



HAL
open science

Comparaison de différentes méthodes non invasives de mesure de température corporelle chez le cheval

Léna Legrand

► **To cite this version:**

Léna Legrand. Comparaison de différentes méthodes non invasives de mesure de température corporelle chez le cheval. Médecine vétérinaire et santé animale. 2023. dumas-04303589

HAL Id: dumas-04303589

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04303589v1>

Submitted on 23 Nov 2023

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

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

Copyright

Année 2023

**COMPARAISON DE DIFFÉRENTES MÉTHODES NON
INVASIVES DE MESURE DE LA TEMPÉRATURE
CORPORELLE CHEZ LE CHEVAL**

THÈSE

pour obtenir le diplôme d'État de

DOCTEUR VÉTÉRINAIRE

présentée et soutenue publiquement devant

la Faculté de Médecine de Créteil (UPEC)

le 25 octobre 2023

par

Léna, Françoise, Paulette LEGRAND

sous la direction de

Céline ROBERT

JURY

Président du jury :	M. Loïc DESQUILBET	Professeur à l'EnvA
Directrice de thèse :	Mme Céline ROBERT	Professeure à l'EnvA
Examineur :	M. Ludovic TANQUEREL	Maître de Conférences à l'EnvA

Liste des enseignants intervenant dans l'encadrement des thèses de Doctorat vétérinaire



Version juillet 2023

Liste des Professeurs et Maîtres de conférences titulaires de l'HDR

M	Adjou	Karim	Professeur	DPASP
M	Audigié	Fabrice	Professeur	DEPEC
M	Bellier	Sylvain	Professeur	DSBP
M	Blaga	Radu	Professeur	DSBP
M	Blot	Stéphane	Professeur	DEPEC
M	Boulouis	Henri-Jean	Professeur émérite	DSBP
Mme	Chahory	Sabine	Professeur	DEPEC
M	Chateau	Henry	Professeur	DSBP
Mme	Chetboul	Valerie	Professeur	DEPEC
Mme	Crevier-Denoix	Nathalie	Professeur	DSBP
M	Degueurce	Christophe	Professeur	DSBP
M	Denoix	Jean-Marie	Professeur	DEPEC
M	Desquilbet	Loïc	Professeur	DSBP
Mme	Dufour	Barbara	Professeur émérite	DPASP
M	Eloit	Marc	Professeur	DSBP
M	Fayolle	Pascal	Professeur émérite	DEPEC
M	Federighi	Michel	Professeur	DPASP
M	Fontbonne	Alain	Professeur	DEPEC
Mme	Gilbert	Caroline	Professeur	DSBP
M	Grandjean	Dominique	Professeur	DEPEC
Mme	Grimard-Ballif	Bénédicte	Professeur	DPASP
Mme	Haddad-Hoang Xuan	Nadia	Professeur	DPASP
M	Jouvion	Gregory	Professeur	DSBP
M	Kohlhauer	Matthias	Professeur	DSBP
Mme	Le Poder	Sophie	Professeur	DSBP
Mme	Le Roux	Delphine	Maître de conférences HDR	DSBP
M	Manassero	Mathieu	Professeur	DEPEC
Mme	Maurey-Guéneq	Christelle	Professeur	DEPEC
M	Millemann	Yves	Professeur	DPASP
Mme	Pilot-Storck	Fanny	Professeur	DSBP
M	Pontet	Andrew	Professeur	DPASP
Mme	Risco-Castillo	Véronica	Maître de conférences HDR	DSBP
Mme	Rivière	Julie	Maître de conférences HDR	DPASP
Mme	Robert	Céline	Professeur	DSBP
M	Tiret	Laurent	Professeur	DSBP
M	Tissier	Renaud	Professeur	DSBP
M	Verwaerde	Patrick	Professeur	DEPEC
Mme	Viateau	Véronique	Professeur	DEPEC

Liste des Maîtres de conférences et Ingénieurs de recherche DMV

M	Arné	Pascal	Maître de conférences	DPASP
Mme	Barassin	Isabelle	Maître de conférences	DPASP
Mme	Barbarino	Alix	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
Mme	Benckroun	Ghita	Maître de conférences	DEPEC
Mme	Bertoni	Lelia	Maître de conférences	DEPEC
M	Bolnot	Francois	Maître de conférences	DPASP
Mme	Canonne-Guibert	Morgane	Maître de conférences	DEPEC
Mme	Chevallier	Lucie	Maître de conférences	DSBP
Mme	Cochet-Faivre	Noëlle	Maître de conférences	DEPEC
Mme	Cordonnier-Lefort	Nathalie	Maître de conférences	DSBP
Mme	Coudry	Virginie	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
Mme	Crepeaux	Guillemette	Maître de conférences	DSBP
M	Crozet	Guillaume	Maître de conférences	DPASP
Mme	De Paula Reis	Alline	Maître de conférences	DPASP
M	Delsart	Maxime	Maître de conférences	DPASP
Mme	Denis	Marine	Ingénieur de recherche (DMV)	DPASP
M	Deshuillers	Pierre	Maître de conférences	DSBP
M	Gauthier	Michel	Maître de conférences associé	DPASP
Mme	Guérin	Virginie	Maître de conférences	DSBP
Mme	Guétin-Poirier	Valentine	Maître de conférences	DPASP
Mme	Jacquet	Sandrine	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
M	Kurtz	Maxime	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
Mme	Lagrée	Anne-Claire	Maître de conférences	DSBP
Mme	Le Dudal	Marine	Ingénieur de recherche (DMV)	DSBP
Mme	Legrand	Chantal	Maître de conférences associé	DSBP
M	Mammeri	Mohamed	Maître de conférences	DSBP
Mme	Manguin	Estelle	Maître de conférences	DEPEC
Mme	Marignac	Genevieve	Maître de conférences	DSBP
Mme	Marotto	Stéphanie	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
Mme	Maurice	Emeline	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
Mme	Mespoules-Rivière	Céline	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
Mme	Mtimet	Narjès	Maître de conférences	DPASP
M	Mortier	Jérémy	Maître de conférences associé	DEPEC
M	Nudelmann	Nicolas	Maître de conférences	DEPEC
M	Pignon	Charly	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
M	Polack	Bruno	Maître de conférences	DSBP
Mme	Quéré	Émilie	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
Mme	Ravary-Plumioën	Bérangère	Ingénieur de recherche (DMV)	DPASP
M	Reyes-Gomez	Edouard	Maître de conférences	DSBP
Mme	Rose	Hélène	Maître de conférences associé	DSBP
M	Tanquerel	Ludovic	Maître de conférences	DEPEC

Remerciements

Au Président du Jury de cette thèse, M. Loïc Desquilbet, Professeur à l'EnvA,

Pour me faire l'honneur d'avoir accepté la présidence du jury de cette thèse ainsi que pour votre précieuse aide lors de sa réalisation.
Veuillez trouver mes plus sincères remerciements.

À Mme Céline Robert, Maître de conférences à l'EnvA,

Pour avoir accepté d'encadrer cette thèse. Je vous remercie de votre patience, de votre disponibilité et de votre précieuse aide lors de son élaboration.
Veuillez recevoir mes plus respectueux hommages.

À M. Ludovic Tanquerel, Maître de conférences à l'EnvA,

Pour l'honneur fait d'avoir accepté de participer à ce jury.
Je vous présente mes sincères remerciements.

Table des matières

Liste des figures	5
Liste des tableaux.....	7
Liste des abréviations.....	9
Introduction.....	11
Première partie : bibliographie.....	13
1 La température corporelle chez le cheval	13
1.1 Définitions.....	13
1.1.1 Classifications	13
1.1.1.1 Homéothermes et poïkilothermes	13
1.1.1.2 Endothermes et Ectothermes.....	14
1.1.2 Sectorisation de la chaleur.....	14
1.2 Échanges de chaleur et maintien de la température corporelle	15
1.2.1 Thermogénèse.....	15
1.2.1.1 Production basale.....	15
1.2.1.2 Mécanismes d'augmentation de la thermogénèse.....	16
1.2.2 Thermolyse	16
1.2.2.1 Convection	16
1.2.2.2 Conduction	17
1.2.2.3 Radiation	17
1.2.2.4 Évaporation	17
1.2.2.5 Réponses comportementales.....	18
1.2.3 Transferts de chaleur dans le corps.....	18
1.3 Variations de la température corporelle.....	19
1.3.1 Origine	20
1.3.1.1 Variations physiologiques.....	20
1.3.1.2 Hyperthermie.....	20
1.3.1.3 Fièvre	22
1.3.2 Mécanismes mis en jeu lors de variation de la température.....	24
1.3.2.1 Acteurs et voies de transmission.....	24
1.3.2.2 Cas de la fièvre	25
2 Mesure de la température corporelle	27
2.1 Nécessité de la mesure	27
2.1.1 Réactions biologiques.....	27
2.1.2 Circonstances de la mesure	28
2.1.2.1 Contexte médical.....	28
2.1.2.2 Contexte réglementaire	29
2.2 Méthodes de mesure de la température corporelle chez l'Homme	30
2.2.1 Histoire de la mesure de la température corporelle.....	30
2.2.2 Outils et sites de mesure actuels chez l'Homme	32
2.3 État des connaissances chez l'animal, en particulier chez le cheval	36
2.3.1 La température rectale	36
2.3.2 La température axillaire	38
2.3.3 La température tympanique	38
2.3.4 La thermométrie infrarouge sans-contact portable	39
2.3.4.1 Les différents sites corporels étudiés	39
2.3.4.2 Température oculaire	40
2.3.5 La lecture par transpondeur à micropuce	41
2.4 Bilan des connaissances concernant les différentes méthodes de mesure de la température dans la littérature	43
Deuxième partie : Protocole de validation statistique de quatre méthodes de mesure non invasives alternatives à la mesure rectale.....	48
1 Objectifs de l'étude.....	48
2 Validation d'une méthode de mesure : définitions	49
2.1 Définition préliminaire : fidélité de mesure.....	49
2.2 Répétabilité et reproductibilité inter-opérateurs de la méthode de mesure	49
2.3 Concordance de la méthode de mesure	50
3 Matériels et méthodes	50
3.1 Choix des sujets	50
3.1.1 Critères d'inclusion.....	50

