G., et al. Can Handheld Thermal Imaging Technology Improve Detection of Poachers in African Bushveldt? *PloS One*. 2015. Vol. 10, n° 6, pp. e0131584.
60. COLLIER, Bret A., et al. Detection Probability and Sources of Variation in White-Tailed Deer Spotlight Surveys. *Journal of Wildlife Management*. février 2007. Vol. 71, n° 1, pp. 277-281.
61. WARD, S. Infrared thermography: principles and applications. . 1998. pp. 9.
62. NAKAYAMA, Katsura, et al. Decrease in nasal temperature of rhesus monkeys (*Macaca mulatta*) in negative emotional state. *Physiology & Behavior*. 13 avril 2005. Vol. 84, n° 5, pp. 783-790.
63. HRISTOV, Nickolay I., BETKE, Margrit et KUNZ, Thomas H. Applications of thermal infrared imaging for research in aeroecology. *Integrative and Comparative Biology*. juillet 2008. Vol. 48, n° 1, pp. 50-59.
64. MCGOWAN, Lauren, et al. Medical Infrared Imaging of Normal and Dysplastic Elbows in Dogs. *Veterinary surgery: VS*. octobre 2015. Vol. 44, n° 7, pp. 874-882.
65. GROSSBARD, Brian P. et al. Medical infrared imaging (thermography) of type I thoracolumbar disk disease in chondrodystrophic dogs. *Veterinary surgery: VS*. octobre 2014. Vol. 43, n° 7, pp. 869-876.
66. LEE, Mathew H. M. et COHEN, Jeffrey M. *Rehabilitation Medicine and Thermography*. Impress Publications, 2008.
67. PAVELSKI, M., et al. Infrared Thermography in Dogs with Mammary Tumors and Healthy Dogs. *Journal of Veterinary Internal Medicine*. décembre 2015. Vol. 29, n° 6, pp. 1578-1583.
68. SUNG, J., et al. Medical infrared thermal imaging of canine appendicular bone neoplasia. *BMC Veterinary Research*. 3 décembre 2019. Vol. 15, n° 1, pp. 430.
69. UM, Se-Wook, KIM, Min-Su, LIM, Ji-Hey, KIM, Sun-Young, SEO, Kang-Moon et NAM, Tchi-Chou. Thermographic evaluation for the efficacy of acupuncture on induced chronic arthritis in the dog. *The Journal of Veterinary Medical Science*. décembre 2005. Vol. 67, n° 12, pp. 1283-1284.
70. AUGUSTIN, Goran, et al. Determination of spatial distribution of increase in bone temperature during drilling by infrared thermography: preliminary report. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*. mai 2009. Vol. 129, n° 5, pp. 703-709.
71. RIEMER, Stefanie, et al. Dynamic changes in ear temperature in relation to separation distress in dogs. *Physiology & Behavior*. 01 2016. Vol. 167, pp. 86-91.
72. TRAVAIN, Tiziano, et al. How good is this food? A study on dogs' emotional responses to a potentially pleasant event using infrared thermography. *Physiology & Behavior*. 15 mai 2016. Vol. 159, pp. 80-87.