3.1.2	Critères de non-inclusion	50
3.1.3	Critère d'exclusion	51
3.1.4	Choix du nombre d'animaux à recruter.....	51
3.2	<i>Description des outils</i>	52
3.2.1	Thermomètre électronique.....	52
3.2.2	Thermomètres infrarouges sans-contact	52
3.2.2.1	ANKOVO®	52
3.2.2.2	iHealth®.....	53
3.3	<i>Protocole de mesure</i>	54
3.3.1	Sites de mesure	54
3.3.2	Protocole expérimental	56
3.4	<i>Recueil des données</i>	57
4	Méthodes statistiques d'analyse des différentes méthodes de mesure.....	57
4.1	<i>Validité des différentes méthodes de mesure</i>	58
4.1.1	Méthode numérique : le coefficient de concordance de Lin.....	58
4.1.1.1	Formule	58
4.1.1.2	Interprétation (Desquilbet, 2019).....	58
4.1.1.3	Précision et exactitude (Desquilbet, 2019).....	59
4.1.2	Méthode graphique : la méthode de Bland et Altman.....	59
4.1.2.1	Pourquoi l'utiliser ? (Desquilbet, 2019).....	59
4.1.2.2	Présentation de la méthode	60
4.2	<i>Analyse de l'association de différents paramètres avec les températures mesurées : test de Student pour séries non appariées (Desquilbet, 2023a)</i>	62
4.3	<i>Détection des hyperthermes : sensibilité, spécificité et valeurs prédictives des différentes méthodes</i>	63
	Troisième partie : Présentation des résultats	65
1	Chevaux inclus et contextes de mesure dans l'étude	65
2	Appréciation qualitative de la facilité de mise en pratique des quatre méthodes.....	69
2.1	<i>Durée d'acquisition de la mesure</i>	69
2.1.1	Acquisition avec les TISCP.....	69
2.1.2	Acquisition avec le thermomètre électronique digital.....	69
2.1.2.1	Température rectale	69
2.1.2.2	Température axillaire.....	70
2.2	<i>Note de tolérance des différentes méthodes de mesure</i>	70
3	Analyse des données de température rectale obtenues avec un thermomètre digital électronique	71
3.1	<i>Vérification de la répétabilité des mesures réalisées deux fois par le même opérateur dans un espace de temps considéré comme négligeable</i>	71
3.2	<i>Vérification de la reproductibilité inter-opérateur à partir de deux séries de mesures réalisées par deux opérateurs différents dans un espace de temps considéré comme négligeable</i>	73
3.3	<i>Bilan pour la méthode rectale</i>	74
3.4	<i>Association entre différents paramètres et les données collectées</i>	75
4	Évaluation de la validité de la prise de température axillaire évaluée avec un thermomètre électronique digital.....	75
4.1	<i>Répétabilité et reproductibilité inter-opérateurs de la méthode axillaire</i>	75
4.2	<i>Concordance de la méthode axillaire avec la méthode rectale</i>	76
4.3	<i>Association entre différents paramètres et les données collectées</i>	77
4.3.1	Détection des hyperthermes	77
5	Évaluation de la prise de température du bout du nez mesurée avec un thermomètre infrarouge sans contact.....	78
5.1	<i>Étude des résultats obtenus avec le TISCP ANKOVO®</i>	78
5.1.1	Répétabilité et reproductibilité inter-opérateurs	78
5.1.2	Concordance avec la méthode rectale	79
5.1.3	Association entre différents paramètres et les données collectées	80
5.1.4	Détection des hyperthermes	80
5.2	<i>Comparaison des séries de mesure obtenues avec les deux TISCP lors de l'évaluation de la température du bout du nez</i>	81
6	Évaluation de la prise de température du canthus médial de l'œil mesurée avec un thermomètre infrarouge sans contact	81
6.1	<i>Étude des résultats obtenus avec le TISCP ANKOVO®</i>	81
6.1.1	Répétabilité et reproductibilité inter-opérateurs	81
6.1.2	Concordance avec la méthode rectale	82

6.1.3	Association entre différents paramètres et les données collectées	83
6.1.4	Détection des hyperthermes	83
6.2	<i>Comparaison des séries de mesure obtenues avec les deux TISCP lors de l'évaluation de la température du canthus médial de l'œil.....</i>	84
7	Évaluation de la prise de température du cornéenne mesurée avec un thermomètre infrarouge sans contact.....	85
7.1	<i>Étude des résultats obtenus avec le TISCP ANKOVO®.....</i>	85
7.1.1	Répétabilité et reproductibilité inter-opérateurs	85
7.1.2	Concordance avec la méthode rectale	85
7.1.3	Association entre différents paramètres et les données collectées	86
7.1.4	Détection des hyperthermes	87
7.2	<i>Comparaison des séries de mesure obtenues avec les deux TISCP lors de l'évaluation de la température cornéenne</i>	87
8	Bilan sur la validation des différentes méthodes	89
Quatrième partie : Discussion des résultats		90
1	Discussion des résultats	90
1.1	<i>Facilité de mise en œuvre des méthodes testées</i>	90
1.2	<i>Répétabilité et reproductibilité des différentes méthodes de mesure</i>	91
1.3	<i>Concordance des méthodes testées avec la température rectale</i>	93
1.4	<i>Sensibilité, spécificité, valeurs prédictives positive et négative</i>	93
1.5	<i>Association entre les différents paramètres testés et les températures mesurées</i>	96
1.6	<i>Comparaison des deux thermomètres infrarouges sans contact portables</i>	96
2	Limites de l'étude	97
2.1	<i>Échantillon : représentativité et taille</i>	97
2.2	<i>Choix des opérateurs et des outils de mesure</i>	98
2.3	<i>Évaluation des paramètres extérieurs et réalisation des tests de Student.....</i>	99
3	Perspectives.....	100
Conclusion.....		103
Liste des références bibliographiques.....		105
Annexes.....		113

Liste des figures

Figure 1 : Distribution de la température corporelle chez un poney dans un environnement chaud (d'après Klein, 2012)	18
Figure 2 : Distribution de la température corporelle chez un poney dans un environnement froid (d'après Klein, 2012)	19
Figure 3 : Synthèse des prostanoïdes (Aster <i>et al.</i> , 2020)	26
Figure 4 : Pathogénie de la fièvre (d'après White, 2014)	27
Figure 5 : Thermomètre à mercure et son étui (d'après Franz van Duns, 2020)	31
Figure 6 : Diagramme de répartition des différentes méthodes de prise de température chez le cheval vues ou réalisées par les étudiants vétérinaires.....	37
Figure 7 : Positionnement du thermomètre infrarouge sans-contact pour la mesure au bout du nez avec le thermomètre ANKOVO®.....	54
Figure 8 : Positionnement du thermomètre infrarouge sans-contact pour la mesure au canthus médial de l'œil avec le thermomètre ANKOVO®	54
Figure 9 : Positionnement du thermomètre infrarouge sans-contact pour la mesure au niveau de la cornée avec le thermomètre ANKOVO®.....	55
Figure 10 : Positionnement du thermomètre électronique pour la mesure axillaire	55
Figure 11 : Positionnement du thermomètre électronique pour la mesure rectale.....	55
Figure 12 : Illustration de l'influence majoritaire de la "reliability" sur le CCC de Lin (Desquilbet, 2019)	60
Figure 13 : Notes de tolérance obtenues pour les 39 chevaux évalués lors du Temps n°1, pour les cinq méthodes de mesure de températures appliquées, selon le barème établi dans le Tableau 6	71
Figure 14 : Étude numérique de la répétabilité de la méthode TR grâce au coefficient de concordance de Lin et graphique associé.....	72
Figure 15 : Graphique de Bland et Altman pour l'évaluation de la répétabilité de TR.....	72
Figure 16 : Étude numérique de la reproductibilité de la méthode TR grâce au coefficient de concordance de Lin et graphique associé.....	73
Figure 17 : Graphique de Bland et Altman pour l'évaluation de la reproductibilité de TR.....	74
Figure 18 : Formule de calcul des valeurs prédictives positive et négative dans un contexte de médecine individuelle (Desquilbet, 2023b).....	94
Figure 19 : Formules de calcul des rapports de vraisemblance (Desquilbet, 2023b).....	94
Figure 20 : Individus à inclure pour rejet H0 si H0 est fausse lors de l'évaluation de l'association entre la température extérieure et la température du canthus médial (d'après le site internet BiostaTGV)	100

Liste des tableaux

Tableau 1 : Production calorique des principaux types d'aliments (en kcal/g) (d'après Klein, 2012)	15
Tableau 2 : Principales causes de fièvre chez le cheval (White, 2014)	23
Tableau 3 : Résumé des conclusions extraites de la littérature concernant les différentes méthodes non invasives alternatives à la température rectale testées chez différentes espèces (liste non exhaustive)	43
Tableau 4 : Interprétation de la valeur du coefficient de concordance de Lin, tableaux issus du fichier Excel® "Concordance quantitative (Bland et Altman et CC Lin) v3.30" fourni avec le document de L. Desquilbet (2019)	51
Tableau 5 : Calcul de la taille de l'échantillon à inclure d'après le fichier Excel® "Concordance quantitative (Bland et Altman et CC Lin) v3.30" (Desquilbet, 2019)	52
Tableau 6 : Barème de notation de la coopérativité du cheval face à une méthode de mesure.....	57
Tableau 7 : Formule de calcul du coefficient de concordance de Lin (d'après Lin, 1989).....	58
Tableau 8 : Formules de calcul de la part du manque de précision et du manque d'exactitude dans la valeur du CCC de Lin (Desquilbet, 2019)	59
Tableau 9 : Valeurs de X et Y fixées à priori pour notre étude.....	62
Tableau 10 : Résultats obtenus pour une méthode donnée permettant le calcul de différents indicateurs d'intérêt	63
Tableau 11 : Signalement et motif de présence des 52 chevaux inclus dans l'étude	66
Tableau 12 : Informations contextuelles relevées pour chaque cheval au moment des mesures .	67
Tableau 13 : Informations spatio-temporelles relevées pour chaque cheval au moment des mesures	69
Tableau 14 : Durée d'acquisition de la température axillaire relevée sur 10 chevaux lors du Temps n°1	70
Tableau 15 : Détermination de différents indicateurs concernant la durée d'acquisition de la température axillaire dans l'échantillon	70
Tableau 16 : Bilan des valeurs de CCC de Lin obtenues et de la vérification des critères pour la méthode rectale.....	74
Tableau 17 : Évaluation de l'association entre la localisation du box et la valeur de TR et entre la température extérieure et la valeur de TR.....	75
Tableau 18 : Résultats obtenus pour l'évaluation de la répétabilité et de la reproductibilité de la méthode axillaire (Desquilbet, 2019)	76
Tableau 19 : Résultats obtenus pour l'évaluation de la concordance entre la méthode axillaire corrigée (TA _{corrigée}) et la méthode rectale (TR) (Desquilbet, 2019)	77
Tableau 20 : Évaluation de l'association entre la localisation du box et la valeur de TA et entre la température extérieure et la valeur de TA	77
Tableau 21 : Détection des hyperthermes par la méthode axillaire avec thermomètre électronique	78
Tableau 22 : Indicateurs calculés pour la méthode axillaire pour le dépistage de l'hyperthermie... 78	78
Tableau 23 : Résultats obtenus pour l'évaluation de la répétabilité et de la reproductibilité de la méthode du bout du nez avec le TISCP ANKOVO® (Desquilbet, 2019)	79
Tableau 24 : "Biais" et intervalle de confiance à 95% entre les séries TN1 brute et TR.....	79
Tableau 25 : Résultats obtenus pour l'évaluation de la concordance entre la méthode du bout du nez corrigée (TN1 _{corrigée}) et la méthode rectale (TR) (Desquilbet, 2019)	80
Tableau 26 : Évaluation de l'association entre la localisation du box et la valeur de TN1 et entre la température extérieure et la valeur de TN1	80
Tableau 27 : Résultats obtenus pour l'évaluation de la concordance entre les séries de mesures obtenues avec les deux TISCP pour la méthode du bout du nez (Desquilbet, 2019)	81
Tableau 28 : Résultats obtenus pour l'évaluation de la répétabilité de la méthode du canthus médial avec le TISCP ANKOVO® (Desquilbet, 2019)	82
Tableau 29 : "Biais" et intervalle de confiance à 95% entre les séries TCa1 brute et TR.....	82

Tableau 30 : Résultats obtenus pour l'évaluation de la concordance entre la méthode du canthus médial corrigée (TCa1 _{corrigée}) et la méthode rectale (TR) (Desquilbet, 2019)	83
Tableau 31 : Évaluation de l'association entre la localisation du box et la valeur de TCa1 et entre la température extérieure et la valeur de TCa1	83
Tableau 32 : Détection des hyperthermes par la méthode du canthus médial avec le TISCP ANKOVO®	84
Tableau 33 : Indicateurs calculés pour la méthode du canthus médial pour le dépistage de l'hyperthermie	84
Tableau 34 : Résultats obtenus pour l'évaluation de la concordance entre les séries de mesures obtenues avec les deux TISCP pour la méthode du canthus médial (Desquilbet, 2019).....	84
Tableau 35 : Résultats obtenus pour l'évaluation de la répétabilité et de la reproductibilité de la méthode cornéenne avec le TISCP ANKOVO® (Desquilbet, 2019)	85
Tableau 36 : "Biais" et intervalle de confiance à 95% entre les séries TCo1 brute et TR.....	86
Tableau 37 : Résultats obtenus pour l'évaluation de la concordance entre la méthode du cornéenne corrigée (TCo1 _{corrigée}) et la méthode rectale (Desquilbet, 2019)	86
Tableau 38 : Évaluation de l'association entre la localisation du box et la valeur de TCo1 et entre la température extérieure et la valeur de TCo1	86
Tableau 39 : Détection des hyperthermes par la méthode cornéenne avec le TISCP ANKOVO®	87
Tableau 40 : Indicateurs calculés pour la méthode cornéenne pour le dépistage de l'hyperthermie	87
Tableau 41 : Résultats obtenus pour l'évaluation de la concordance entre les séries de mesures obtenues avec les deux TISCP pour la méthode cornéenne (Desquilbet, 2019).....	88
Tableau 42 : Bilan des résultats de répétabilité, reproductibilité inter-opérateurs et concordance avec la température rectale pour les différentes méthodes testées.....	89
Tableau 43 : Calcul des rapports de vraisemblance pour les méthodes axillaire, du canthus médial et cornéenne.....	95
Tableau 44 : Apport d'information de la part d'un test diagnostique lorsque son résultat est positif selon la valeur du rapport de vraisemblance positif (RV+) (d'après Hayden et Brown, 1999)	95
Tableau 45 : Apport d'information de la part d'un test diagnostique lorsque son résultat est négatif selon la valeur de l'inverse du rapport de vraisemblance négatif (1/RV-) (d'après Hayden et Brown, 1999)	95

Liste des abréviations

CCC de Lin : Coefficient de Concordance de Lin
ENVA : École Nationale Vétérinaire d'Alfort
FEI : Fédération Équestre Internationale
FFE : Fédération Française d'Équitation
HM : Hyperthermie Maligne
IL-1 : Interleukine-1
IL-6 : Interleukine-6
LPS : Lipopolysaccharide
OVLT : Organe vasculaire de la lame terminale
PGE2 : Prostaglandine E2
RV : Rapport de Vraisemblance
SHF : Société Hippique Française
SNA : Système Nerveux Autonome
ST : Scanner Thermique
TCa : Température du Canthus médial
TCo : Température Cornéenne
TIR : Thermomètre InfraRouge
TIRT : Thermomètre InfraRouge Tympanique
TISCP : Thermomètre InfraRouge Sans-Contact Portable
TNF : *Tumor Necrosis Factor* ou Facteur de Nécrose Tumorale
TN : Température du bout du Nez
TR : Température Rectale
VPP : Valeur Prédicative Positive
VPN : Valeur Prédicative Négative

Introduction

La mesure de la température corporelle est un élément clé de l'examen clinique de l'animal (Easterwood et Cohen, 2023). En effet, la température est un paramètre essentiel à l'homéostasie du vivant et est soumise à une régulation fine, impliquant de nombreux mécanismes biologiques, assurant son maintien dans un intervalle étroit de valeurs (Klein, 2012; Sherwood *et al.*, 2016; White, 2014). Des variations de la température peuvent survenir, à l'occasion de contextes physiologiques mais aussi lors de manifestations pathologiques (Desjardins et Cadore, 2004; Guthrie et Lund, 1998; White, 2014). L'hyperthermie peut être le signe précoce d'une affection sous-jacente, voire le seul signe clinique décelable, et peut aussi être à l'origine de lésions irréversibles en cas de prise en charge tardive (Desjardins et Cadore, 2004).

De cette façon, il convient d'évaluer la température corporelle afin de prévenir les conséquences de ses variations extrêmes. Chez le Cheval, deux contextes majeurs sont sujets à son évaluation : le contexte prophylactique avec des contrôles lors des compétitions internationales par exemple, et lors de la prise en charge d'un animal malade. La mesure doit alors être réalisable aussi bien par un opérateur aguerri (vétérinaire praticien, étudiant vétérinaire, *etc.*) que par un utilisateur amateur, tel qu'un propriétaire de cheval. Cela implique un outil de mesure fiable, rapide, hygiénique mais surtout sécuritaire pour l'utilisateur et l'animal (Robinson *et al.*, 2008). Les outils de mesure invasifs nécessitant des manœuvres chirurgicales ne feront pas l'objet de cette thèse.

À ce jour, la méthode de référence utilisée pour la mesure de la température corporelle chez le cheval est la température rectale (Goodwin, 1998). Historiquement, elle était réalisée avec un thermomètre à mercure en verre, mais les risques associés à l'utilisation du mercure ont mené à l'arrêt de sa commercialisation (Langford et Ferner, 1999; Secrétariat d'Etat à la santé et à la protection sociale *et al.*, 1998). Depuis, le thermomètre électronique digital est devenu l'outil de choix pour la réalisation de la mesure. Néanmoins, bien que considérée comme étant le « gold standard », la température rectale affiche de nombreuses limites. En particulier, la sécurité du manipulateur ne peut être optimale dès lors qu'il se place à proximité des membres postérieurs du cheval. Le cheval non-initié peut être surpris par l'instrument et peut heurter le manipulateur. Aussi, dans un contexte de contrôle vétérinaire en compétition, l'environnement et l'excitation peuvent augmenter la réactivité de l'animal et rapidement conduire à un accident (Robinson *et al.*, 2008). Enfin, il peut être le vecteur de maladies nosocomiales lors de non-désinfection de l'outil. Ainsi, il serait judicieux de développer des méthodes de mesure permettant de s'affranchir de ces limites, pour une utilisation quotidienne facilitée.

En médecine humaine, de nombreuses méthodes alternatives ont été étudiées afin de remplacer la thermométrie rectale, considérée comme embarrassante chez l'Homme. Parmi celles-ci, la température axillaire par thermomètre électronique digital a fait l'objet de nombreuses études, constituant une méthode pratique de mesure (Falzon *et al.*, 2007; Moran et Mendal, 2002; Pecoraro *et al.*, 2021). La thermométrie sans contact infrarouge a aussi été largement étudiée, notamment depuis la pandémie de COVID-19. En particulier, le thermomètre infrarouge auriculaire fournit une alternative hygiénique et facile d'utilisation (Amoateng-Adjepong *et al.*, 1999; Van Staaij *et al.*, 2003). L'utilisation du thermomètre infrarouge sans-contact portable en région frontale ou temporale est,

elle aussi largement discutée dans la littérature (Canadian Agency for Drugs and Technologies in Health, 2014).

Chez les petits animaux de compagnie, des alternatives aussi ont été considérées, principalement afin de réduire le stress induit par la mesure rectale (Gomart *et al.*, 2014). Quelques études évaluent la fiabilité de la température axillaire ainsi que l'influence de différents paramètres sur la valeur mesurée, chez le chien, et le chat. (Gomart *et al.*, 2014; Mathis et Campbell, 2015). La température tympanique a aussi été considérée et a conduit au développement d'outils spécifiques aux petits carnivores, avec des formes adaptées à leurs conduits auditifs (Cichocki *et al.*, 2017; Greer *et al.*, 2007). L'utilisation de thermomètre infrarouge sans-contact portable a été évaluée sur quelques zones corporelles chez les petits animaux (Cugmas *et al.*, 2020; Giannetto *et al.*, 2022a). Enfin, certains auteurs mettent en évidence une relation entre température rectale de référence et température oculaire (Giannetto *et al.*, 2021; Yanmaz *et al.*, 2015), pouvant fournir un site de mesure intéressant par thermométrie infrarouge sans contact. Chez les grands animaux, la littérature est plus pauvre. En particulier, les études concernant l'utilisation de thermomètres infrarouge sans contact et la thermométrie axillaire sont rares.

Ainsi, les connaissances sont encore maigres quant aux alternatives à la mesure rectale en pratique équine, offrant de nombreuses perspectives d'études afin de simplifier l'évaluation de la température corporelle chez le cheval. Dans un premier temps, nous détaillerons la physiologie de la température, ses variations et les mécanismes impliqués. Nous ferons ensuite l'état des lieux de la bibliographie concernant sa mesure, les différentes méthodes étudiées et leurs limites, chez l'Homme et chez différentes espèces animales. Dans un second temps, nous étudierons la validité de quatre méthodes de mesure de la température que sont la température axillaire au thermomètre électronique et les températures au bout du nez, au canthus médial de l'œil et de la cornée, toutes trois évaluées au thermomètre infrarouge sans contact portable. Notre étude reposera principalement sur l'évaluation de la répétabilité, de la reproductibilité inter-opérateurs et de la concordance avec la température rectale des différentes méthodes. Nous évaluerons aussi différentes caractéristiques de ces méthodes. L'objectif est alors de déterminer si l'une des méthodes testées pourrait fournir une alternative envisageable à la température rectale pour l'évaluation de la température corporelle chez le cheval.

Première partie : bibliographie

Afin de situer les objectifs de cette thèse et les motivations à son initiative, il faut comprendre les enjeux du maintien de la température corporelle et de sa mesure, chez les Mammifères et particulièrement chez le cheval. Dans cette première partie bibliographique, nous définirons dans un premier temps la notion de température corporelle ainsi que les contextes et mécanismes à l'origine de ses variations. Par la suite, nous détaillerons la nécessité de sa mesure, les outils disponibles à ce jour, mais surtout les limites portées par les méthodes de mesure actuelles associées au manque de données quant à d'autres alternatives chez le cheval.

1 La température corporelle chez le cheval

Claude Bernard fût l'un des premiers scientifiques à formuler l'importance physiologique de l'homéostasie et à la définir. Dans son Introduction à l'étude de la médecine expérimentale publiée en 1865, il écrit que « tous les mécanismes vitaux, quelque variés qu'ils soient, n'ont toujours qu'un but, celui de maintenir l'unité des conditions de la vie dans le milieu intérieur ». Walter Bradford Cannon précise ce concept en 1926 et y associe le nom d'homéostasie. Aujourd'hui, l'homéostasie est définie par le dictionnaire médical de l'Académie de médecine comme « un processus physiologique permettant le maintien constant du milieu intérieur de l'organisme afin d'en assurer le bon fonctionnement » (Académie Nationale de Médecine, 2023).

Chez les espèces animales, y compris les chevaux, la température corporelle est l'un des paramètres fondamentaux de l'homéostasie. Le maintien de la température corporelle à une valeur appropriée est crucial pour assurer le fonctionnement optimal des processus métaboliques, enzymatiques et cellulaires.

1.1 Définitions

1.1.1 *Classifications*

Les espèces animales peuvent être classées en différentes catégories, en fonction des mécanismes de régulation de la température qu'elles utilisent. Deux grandes classifications peuvent aujourd'hui être citées, bien qu'il existe des variations et des nuances parmi celles-ci (Klein, 2012).

1.1.1.1 *Homéothermes et poïkilothermes*

Cette classification repose sur la stabilité de la température corporelle de l'animal. Elle distingue les animaux dits « à sang chaud », ou homéothermes, des animaux dits « à sang froid », ou poïkilothermes.

Les homéothermes ont la capacité de maintenir une température centrale stable, outre les conditions de température extérieure (Klein, 2012). Cette stratégie leur permet une grande indépendance vis-à-vis du milieu extérieur, mais aussi une consommation énergétique accrue, nécessitant un apport alimentaire constant. Cette définition peut être nuancée par le fait que les

Mammifères peuvent présenter des variations temporaires de la température, en pouvant dépasser 40°C lors d'importantes productions de chaleur ou descendre sous 36°C lors de froids extrêmes. Peuvent être classés parmi les homéothermes les Oiseaux et les Mammifères, et par conséquent les chevaux, dont cette thèse fait l'objet. Leur température centrale physiologique s'étend de 37,2°C à 38,1°C pour le mâle et de 37,3°C à 38,2°C pour la jument, avec respectivement 37,6°C et 37,8°C de température centrale moyenne (Crépeaux, 2022). Les poulains de quelques jours ont une température centrale plus élevée mais ne seront pas étudiés dans cette thèse.