73. VAINIONPÄÄ, Mari H., et al. A comparison of thermographic imaging, physical examination and modified questionnaire as an instrument to assess painful conditions in cats. *Journal of Feline Medicine and Surgery*. février 2013. Vol. 15, n° 2, pp. 124-131.
74. FUENTES, Virginia Luis. Arterial Thromboembolism: Risks, realities and a rational first-line approach. *Journal of Feline Medicine and Surgery*. 26 juin 2012.
75. POUZOT-NEVORET, Céline et al. Infrared thermography: a rapid and accurate technique to detect feline aortic thromboembolism. *Journal of Feline Medicine and Surgery*. 2018. Vol. 20, n° 8, pp. 780-785.
76. THE AMERICAN ACADEMY OF THERMOLOGY. Veterinary Guidelines for Infrared Thermography | American Academy of Thermology. www.aathermology.com [Consulté le 17 décembre 2019]
77. REBERT, Delphine. *Contribution à l'étude des affections spécifiques du chien de traineau en course : étude épidémiologique des affections lors de « La Grande Odyssée 2008 » et comparaison avec les données de l'Alpirod 1993/1994, Thèse de doctorat vétérinaire, ALFORT*. 2010.
78. SIGOGNEAU, Marie. *Etude observationnelle des facteurs de risques des troubles de performance des chiens de traîneaux lors de La Grande Odyssée 2019*. Thèse pour obtenir le grade de Docteur vétérinaire. Toulouse : Université Paul Sabatier, 2019.
79. VON PFEIL, Dirsko JF, et al. A survey on orthopedic injuries during a marathon sled dog race. *Veterinary Medicine : Research and Reports*. 20 octobre 2015. Vol. 6, pp. 329-339.
80. NOMURA, Roberto Harutomi Corrêa et al. Thermographic images from healthy knees between dogs with long and short hair. *Ciência Rural* [en ligne]. 2018. Vol. 48, n° 12.
81. *Fluke TIR - Brochure*. [Consulté le 3 avril 2020]. Disponible à l'adresse : www.docs.rs-online.com
82. PUROHIT, R. C. et MCCOY, M. D. Thermography in the diagnosis of inflammatory processes in the horse. *American Journal of Veterinary Research*. août 1980. Vol. 41, n° 8, pp. 1167-1174.
83. VARDASCA, Ricardo, RING, Francis, PLASSMANN, Peter et JONE, Carl. Thermal symmetry of the upper and lower extremities. 2012. pp. 9.
84. BLACK, Linda L., et al. Effect of adipose-derived mesenchymal stem and regenerative cells on lameness in dogs with chronic osteoarthritis of the coxofemoral joints: a randomized, double-blinded, multicenter, controlled trial. *Veterinary Therapeutics: Research in Applied Veterinary Medicine*. 2007. Vol. 8, n° 4, pp. 272-284.
85. REID, J, et al. Development of the short-form Glasgow Composite Measure Pain Scale (CMPS-SF) and derivation of an analgesic intervention score. . 2007. pp. 9.

ANNEXES

Annexe 1 : Feuille d'examen orthopédique utilisée pour les chiens appartenant à la 2^{ème} partie de l'étude

EXAMEN ORTHOPEDIQUE

Nom musher Nom animal	Date et heure	Examen à distance	Membre concerné	Anomalies	SD