Les poïkilothermes adoptent une stratégie thermique différente, en présentant de larges variations de température en fonction de l'environnement dans lequel ils évoluent (Klein, 2012). Leur température n'en est pas moins hautement régulée, principalement par l'emploi de stratégies comportementales. Cette catégorie concerne la plupart des reptiles et des poissons. Les poïkilothermes ne seront pas abordés dans cette thèse.

1.1.1.2 *Endothermes et Ectothermes*

Cette autre classification permet de s'affranchir des limites rencontrées dans la précédente classification. Elle s'appuie sur la source primaire de chaleur.

De cette façon, la thermogénèse intrinsèque des endothermes permet de maintenir une balance thermique adéquate et ainsi de limiter les variations de la température corporelle, les rendant alors uniquement dépendants de sources internes. À l'inverse, pour les ectothermes, leur propre production de chaleur n'est pas toujours suffisante pour maintenir une balance thermique optimale, les conduisant à utiliser des sources externes de chaleur (Crépeaux, 2022; Sherwood *et al.*, 2016). Les chevaux sont classés, avec le reste des Mammifères, parmi les endothermes.

1.1.2 **Sectorisation de la chaleur**

Afin de comprendre les conditions de notre étude, il faut savoir que la température corporelle peut être divisée en deux secteurs, selon les tissus intéressés. Ainsi, il faut distinguer deux types de température :

- La température du noyau central ou température centrale, qui est abordée dans cette thèse. Elle concerne la température du système nerveux central, des organes thoraciques abdominaux et des muscles squelettiques. Celle-ci est finement régulée et est soumise à très peu de variations (+/- 0,6°C) (Desjardins et Cadore, 2004; Sherwood *et al.*, 2016).
- La température de l'enveloppe constitue la température de l'ensemble de la peau et du tissu adipeux. Elle est soumise à de grandes variations en fonction des températures extérieures et est souvent inférieure à la température centrale chez les endothermes. L'enveloppe a un rôle prépondérant dans la régulation de la température centrale (Sherwood *et al.*, 2016; White, 2014). Ce n'est pas la température que nous chercherons à objectiver dans cette thèse

Dans la suite de cette thèse, nous nous intéresserons en particulier aux mécanismes développés et employés par les endothermes.

1.2 Échanges de chaleur et maintien de la température corporelle

Ainsi, nous avons vu que les Mammifères, dont les chevaux, maintiennent une température centrale stable et hautement régulée, mettant en jeu de nombreux mécanismes intrinsèques, leur permettant ainsi une adaptation optimale au milieu dans lequel ils évoluent. Ces mécanismes reposent sur des échanges de chaleur avec l'environnement ; ces entrées et sorties d'énergie thermique assurent une fine régulation de la balance thermique interne.

1.2.1 Thermogénèse

Dans le dictionnaire médical de l'Académie de médecine, la thermogénèse est définie comme la « production de chaleur de l'organisme par augmentation du métabolisme cellulaire » (Académie Nationale de Médecine, 2023). C'est le processus qui permet le maintien de la température corporelle au-dessus d'une valeur seuil, une température trop basse pouvant conduire à des effets délétères pour l'organisme. La chaleur peut ainsi être produite par différentes modalités.

1.2.1.1 Production basale

Au repos, la genèse thermique est principalement issue de l'activité des organes profonds (foie, cœur et cerveau en particulier) et des muscles squelettiques. La digestion des aliments permet elle aussi, une importante production de chaleur (Desjardins et Cadore, 2004).

On considère la thermogénèse obligatoire comme étant la production de chaleur basale, observée dans des conditions de stress thermique minimales avec un animal à jeun. Elle correspond au métabolisme de base, minimum nécessaire au fonctionnement cellulaire (Guthrie et Lund, 1998).

Selon l'alimentation et l'activité de l'animal, la proportion des différentes sources d'énergie impliquées varie. Ainsi, on peut observer que :

- Lors d'un exercice physique, c'est principalement l'augmentation du métabolisme cellulaire musculaire qui permet une augmentation de la chaleur produite.
- Concernant les aliments, la quantité de chaleur par consommation alimentaire est plus élevée pour une alimentation riche en matières grasses que pour une alimentation riche en protéines (Klein, 2012) (Tableau 1).

Tableau 1 : Production calorifique des principaux types d'aliments (en kcal/g) (d'après Klein, 2012)

Type d'aliment	Chaleur produite (kcal/g)		
	Par gramme d'aliment	Par litre d'O ₂ consommé	Par litre d'O ₂ produit
Carbohydrates	4,1	5,05	5,05
Graisse	9,6	4,75	6,67
Protéines (en urée)	4,2	4,46	5,57

Chez les endothermes, l'indépendance vis-à-vis de leur environnement est associée à une enveloppe isolante, composée de la peau, du tissu sous-cutané et du tissu adipeux, limitant les déperditions de chaleur, mais aussi les entrées de chaleur provenant de l'environnement (Crépeaux, 2022; Desjardins et Cadore, 2004).

1.2.1.2 Mécanismes d'augmentation de la thermogénèse

Dans certaines circonstances, en particulier en cas d'exposition au froid, le métabolisme doit être augmenté afin de produire davantage de chaleur, toujours dans un objectif de régulation fine de l'homéostasie. Ainsi, différents mécanismes peuvent être mis à profit afin d'augmenter la production d'énergie thermique et d'en limiter la déperdition.

- Thermogénèse avec frissons

Lors d'exposition temporaire au froid, une augmentation de la thermogénèse se met en place par contraction de groupes de muscles antagonistes, ne permettant pas la production de travail utile mais une production de chaleur (Klein, 2012). Ainsi, toute l'énergie produite est convertie en énergie thermique : ce mécanisme permet en quelques secondes à minutes de multiplier de 2 à 5 fois la chaleur interne produite (Sherwood *et al.*, 2016).

- Thermogénèse sans frissons

Lors d'expositions chroniques, une augmentation du métabolisme de base se met en place, par oxydation de la graisse brune principalement. Ce mécanisme est permis par une augmentation de la production d'hormones thyroïdiennes sous contrôle hypothalamique et par action calorigène des catécholamines, libérées par activation du système nerveux sympathique (Crépeaux, 2022; Klein, 2012).

- Adaptations comportementales

La mise en mouvement permet à l'animal d'augmenter sa thermogénèse (Crépeaux, 2022).

1.2.2 Thermolyse

Le dictionnaire médical de l'Académie de Médecine définit la thermolyse comme les « modalités d'élimination vers le milieu extérieur, de l'énergie thermique produite en excès par l'organisme » (Académie Nationale de Médecine, 2023). Elle implique plusieurs mécanismes, à parts variables, selon le contexte environnemental dans lequel se trouve l'animal. Les mécanismes de perte de chaleur interviennent tous au niveau de l'enveloppe de l'animal. Il faut noter que la chaleur se déplace toujours selon un gradient thermique, du plus chaud vers le plus froid (Sherwood *et al.*, 2016).

1.2.2.1 Convection

La convection consiste en un transfert d'énergie thermique entre l'animal et des courants d'air ou d'eau. Cet échange est d'autant plus remarquable que les mouvements sont importants et que le gradient thermique est grand entre la peau et l'air (Guthrie et Lund, 1998).

Certains paramètres peuvent influencer les échanges de chaleur par convection, tels que (Sherwood *et al.*, 2016) :

- La présence de poils ;
- L'épaisseur de la couche adipeuse ;
- La dilatation des vaisseaux sanguins ;
- La surface corporelle.

Ainsi, un grand cheval avec une faible épaisseur de poils a plus de facilité à évacuer la chaleur qu'un cheval de petite taille au poil dense.

1.2.2.2 Conduction

La conduction est l'échange de chaleur par contact d'un corps chaud vers un corps froid, par transfert de molécule à molécule, jusqu'à égalisation des températures. Chez le cheval à l'exercice, ce transfert se fait principalement entre l'air et la surface corporelle. Cependant, l'air ayant une faible conductivité, la part de ce mécanisme dans la dissipation de chaleur est minime (Guthrie et Lund, 1998). Aussi, ce n'est pas la voie principale de perte de chaleur chez les animaux car spontanément ils ne vont pas se mettre contre des surfaces froides. Ce mécanisme n'est néanmoins pas à négliger lors de chirurgie, principalement lorsqu'elle concerne le poulain (Sherwood *et al.*, 2016). C'est aussi le procédé de thermolyse utilisé lorsqu'il s'agit de refroidir les chevaux après un exercice intense dans un environnement chaud et humide (Takahashi *et al.*, 2020). L'évaporation n'étant plus efficace, c'est la conduction qui permet l'évacuation de la chaleur, grâce à des douches de l'animal en continu, à l'eau froide ou ambiante (température inférieure à la température corporelle). En effet, l'eau présentant une conductivité élevée et l'évaporation ne permettant plus d'éliminer de chaleur dans cet environnement (voir 1.2.2.4), c'est le mécanisme qui semble être le plus efficace pour retrouver une température corporelle physiologique.

1.2.2.3 Radiation

Tous les objets, comprenant les animaux, émettent et absorbent des ondes électromagnétiques infrarouges. Ces ondes sont captées et absorbées par un objet seulement si cet objet est plus froid que l'objet émetteur : cette énergie est alors transformée en chaleur. Les animaux captent donc de la chaleur des objets environnants s'ils sont plus chauds qu'eux et de la même façon, ils en perdent si ces objets sont plus froids (Sherwood *et al.*, 2016).

1.2.2.4 Évaporation

L'évaporation repose sur le transfert de chaleur de l'animal vers l'air par passage de l'eau d'un état liquide à un état gazeux. Ce mécanisme repose principalement sur la sudation, la polypnée et la perspiration (diffusion transcutanée), dans des proportions différentes selon les espèces (Klein, 2012). Certaines espèces augmentent aussi leur thermolyse en étalant de la salive sur leur pelage, qui en s'évaporant, évacue de la chaleur. Lorsque la température extérieure dépasse la température corporelle, c'est le seul mécanisme permettant la perte de chaleur, mais il n'est néanmoins plus efficace lorsque l'air est saturé en eau. Chez le cheval, l'évaporation de la sueur (sudation) et de

l'eau du tractus respiratoire est le mécanisme de thermolyse prépondérant, en particulier à l'effort (Guthrie et Lund, 1998).

1.2.2.5 Réponses comportementales

L'animal cherche à augmenter sa thermolyse en modifiant son comportement, par exemple en cherchant de l'ombre ou des courants d'air frais (White, 2014). Ainsi, en cas de fortes chaleurs, le cheval a tendance à se réfugier à l'ombre d'un abri ou d'arbres feuillus.

1.2.3 Transferts de chaleur dans le corps

Pour se distribuer à l'ensemble du corps, la chaleur produite par les muscles et les viscères utilise majoritairement la convection circulatoire : le sang est alors le vecteur de la chaleur (Klein, 2012). Selon les conditions thermiques environnantes, différentes stratégies de distribution de la température sont adoptées :

- Lors de fortes chaleurs, des mécanismes vasculaires comme l'ouverture d'anastomoses artério-veineuses au niveau des extrémités ou la vasodilatation des artérioles des lits vasculaires cutanés, permettent l'augmentation de la température cutanée et ainsi davantage de perte de chaleur (Klein, 2012).
- Lors de température basse, la fermeture des anastomoses et la vasoconstriction permettent de diminuer l'afflux de sang dans la peau et ainsi de conserver la chaleur pour le noyau (Klein, 2012; Sherwood *et al.*, 2016).

Les schémas ci-dessous (Figure 1, Figure 2) permettent d'illustrer la répartition de la température selon les températures extérieures.

Figure 1 : Distribution de la température corporelle chez un poney dans un environnement chaud (d'après Klein, 2012)

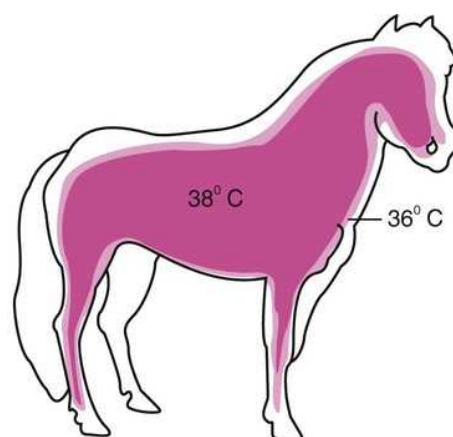
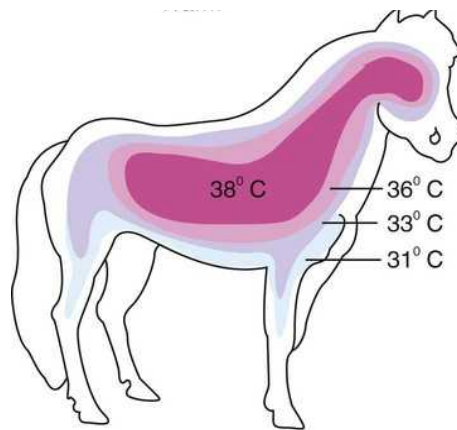


Figure 2 : Distribution de la température corporelle chez un poney dans un environnement froid (d'après Klein, 2012)



De plus, le flux sanguin sert de plaque tournante dans les échanges de température au niveau des réseaux admirables, des systèmes comprenant un ensemble d'artères et de veines (Klein, 2012). Les artères contiennent du sang chaud provenant du noyau et rejoignent la périphérie, tandis que les veines sont le support d'un sang froid, ramené de la périphérie vers le noyau. Ainsi, les circulations se font à contre-courant : ce mécanisme permet alors un transfert de chaleur du sang chaud artériel vers le sang froid veineux et le maintien de la température centrale. Ces échanges à contre-courant sont aussi utilisés pour perdre de la chaleur : lors de température ambiante élevée, le sang veineux va plutôt circuler dans les vaisseaux superficiels, afin de favoriser la thermolyse. En conditions froides, le sang veineux rejoint plutôt le réseau profond, associé aux artères, afin d'augmenter la température du sang veineux et ainsi de maintenir la température centrale.

Chez le cheval, on retrouve un système à contre-courant dans les poches gutturales : elles sont le siège de perte de chaleur par transfert depuis les artères carotides vers l'air plus froid contenu dans les poches. (Klein, 2012; Sherwood *et al.*, 2016)

1.3 Variations de la température corporelle

Nous avons donc vu que la température corporelle des Mammifères est étroitement maintenue par les mécanismes détaillés ci-dessus. Bien que cette température demeure relativement stable, elle présente des variations physiologiques ponctuelles en fonction des conditions imposées à l'animal. De plus, en contexte pathologique, la température corporelle peut parfois également être modifiée. Ainsi, il est intéressant de comprendre les contextes pouvant entraîner une variation de la température corporelle, mais aussi les récepteurs et voies de transmission mises en jeu, afin de pouvoir au mieux la contrôler.

1.3.1 Origine

1.3.1.1 Variations physiologiques

Physiologiquement, la température corporelle présente des variations de faible amplitude sans conséquence pour l'organisme. Ces variations sont influencées par différents facteurs détaillés ci-dessous.

Chez le poulain, la température corporelle est plus élevée que chez l'adulte, avec un intervalle de températures de 37 à 38,9°C jusqu'à l'âge de 6 mois environ, contre 37 à 38,5°C chez le cheval adulte. Le poulain est aussi d'avantage exposé à une élévation temporaire de la température en situation de stress (Desjardins et Cadore, 2004) et à une perte plus marquée de chaleur dans un environnement froid (White, 2014). De leur côté, les chevaux âgés ont des capacités de thermorégulation diminuées, en relation avec la dégradation de leur fonction cardiaque (McKeever *et al.*, 2010). Tout comme les poulains, ils sont aussi sensibles aux pertes de chaleur lors d'exposition importante au froid (White, 2014).

À l'exercice, le métabolisme produit de la chaleur proportionnellement à l'intensité du travail. Cette chaleur est transmise des muscles au noyau central, entraînant une augmentation de la température corporelle. Pour contrebalancer cette thermogénèse, le cheval évacue de l'énergie thermique en suant, ce qui permet une stabilisation de la température à une valeur légèrement plus élevée que celle de repos (Guthrie et Lund, 1998). Après l'effort, la température corporelle retrouve sa valeur initiale au bout de 30 minutes environ (Hubert *et al.*, 2002).

La température corporelle est aussi influencée par le climat dans lequel l'animal se trouve : lorsque la température extérieure augmente, la température corporelle s'élève légèrement et inversement dans un environnement froid et/ou venteux. L'hygrométrie est aussi déterminante pour la température corporelle car elle conditionne les capacités d'évaporation : un air saturé en eau ne permet pas à l'animal de suer, la sudation étant pourtant le mécanisme prépondérant de thermolyse chez le cheval. Un climat pluvieux quant à lui tend à faire décroître la température corporelle (Guthrie et Lund, 1998). Enfin, une radiation solaire importante provoque une augmentation de la température corporelle (White, 2014).

Des modifications minimes de la température corporelle peuvent aussi être rapportées en fonction du cycle sexuel, comme autour de l'ovulation chez la jument (Bowman *et al.*, 2007).

1.3.1.2 Hyperthermie

Une hyperthermie vraie est une augmentation de la température corporelle sans modification du point critique de température centrale hypothalamique. Elle est causée par une augmentation de la production de chaleur, de l'absorption de chaleur, et/ou une altération de la thermolyse (Desjardins et Cadore, 2004; White, 2014). Il existe de multiples causes d'hyperthermie vraie dont les principales sont décrites ci-dessous.

- Les médicaments

Chez le cheval, certaines spécialités thérapeutiques peuvent secondairement induire des modifications de la température :

- Les phénothiaziques, peuvent entraîner une perte de la capacité à contrôler la température corporelle (White, 2014) ;
- L'érythromycine peut induire une hyperthermie par temps chaud, en particulier chez les poulains (White, 2014) ;
- Divers médicaments, peuvent entraîner une élévation de la température par blocage de la transpiration ou par vasodilatation (Dinarello, 1996).

A l'inverse, certaines spécialités pharmacologiques peuvent générer de l'hypothermie, tels que les α 2-agonistes (xylazine et détomidine) qui, en induisant de la tachypnée, diminuent la température corporelle chez les chevaux fébriles. Ils diminueraient aussi la production de prostaglandine E2 par l'hypothalamus (White, 2014).

- L'hyperthermie maligne

L'hyperthermie maligne (HM) est un trouble des muscles squelettiques qui se manifeste par une libération incontrôlée de calcium intracellulaire par le réticulum endoplasmique des cellules musculaires lors d'exposition aux anesthésiques volatiles (sévoflurane, halothane, desflurane, etc.). Cette entité est décrite chez le cheval, en particulier chez les Quarter horse et apparentés. Lors d'HM, on retrouve aussi une tachycardie, une tachypnée, une acidose, ainsi que d'autres éléments relatifs à une réponse métabolique excessive (Rosenberg *et al.*, 2007).

- Le syndrome d'épuisement

Le syndrome d'épuisement chez le cheval correspond généralement à un animal qui produit un effort soutenu dans un environnement très chaud, humide et/ou ensoleillé, dans lequel il ne parvient plus à réguler correctement sa température, notamment par limitation de la sudation. On parle aussi de coup de chaleur. L'augmentation de température est d'autant plus marquée que le cheval est déshydraté et présente des désordres électrolytiques (Guthrie et Lund, 1998). Une activité intense musculaire liée à un exercice intense peut aussi être associée à des crises tonico-cloniques généralisées, à l'origine d'une augmentation de la température (White, 2014).

- L'anhidrose

L'anhidrose est une autre cause d'hyperthermie, correspondant à une perte de la capacité de sudation, totale ou partielle. Elle se produit chez 25% des chevaux dans un environnement chaud et humide. Elle entraîne une réduction de la thermolyse et ainsi une augmentation de la température (Hubert *et al.*, 2002).

- Les lésions hypothalamiques

Des lésions hypothalamiques touchant les zones impliquées dans la thermorégulation peuvent entraîner des modifications de la température. On retrouve particulièrement de l'hypothermie.

Cependant, de l'hyperthermie peut être rapportée lors d'hémorragie ou de masses compressives (abcès etc.) (Dinarelo, 1996; White, 2014).

Lors d'hyperthermie vraie, l'utilisation de molécules antipyrétiques n'est pas efficace. En revanche, les chevaux répondent favorablement à la mise en place de mesures de refroidissement. (Dinarelo, 1996; Guthrie et Lund, 1998)

1.3.1.3 Fièvre

Lorsque l'hyperthermie est associée à une élévation du point de consigne et devient indépendante des conditions climatiques extérieures, on parle de fièvre (Hines, 2018; Radostits *et al.*, 2007; White, 2014).

Il existe de très nombreuses causes, de natures diverses pouvant être à l'origine de fièvre chez le cheval. Il convient de connaître les plus fréquentes afin de pouvoir orienter le diagnostic et de mettre en place les mesures adéquates pour rétablir une température normale. Le tableau présenté ci-dessous énumère les principales causes connues de fièvre chez le cheval.

Tableau 2 : Principales causes de fièvre chez le cheval (White, 2014)

	Causes fréquentes	Causes moins fréquentes	Causes rares
Origine infectieuse	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Maladies virales des voies respiratoires supérieures ▪ Gourme ▪ Pneumonie bactérienne ou virale ▪ Pleuropneumonie ▪ Infections parasitaires gastro-intestinales ▪ Entérite (<i>Clostridium difficile</i>, <i>Lawsonia</i> ou causes inconnue) ▪ Salmonellose ▪ Ehrlichiose monocytaire équine (fièvre équine du Potomac) ▪ Entérite proximale (duodénum, jéjunum) ▪ Endotoxémie à la suite de troubles gastro-intestinaux ▪ Septicémie ▪ Arthrite septique ▪ Péritonite ▪ Tétanos ▪ Ténosynovite traumatique, cellulite ▪ Abscesses occultes localisés ▪ Tumeurs ▪ Ostéomyélite (poulains) ▪ Abscesses de l'ouraque (poulains) ▪ Diarrhée à rotavirus (poulains) ▪ Métrite (juments) ▪ Piroplasmose (en France) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Encéphalomyélite équine (Encéphalite équine de l'Ouest ou de l'Est) ▪ West Nile ▪ Ostéomyélite (adultes) ▪ Stomatite vésiculeuse ▪ Œdème malin ▪ Endocardite bactérienne ▪ Mammite ▪ Pyélonéphrite ▪ Anémie infectieuse équine ▪ Artérite virale équine ▪ Otite moyenne ou interne ▪ Maladie de Tyzzer (poulains) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Péricardite ▪ Aspergillose ▪ Candidose ▪ Pneumonie à <i>Pneumocystis carinii</i> ▪ Brucellose ▪ Tularémie ▪ Fièvre charbonneuse ▪ Rage ▪ Maladie de Lyme (<i>Borrelia burgdorferi</i>) ▪ Nocardiose ▪ Coccidioïmycose
Origine néoplasique	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mélanomes métastatiques ▪ Lymphosarcomes ▪ Carcinome des cellules squameuses ▪ Fibrosarcomes 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tumeurs des cellules de la granuloza ▪ Sarcomes à cellules réticulo-endothéliales indifférenciés ▪ Adénocarcinomes ▪ Maladies myéloprolifératives 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hémangiosarcome ▪ Mésothéliome ▪ Phéochromocytome ▪ Ostéosarcome ▪ Myélome du tractus intestinal
Origine immunologique	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Purpura hémorragique ▪ Urticaire ▪ Fièvre induite par les médicaments 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Anémie hémolytique à médiation immune ▪ Immunodéficiences combinées du poulain ▪ Déficit en immunoglobulines G ▪ Pemphigus foliacé ▪ Vasculite nécrosante chronique ▪ Isoérythrolyse néonatale 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Affections du tissu conjonctif ▪ Polyarthrite rhumatoïde ▪ Agammaglobulinémie transitoire des poulains ▪ Pemphigoïde bulleuse ▪ Déficit immunitaire commun variable