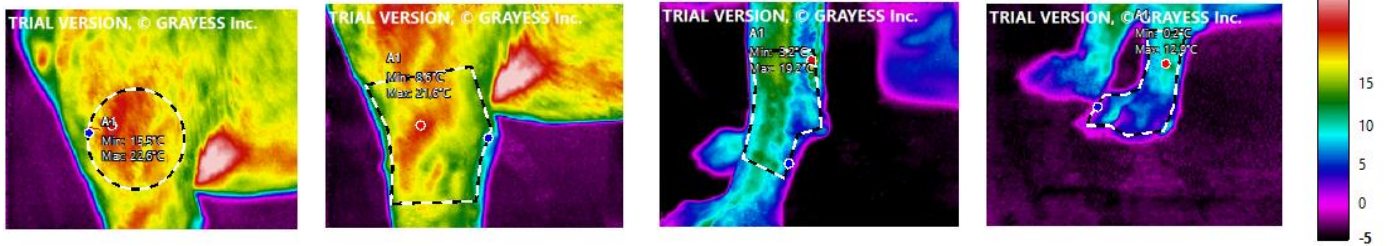
Annexe 2 : Fiche condition de course

CONDITIONS COURSE

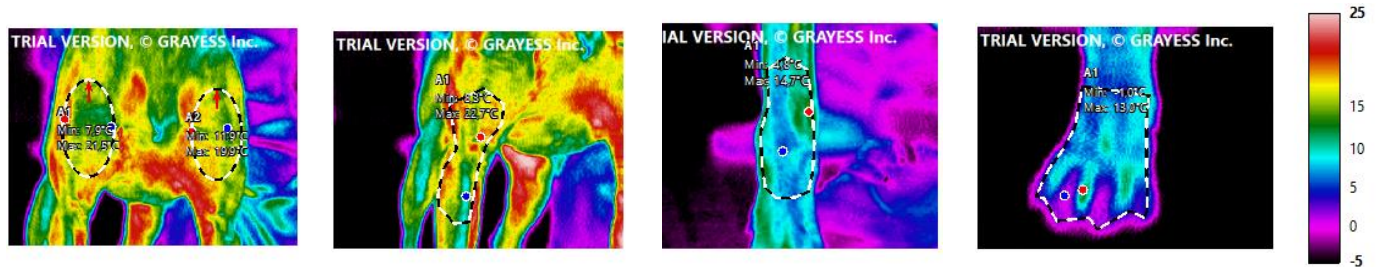
Jours	Précipitation	Vent	Qualité neige	T° moy
1	Pas de course			
2	☉	☉	Dure mais pas gelée	5°C
3	☉	☉	Dure mais pas gelée	3°C
4	☉	☉	Dure mais pas gelée	3°
5	☉	☉	Dure mais pas gelée	0°C
6	☉	☉	Dure mais pas gelée	0°C
7	30cm de neige	☉	Poudreuse	0°C
8	☉	☉	Damée fraîche	- 10°C
9	☉	☉	Damée fraîche	- 10°C
10	☉	30km/h	Fraîche, molle par endroit	-2°C
11	☉	50km/h	Molle damée	0°C
12	☉	☉	Molle damée	0°C

Annexe 3 : Thermogrammes présentant l'intégralité des articulations étudiées de face et de profil ainsi que leur délimitation, identiques pour tous les animaux thermographiés.

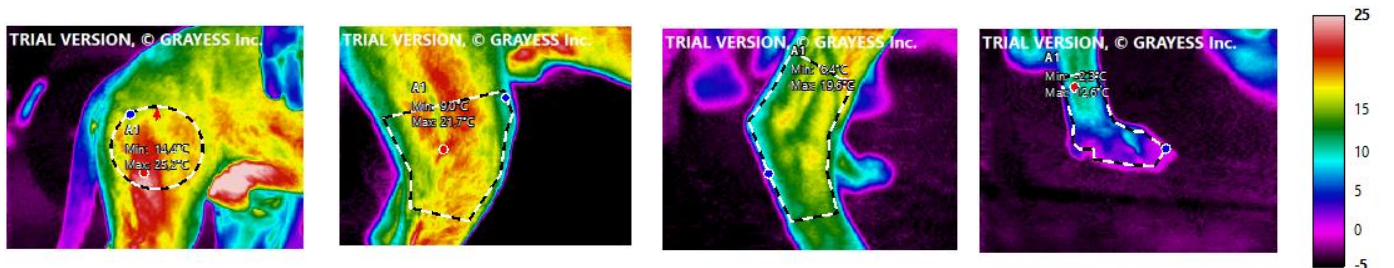
Membre thoracique gauche, vue de profil (Epaule, coude, carpe, main) :



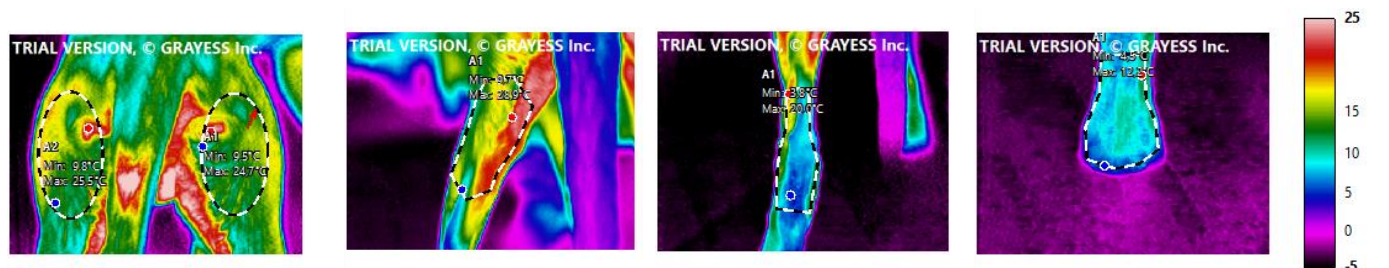
Membre thoracique gauche, vue de face (Epaule, coude, carpe, main) :