Origine inflammatoire non infectieuse et autres	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Affections hépatiques ▪ Hyperlipidémie, lipidose hépatique équine ▪ Nécrose hépatique aiguë (maladie de Theiler) ▪ Hépatite chronique active ▪ Lithiase biliaire ▪ Paralysie périodique hyperkaliémique ▪ Corps étrangers nasal, oral, pharyngé, trachéal, bronchique ▪ Thrombophlébite ▪ Traumatisme oculaire ▪ Uvéite récurrente ▪ Brûlures, inhalation de fumée ▪ Morsure de serpent ▪ Insuffisance rénale aiguë ▪ Pneumonie interstitielle idiopathique
--------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Lors de fièvre vraie, on utilise des molécules antipyrétiques : notamment, les anti-inflammatoires non stéroïdiens (AINS) permettent de baisser la température corporelle, par blocage de la cascade inflammatoire et donc de la formation de prostaglandines, à l'origine de la fièvre (voir infra) (Klein, 2012).

1.3.2 Mécanismes mis en jeu lors de variation de la température

L'homéostasie, définie précédemment et primordiale chez le vivant, est notamment permise par le système endocrinien et le système nerveux autonome (SNA), principaux protagonistes de cet équilibre physiologique. Chez les homéothermes particulièrement, la température corporelle est finement contrôlée. Cette régulation est réalisée par l'hypothalamus, centre de la thermorégulation, avec la participation de différents récepteurs (Clapham, 2012).

1.3.2.1 Acteurs et voies de transmission

Les principaux récepteurs à ce jour connus pour participer à la régulation de la température sont (Clapham, 2012; Klein, 2012; Morrison, 2016):

- Des récepteurs cutanés : les récepteurs sensibles au froid sont majoritaires, mais il existe aussi des entités sensibles au chaud. Ils donnent l'information sur la température cutanée.
- Des récepteurs viscéraux profonds : ils fournissent une évaluation de la température corporelle.
- Des récepteurs centraux : situés dans l'hypothalamus, la moelle épinière, et le tronc cérébral par exemple, ils détectent la température centrale.

La présence de récepteurs cutanés permet à l'animal de réagir rapidement en cas de changement environnemental, afin d'engager des mécanismes adaptatifs et de ne pas menacer l'équilibre central. Il y a plus de récepteurs sensibles au froid au niveau de la peau que sensibles au chaud. Cela permet la mise en place des mécanismes décrits précédemment pour limiter les pertes

de chaleur et favoriser la production de chaleur en cas de détection de stress thermique « froid ». À l'inverse, lors de chaleur excessive, ce sont des mécanismes d'évacuation de chaleur qui sont mis en place. Aussi, l'organisme réagit d'avantage aux modifications de la température centrale qu'à celles de la température cutanée : à valeur égale, les mécanismes de conservation de la chaleur sont plus importants pour une diminution de la température centrale que pour celle de la température cutanée (Klein, 2012).

L'information sur les températures périphérique, profonde et centrale est ensuite transmise par des voies afférentes au noyau pré-optique notamment, situé dans la région antérieure de l'hypothalamus. D'autres structures à proximité jouent un rôle probable dans la régulation de la température et dans l'intégration de ces informations, mais les mécanismes et les implications ne sont pas parfaitement élucidés (Clapham, 2012; Klein, 2012).

Dès lors que l'information acheminée depuis les différents récepteurs atteint l'hypothalamus, la température ainsi détectée est comparée à un point de consigne hypothalamique, correspondant à la température centrale seuil physiologique. De cette façon, une température centrale supérieure au point de consigne entraîne, par stimulation du SNA, une vasodilatation et la mise en place de réponses comportementales afin de réduire la température. Si la réponse est insuffisante, alors ces mesures seront accompagnées des mécanismes actifs de thermolyse décrits précédemment. À l'inverse, si la température détectée est inférieure au point de consigne, l'organisme va limiter ses déperditions de chaleur par piloérection, vasoconstriction et par adaptation du comportement, puis, si cela est insuffisant, va mettre en place des mécanismes actifs d'augmentation de thermogénèse (Klein, 2012; Morrison, 2016)

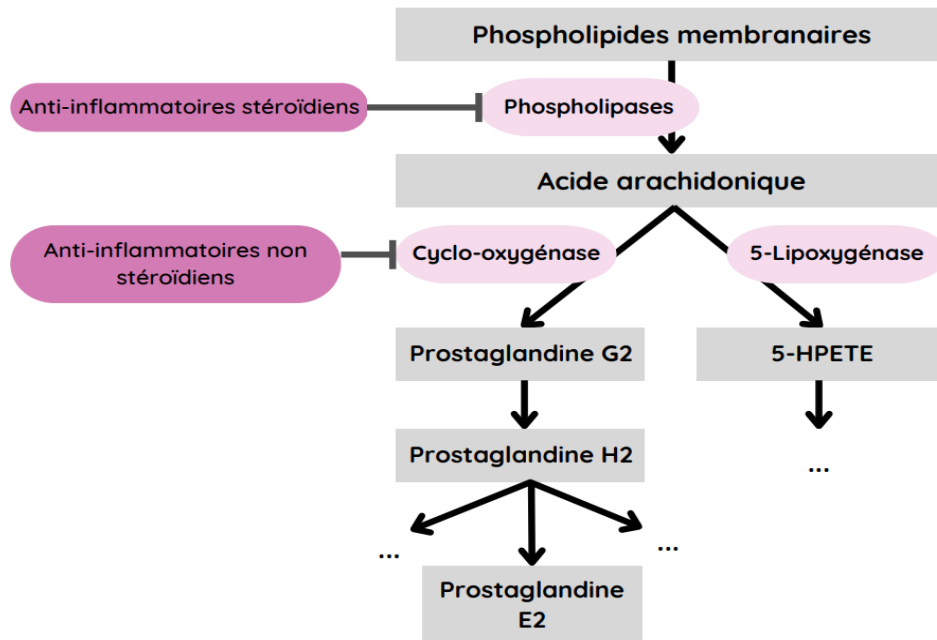
1.3.2.2 *Cas de la fièvre*

Nous avons précédemment défini la fièvre comme une élévation de la température corporelle associée à l'augmentation du point de consigne hypothalamique, accompagnant des affections de natures variées. Cette modification hypothalamique est principalement le résultat de la circulation de substances pyrogènes dans le sang (Dinarello, 1996; Klein, 2012; White, 2014).

On définit un pyrogène comme toute substance provoquant de la fièvre (Dinarello, 1996; Klein, 2012; White, 2014). L'envahissement de l'organisme par des agents infectieux, des toxines ou par des pyrogènes exogènes, telle que l'endotoxine lipopolysaccharidique (LPS) produite par les bactéries Gram négatives, entraîne la formation de pyrogènes dits endogènes par une grande variété de cellules. Parmi ces dernières, on retrouve les monocytes et les macrophages. Il existe au moins 11 pyrogènes endogènes, parmi lesquels l'interleukine-1 (IL-1), l'interleukine-6 (IL-6), le facteur de nécrose tumorale (TNF) ou encore l'interféron (IFN), chez l'Homme comme chez l'animal. Ces cytokines pyrogènes circulent dans le sang jusqu'à atteindre l'hypothalamus au sein duquel se trouve une zone appelée organe vasculaire de la lame terminale (OVLT) où la perméabilité de la barrière hémato-encéphalique permet leur pénétration jusqu'au cerveau. Dès lors, les pyrogènes endogènes stimulent la formation de prostaglandine E2 (PGE2) et d'autres métabolites de la cascade inflammatoire (voir Figure 3) au niveau des cellules endothéliales hypothalamiques, et ainsi initient une élévation du point de consigne. Aussi, les cytokines pyrogènes stimulent les lymphocytes B et T qui eux aussi produisent des cytokines, qui à la fois inhibent et augmentent la production de

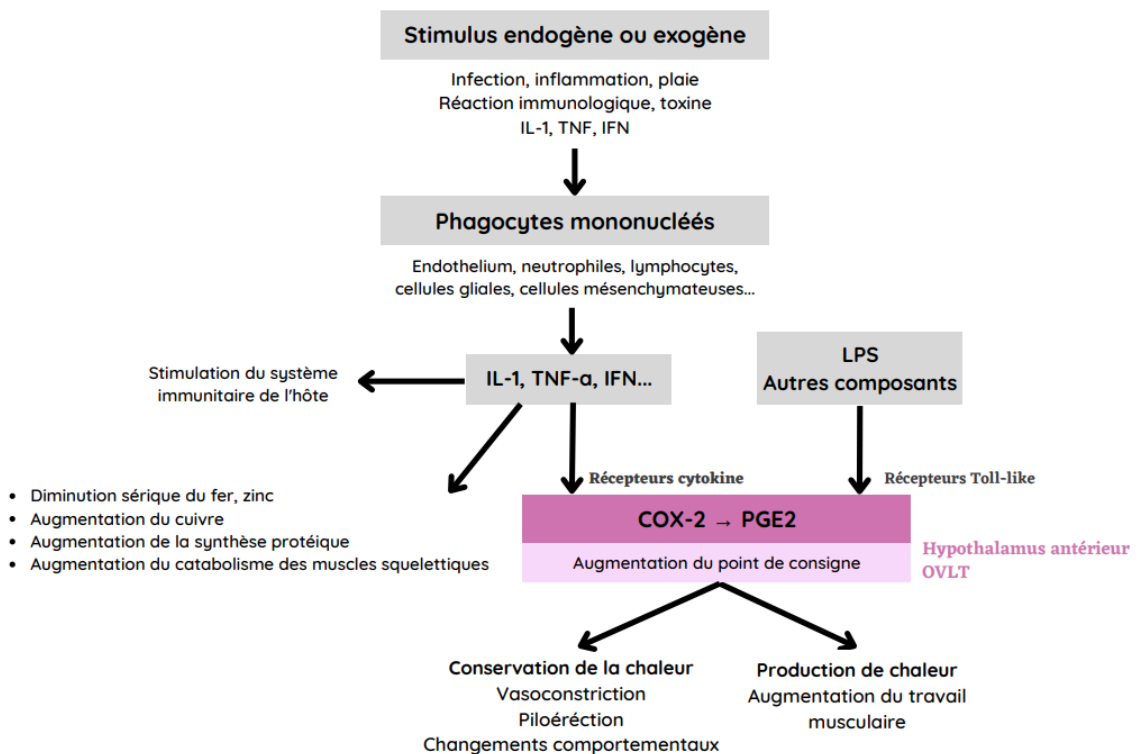
cytokines pyrogènes. Enfin, certaines d'entre elles perturbent l'équilibre des membranes et ainsi amplifient la cascade inflammatoire, par formation de prostaglandines, entretenant la stimulation hypothalamique. Ces informations sont ensuite transmises de l'hypothalamus aux nerfs périphériques et la température des organes centraux augmente.

Figure 3 : Synthèse des prostanoides (Aster et al., 2020)



Lors de fièvre, les mêmes mécanismes de régulation que ceux décrits précédemment sont mis en place afin de conserver une température corporelle voisine de la nouvelle température de consigne. De la même façon, des mécanismes de thermolyse sont adoptés lorsque le point de consigne revient à la normale, afin d'éliminer la chaleur excédentaire (Klein, 2012). La synthèse de la pathogénie de la fièvre est résumée Figure 4.

Figure 4 : Pathogénie de la fièvre (d'après White, 2014)



Ainsi, cette première partie nous a permis d'établir les bases concernant le principe de thermorégulation, l'origine de ses variations et les mécanismes associés. Il convient maintenant de comprendre les enjeux de sa mesure et les moyens disponibles.

2 Mesure de la température corporelle

La mesure de la température corporelle est une pratique courante depuis plusieurs siècles, utilisée dans différents contextes. Bien que le chapitre précédent nous ait permis de voir que la température corporelle était un mécanisme hautement régulé et à l'origine de variations, physiologiques ou pathologiques, il faut comprendre l'intérêt de sa mesure. Dès lors, nous pourrions mettre en évidence l'importance de développer des outils de mesure précis, fiables et faciles d'utilisation et ainsi définir les objectifs de cette thèse.

2.1 Nécessité de la mesure

2.1.1 Réactions biologiques

Essentielle au bon déroulement de la vie organique interne, la température centrale est un paramètre hautement régulé dans l'organisme. En effet, la plupart des fonctions internes sont dépendantes de réactions chimiques sensibles aux variations de température : en particulier, la température affecte la vitesse des réactions et peut dénaturer les macromolécules, inhibant leur fonctionnement (Klein, 2012; Sherwood *et al.*, 2016; White, 2014). Ainsi, chez les homéothermes, différents mécanismes sont mis en jeu afin de maintenir la valeur de la température dans une gamme de valeurs étroite,

afin de pouvoir maintenir un équilibre chimique interne, d'assurer ses fonctions vitales et de limiter les possibles conséquences de sa variation.

2.1.2 Circonstances de la mesure

2.1.2.1 Contexte médical

Chez le cheval, la température corporelle physiologique est comprise entre 37,2°C et 38,3°C. (Hines, 2018). Nous avons vu précédemment que de nombreuses situations pouvaient conduire à une augmentation de la température. Dans tous les cas, il faut considérer l'hyperthermie comme une urgence médicale car, lors de hausse importante, les conséquences peuvent être dramatiques. Une température supérieure à 41,6°C peut entraîner des lésions organiques permanentes voire la mort, par vasoconstriction périphérique, hypotension et diminution du débit cardiaque (Desjardins and Cadore, 2004 ; White, 2014). Ainsi, son évaluation demeure indispensable pour prévenir les conséquences de son augmentation.

L'hyperthermie est l'un des symptômes les plus courants dont le vétérinaire doit déterminer l'origine (Hines, 2018; White, 2014). Après l'exclusion des causes d'hyperthermie vraie, on peut généralement conclure à une fièvre. Cette dernière peut être communément d'origine infectieuse (Hines, 2018), mais aussi inflammatoire, immunologique ou encore néoplasique (White, 2014). L'utilisation d'outils pour contrôler la température corporelle est donc un élément utile si ce n'est indispensable à la détection, à l'établissement du diagnostic étiologique et au suivi de nombreuses affections.

Dans la majorité des cas, la fièvre tend vers une guérison complète en 2 semaines par résolution spontanée, sans diagnostic étiologique précis (White, 2014). Mais dans certains cas, notamment chez le cheval, la fièvre peut se prolonger dans le temps, pendant des semaines à des mois, s'associant ou non à d'autres symptômes non spécifiques comme une léthargie, une inappétence ou encore une perte de poids. On parle de fièvre d'origine inconnue (Mair *et al.*, 1989; Radostits *et al.*, 2007; White, 2014). La mesure de la température corporelle a alors une importance primordiale dans l'exploration de ce syndrome : à un examen clinique et un historique complet doit s'ajouter une prise de température biquotidienne afin de schématiser les variations de température sur une journée. Les variations de la fièvre peuvent présenter différentes allures au cours de la journée :

- Transitoire : Augmentation temporaire de la température corporelle qui se résout généralement d'elle-même sans traitement médical spécifique.
- Intermittente : Variations diurnes supérieures à 0,75°C suivies de périodes de température normale. La plupart du temps, le pic de fièvre intervient en fin d'après-midi ou en soirée. (White, 2014) Cette courbe s'observe généralement dans le cas de causes infectieuses, virales principalement (Radostits *et al.*, 2007), mais aussi lors de néoplasie, particulièrement lorsqu'elle est associée à une nécrose et une inflammation (White, 2014).
- Continue : Augmentation constante de la température, sans variation diurne significative. Ce type de tracé peut être observé comme unique signe clinique lors de l'administration de certains médicaments ou de toxines (Hines, 2018; Radostits *et al.*, 2007; White, 2014).
- Rémittente : Variations diurnes de la température exacerbées sans retour à la normale ou élévation cyclique de la température pendant quelques jours avec des périodes de retour à

la normale. Elle est classiquement observée lors d'anémie infectieuse équine (AIE) ou d'affections protozootiques (Hines, 2018; Radostits *et al.*, 2007; White, 2014).

- Biphasique : Hausse de la température suivie d'une période de température normale à nouveau suivie d'une augmentation. On la retrouve par exemple lors d'Ehrlichiose monocytaire équine ("Potomac horse fever") (Hines, 2018) et de la gourme (Radostits *et al.*, 2007).
- Atypique : Schéma de variations de la température irrégulier (Radostits *et al.*, 2007).

Bien que parfois insuffisant, le suivi de la température permet de documenter les variations de température chez l'animal et ainsi d'orienter le diagnostic étiologique lors de fièvre persistante. Il est alors essentiel de disposer d'outils adéquats afin de le mettre en œuvre.

2.1.2.2 Contexte réglementaire

Les regroupements de chevaux, que ce soit pour des compétitions, des courses ou encore des ventes présentent un risque majeur quant à la circulation de maladies infectieuses et à la genèse d'épizootie. Au-delà du risque sanitaire présenté pour les animaux lors de développement de formes graves, les épizooties peuvent avoir un impact économique majeur.

Parmi les récentes épizooties, nous pouvons décrire l'épisode de rhinopneumonie qui a sévit en Europe au cours de l'année 2021. Début 2021, lors d'une compétition internationale à Valence en Espagne, des cas d'herpès-virose de type 1 (EHV-1) ont été confirmés. De nombreux chevaux ont été contaminés et ont majoritairement développé des signes cliniques respiratoires, ainsi que de l'hyperthermie. Certains ont néanmoins déclaré une forme neurologique, nécessitant une hospitalisation et conduisant, dans de rares cas, au décès. Au bilan, 11 pays européens touchés, 18 chevaux morts déclarés, et une quarantaine de foyers français ont été décomptés, dont 25 en lien direct avec Valence. De nombreux chevaux ont été mis en quarantaine en Espagne. Outre cela, les compétitions organisées par la Fédération Française d'Équitation (FFE) et par la Société Hippique Française (SHF) ont été suspendues sur le territoire du 1^{er} au 11 avril 2021. La Fédération Équestre Internationale (FEI) a elle aussi cessé l'organisation de compétitions dans 10 pays européens sur cette même période. Des mesures de précaution ont été vivement recommandées en ce qui concerne l'élevage, la reproduction et les chevaux de course, l'activité demeurant cependant maintenue. Cet événement a eu un retentissement important sur la filière, par le ralentissement voire l'arrêt de l'activité, et les conséquences économiques en découlant.

La reprise des compétitions initiée le 12 avril 2021 s'est alors faite sous des mesures sanitaires strictes, en amont et pendant les événements. Outre la recommandation de vaccination contre la rhinopneumonie énoncée par le RESPE, la FEI impose un suivi clinique et en particulier de la température corporelle pendant les dix jours précédant les compétitions, ainsi que bi-quotidiennement pendant l'évènement. Pour les déplacements aériens, la réalisation d'un test PCR est nécessaire avant l'embarquement. Les mesures sanitaires sont poursuivies sur le site de la compétition sous le contrôle d'un vétérinaire FEI. La FFE et la SHF demandent quant à elles un contrôle de la température avant l'embarquement, autorisant le déplacement des chevaux seulement si la température est inférieure à 38,5°C. Sur le site de la compétition, la température est contrôlée bi-quotidiennement, à heures fixes, et reportée sur une fiche à vue du vétérinaire responsable (voir Annexe 1). Des mesures de biosécurité sont évidemment associées sur les lieux

de concours et les chevaux suspects sont isolées. Ces précautions sont maintenues jusqu'au 30 mai 2021 puis furent allégées (RESPE, 2021; SHF et FFE, 2021).

À l'issue de ces événements majeurs, la FEI décide de renforcer ses mesures sanitaires pour limiter la propagation de maladies contagieuses et endiguer au mieux les potentiels débuts de foyer. C'est pourquoi, à partir de janvier 2022, elle met en place un suivi rigoureux, dont les données sont à répertorier dans l'application mobile *FEI HorseApp*. Les documents médicaux, les potentiels tests de dépistage demandés en amont des compétitions sont à reporter dans l'application, ainsi qu'un suivi de la température rectale pour tout cheval participant. La température doit alors être prise deux fois par jour pendant les trois jours précédant une compétition, puis pendant toute la période de séjour du cheval sur le site. Le vétérinaire peut aussi être amené à mesurer la température rectale à l'arrivée du cheval ou pendant la compétition. L'application permet de détecter au plus vite les animaux hyperthermes afin de les isoler, mais aussi de réaliser une surveillance rapprochée voire un isolement des chevaux ayant voyagé ou ayant été en contact avec l'animal malade. L'application permet un accès rapide aux documents de santé du cheval, et ainsi de consulter si les chevaux hyperthermes (ou cliniques de symptômes neurologiques) ont été testés EHV-1 et grippe équine. La non-application de ces mesures sanitaires expose les participants à des sanctions telles qu'une amende ou une suspension du cheval pour des compétitions ultérieures (Fédération Équestre Internationale, 2023).

Ainsi, la mise en place de ces mesures permet un contrôle rigoureux et une meilleure gestion des animaux hyperthermes, afin d'éviter la propagation des maladies et les conséquences associées. La prise de température corporelle est un élément central de cette lutte. Elle repose sur l'utilisation de méthodes de mesure de la température accessibles et fiables. Aujourd'hui, seule la température rectale est validée par la FEI pour évaluer la température corporelle des chevaux. Cette méthode, dont la fiabilité a été étudiée, présente néanmoins des inconvénients techniques et sanitaires.