Membre pelvien droit, vue de profil (Hanche, grasset, tarse, pied) :



Membre pelvien gauche, vue de face (Hanche, grasset, tarse, pied) :



Annexe 4 : Grille d'évaluation de la douleur

SCORING DOULEUR (SD)

Boiterie : au pas/au trot			
0 : Absente	1 : Intermittente d'appui	2 : Permanente d'appui	3 : Permanente de soutien
Douleur à la manipulation			
0 : Absente	1 : Retrait léger	2 : Retrait franc	3 : Aggressivité
Amplitude du mouvement de l'articulation			
0 : Normal	1 : Douleur en amplitude maximale	2 : Douleur en amplitude moyenne	3 : Douleur à toute manipulation
Score finale de douleur			
0 : Pas de douleur	1-3 : Douleur légère	4-6 : Douleur moyenne	7-9 : Douleur sévère

Toulouse 2020

Nom : Fauquet

Prénom : Canelle

**ETUDE DE L'UTILISATION PRATIQUE DE L'IMAGERIE THERMIQUE DES ARTICULATIONS CHEZ LE CHIEN DE
TRAINEAUX EN CONDITION DE COURSE : DESCRIPTION CHEZ LE CHIEN SAIN ET APPLICATION A DES CAS
CLINIQUES LORS DE LA GRANDE ODYSSEE 2020**

RESUME : La prise en charge des atteintes orthopédiques est une problématique à part entière chez le chien de traîneau. Nous avons mené une étude descriptive sur l'utilisation de l'imagerie thermique dans le cadre de cette prise en charge. La première partie de notre étude comprend 24 chiens, considérés comme sains et participant à l'édition 2020 de La Grande Odyssée. Grâce à l'analyse statistique de facteurs susceptibles d'influencer la température de surface des articulations, nous avons pu montrer qu'il était possible d'utiliser l'articulation controlatérale comme témoin pour mettre en évidence une anomalie thermique sur l'articulation contrôlée, que les chiens présentant une fourrure épaisse (Husky) ont une température de surface plus faible que ceux ayant des poils courts (Eurohound) et, enfin, que le profil des articulations est toujours plus chaud que la face. La seconde partie, incluant 10 chiens, décrit l'utilisation de la thermographie chez des chiens suspectés de présenter une atteinte orthopédique.

MOTS CLES : Thermographie ; Chiens de traîneaux ; Atteintes orthopédiques.

**STUDY OF THERMAL IMAGING'S PRACTICAL USE OF JOINTS IN SLEDDING DOGS IN RACING CONDITIONS:
DESCRIPTION IN HEALTHY DOGS AND APPLICATION TO CLINICAL CASES DURING "LA GRANDE ODYSSEE
2020"**

SUMMARY :

The management of orthopedic damages is a real challenge in sled dog training. We conducted a descriptive study on the use of thermal imaging as part of the management of this orthopedic conditions. The first part of the study includes 24 dogs, deemed physically healthy and racing the 2020 edition of "La Grande Odyssée". Thanks to statistical analysis of the factors susceptible to influence the joint surface temperature, we have been able to show that it is possible to use the contralateral joint as control to detect a thermic abnormality on the controlled joint. But also, that the dogs with tick fur (Husky) have a lower joint surface temperature as shown by the thermal images than the dogs with short fur (Eurohound), and finally that the articulation's profile is always hotter than the face. The second part of the study includes 10 dogs and describes the use of the thermography on the dogs suspected to have an orthopedic lesion.

KEYWORDS : Thermography, Sled dog, Orthopedic disorders