2.2 Méthodes de mesure de la température corporelle chez l'Homme

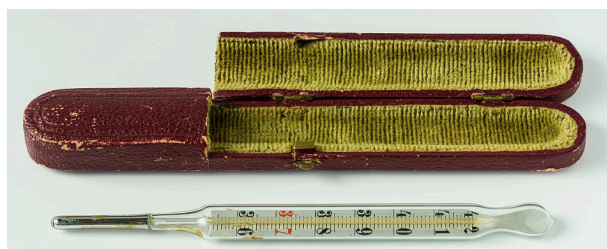
2.2.1 Histoire de la mesure de la température corporelle

En médecine humaine, l'importance de la température en relation avec l'état de santé du patient a été énoncée très tôt dans l'Histoire, et des références se retrouvent jusque dans de très anciens ouvrages religieux (Ring, 1998). Rapidement, les outils de mesure de la température extérieure ont été développés et dérivés à des fins de mesure de la température corporelle chez l'Homme. C'est ainsi, que les thermoscopes ont tout d'abord été utilisés, au 17^{ème} siècle, reposant sur la mise en évidence de différences de températures, sans valeur objective, et dépendamment de la pression atmosphérique. Au cours des siècles, de nombreuses avancées ont suivi avec notamment la mise en place d'échelles permettant des mesures quantitatives de la température. En 1720, Daniel Gabriel Fahrenheit a proposé une échelle portant son propre nom, définie par une température de 0 degrés Fahrenheit (°F) pour un mélange d'eau glacée et de sel, et une température de 212°F correspondant à la température d'ébullition de l'eau. Cette échelle, utilisée comme référence pendant plus de 200 ans a finalement été supplantée par le degré centigrade, échelle initialement décrite par Anders Celsius en 1742 et améliorée par Carl von Linné en 1750. Elle porte à présent le nom de degré Celsius (°C), bien qu'elle soit légèrement différente de l'échelle centigrade proposée par ce dernier. Le degré Celsius est aujourd'hui une unité dérivée du Système international, d'usage

courant à travers le monde, mise à part dans certains pays où le °F est toujours utilisé. Elle définit le 0°C comme la température de solidification de l'eau et 100°C comme celle de mise à ébullition de l'eau (Michalski *et al.*, 2001; Ring, 1998). Associé à ces avancées, des améliorations considérables ont permis l'élaboration de thermomètres fiables et indépendants de la pression atmosphérique. Particulièrement, les travaux de Carl Wunderlich, ont mis en lumière l'importance de la thermométrie clinique. Dans son traité de 1868, il énonce de nombreux principes, parmi lesquels est décrite la relation entre la température corporelle, ses variations, et différents statuts physiologiques chez l'Homme. Petit à petit, le thermomètre prend une place essentielle dans l'examen médical (Ring, 1998).

Pendant de très nombreuses années, le thermomètre à mercure a été l'instrument de choix pour mesurer la température corporelle chez l'Homme. Créé au 18^{ème} siècle, c'est au 19^{ème} qu'il devint l'instrument phare de l'évaluation de la température corporelle grâce à l'invention du thermomètre clinique, un thermomètre à mercure de 15 centimètres de long, transportable par les médecins (Blumenthal, 1992). Le principe général consiste en un tube en verre contenant une colonne de mercure, dont le volume et ainsi la longueur, varie en fonction de la température. (Figure 5)

Figure 5 : Thermomètre à mercure et son étui (d'après Franz van Duns, 2020)



Néanmoins, le monopole du thermomètre à mercure a été mis à mal par la mise en évidence de la toxicité du mercure (Langford et Ferner, 1999). En effet, le circulaire n°97/305 du Ministère du Travail et des Affaires Sociales publié le 22 avril 1997 rappelle les dangers associés à l'utilisation du mercure, tant pour la santé que pour l'environnement (Ministère du Travail et des Affaires Sociales, 1997). Chez l'Homme, le mercure contenu dans les thermomètres pourrait être à l'origine de troubles en cas d'exposition chronique, tels que de la fatigue, une perte d'appétit, ou encore des lésions rénales. Des atteintes locales peuvent également apparaître en cas de contact direct avec le mercure, et des effets tératogènes et mutagènes sont aussi décrits (Langford et Ferner, 1999). Bien que ces effets ne soient rapportés qu'en cas de bris du thermomètre et n'aient pas été associés avec l'utilisation de thermomètre intacts (Blumenthal, 1992), cela a conduit la Direction Générale de la Santé et la Direction des Hôpitaux à promouvoir la transition vers des outils plus sûrs. À ces arguments s'ajoute le risque environnemental, avec la pollution engrangée par la libération de mercure dans l'air et dans les eaux, particulièrement lors du traitement des déchets issus des thermomètres à mercure (Ministère du Travail et des Affaires Sociales, 1997). Finalement, le thermomètre à mercure est interdit de mise sur le marché en France à partir de mars 1999 (Kouchner *et al.*, 1998; Ministre du Travail et des Affaires Sociales, 1997).

Aujourd'hui, il existe de nombreuses alternatives à l'ancestral thermomètre à mercure. Par la suite, nous allons ainsi décrire les principaux outils aujourd'hui utilisés et disponibles en médecine humaine, ainsi que les sites corporels associés. La volonté n'est pas d'établir une liste exhaustive des méthodes de prise de température existantes mais de considérer celles praticables en routine, n'impliquant pas d'examens invasifs. L'objectif final est de pouvoir comparer ces données aux connaissances et pratiques actuelles en médecine vétérinaire, et particulièrement dans l'espèce équine.

2.2.2 Outils et sites de mesure actuels chez l'Homme

- Le thermomètre électronique

Avec l'interdiction du thermomètre à mercure, le thermomètre électronique a connu son essor à la fin du XX^{ème} siècle, devenant l'outil de référence pour la mesure de la température corporelle. En effet, il permet de s'affranchir du risque mercuriel en cas de bris du thermomètre, mais aussi de la pollution environnementale associée, et de ses conséquences pour l'Homme. Le principe repose sur la mesure d'une résistance par un capteur inclus dans l'outil, qui est convertie en température. Selon le type de thermomètre utilisé, la mesure peut se faire par deux procédés : la température peut être déduite à partir d'une courbe de valeurs de la température, permettant une évaluation rapide (30 secondes en moyenne) mais relativement peu précise de la température. Sinon, la mesure se fait par évaluation continue, jusqu'à stabilisation à une valeur définitive. Cette méthode est plus longue, allant jusqu'à 6 fois le temps de la méthode précédente, mais fournit une valeur précise de la température corporelle (Mari *et al.*, 1997; Sermet-Gaudelus *et al.*, 2005). Chez l'Homme, il apparaît que la température rectale mesurée à l'aide du thermomètre électronique présente une corrélation élevée avec celle provenant d'un thermomètre à mercure, avec une différence moyenne de $-0,05^{\circ}\text{C}$ (Jensen, 2000). Certaines études révèlent tout de même des écarts de température plus importants (Smith, 1998).

En médecine humaine, le thermomètre électronique est principalement utilisé par trois voies distinctes : rectal, axillaire et oral.

- Température rectale

Le site rectal est employé depuis l'utilisation du thermomètre à mercure. Il est probablement le site de mesure le plus communément utilisé à ce jour, et la température rectale est considérée comme la méthode de référence pour évaluer la température centrale chez l'Homme. Néanmoins, de nombreuses limites à la température rectale sont rapportées. D'un point de vue fiabilité de la mesure, d'anciennes études semblent montrer que la température rectale serait légèrement plus élevée que celle des organes centraux (Eichna *et al.*, 1951) mais aussi fortement dépendante du flux sanguin (Grayson, 1951). De cette façon, il existerait un gradient de température entre la température centrale et la température rectale, ainsi qu'une inertie thermique, principalement causée par le contenu gazeux et souvent solide du rectum (Sermet-Gaudelus *et al.*, 2005). Concernant la mise en pratique de la mesure, de nombreux désavantages sont rencontrés. Outre la simplicité d'utilisation, la température rectale demeure une méthode embarrassante, intrusive voire douloureuse pour le patient humain, particulièrement chez l'enfant (Hymczak *et al.*, 2021). Elle peut être influencée par une inflammation rectale (Sund-Levander et Grodzinsky, 2013) ou avoisinante, un contenu fécal, et

ne peut être pratiquée en cas d'atrésie anale ou d'entérocolite nécrosante par exemple (Hissink Muller *et al.*, 2008). Aussi, le thermomètre électronique est un outil réutilisable, et peut, en cas de désinfection incorrecte, être le vecteur d'infection nosocomiale par voie rectale. (Sund-Levander et Grodzinsky, 2013) Enfin, il peut être responsable d'une perforation rectale en cas de mauvaise utilisation, d'agitation du patient ou d'atonie rectale (Hymczak *et al.*, 2021; Sund-Levander et Grodzinsky, 2013).

L'ensemble de ces limites impose une utilisation standardisée et rigoureuse de l'outil afin de réduire l'influence de celles-ci. L'estimation de la température centrale par voie rectale est affectée par la profondeur du thermomètre dans le rectum, le biais étant moindre lorsque la profondeur augmente (Miller *et al.*, 2017). Cela pourrait en partie s'expliquer par la proximité avec les gros vaisseaux pelviens (Mead et Bonmarito, 1949). Ainsi, chez l'adulte, la mesure la plus fiable serait obtenue par insertion d'un thermomètre souple à 15 centimètres de profondeur dans le rectum, ce qui est rarement possible. Sinon, les préconisations du fabricant doivent être scrupuleusement suivies (Miller *et al.*, 2017). La mesure rectale ne doit pas être utilisée en cas de malformations ou d'affections anales et/ou rectales. Le thermomètre doit être laissé à demeure jusqu'à équilibration de la mesure, souvent manifestée pour les thermomètres actuels par un signal sonore.

- Température axillaire

La température axillaire consiste en l'insertion du thermomètre électronique (anciennement à mercure) au sein du creux axillaire. Bien que parfois considérée comme une des méthodes de référence pour l'évaluation de la température centrale chez l'Homme, elle est toutefois largement controversée. En effet, bien que facile d'utilisation, indolore et peu traumatisante, cette technique impose de nombreux biais. La température axillaire semble être systématiquement inférieure à la température rectale (Pecoraro *et al.*, 2021). De plus, les variations seraient d'autant plus importantes en cas d'augmentation de la température corporelle, rendant impossible l'obtention d'un facteur de correction permettant le passage de la température axillaire à la température rectale (Falzon *et al.*, 2007). La température axillaire est aussi la méthode de mesure la plus influencée par la température extérieure, particulièrement en cas de maigreur du patient, ne permettant pas l'occlusion de l'aisselle ou au contraire de surpoids du patient, pouvant impliquer de la graisse axillaire modifiant la mesure de la température (Miyahara *et al.*, 1997; Sermet-Gaudelus *et al.*, 2005). Enfin, la mesure est chronophage, car la stabilisation de la température est longue, et en pratique, le thermomètre est rarement laissé en place suffisamment longtemps, ce qui fausse la mesure de la température (Moran et Mendal, 2002; Sermet-Gaudelus *et al.*, 2005). Ainsi, cette mesure apparaît comme peu fiable chez l'Homme.

- Température orale

Autrefois réalisée à l'aide d'un thermomètre à mercure, la température orale peut être obtenue avec un thermomètre électronique longiligne classique. Elle consiste en l'application du capteur en position sublinguale, accolé au frein de la langue, dans une « poche thermique », formée par les artères et veines linguales profondes au-dessus, et sublinguales dessous (Latman, 2003). La mesure effectuée apparaît cependant moins fiable lorsqu'elle est réalisée avec un thermomètre électronique qu'avec un thermomètre à mercure, et plus sensible aux variations aiguës du débit sanguin (Latman, 2003). La température orale mesurée peut aussi être modifiée par une ingestion

d'aliments ou de boissons à différentes températures (Moran et Mendal, 2002), une respiration accélérée (Tandberg et Sklar, 1983), une consommation de cigarettes (Moran et Mendal, 2002) ou encore une bouche non occluse. Ainsi, la température orale est soumise à de nombreux biais et n'est pas à favoriser en ce qui concerne l'évaluation de la température centrale. Cependant, si elle doit être réalisée, il faut positionner le thermomètre dans la poche sublinguale, au plus proche de l'artère, pendant le temps nécessaire à la stabilisation de la mesure. Aussi, il faut maintenir les lèvres du patient fermées et limiter l'exercice et la consommation d'aliments, de boissons ou de cigarettes pendant les minutes précédant la mesure. La mesure est à réserver au patient coopératif et conscient, sans affection buccale connue (Sund-Levander et Grodzinsky, 2013).

- Le thermomètre infrarouge

Le thermomètre infrarouge (TIR) permet l'évaluation de la température par mesure du rayonnement infrarouge généré par une surface de mesure choisie. Les TIR ne mesurent pas directement la température centrale mais vont corréliser la température de surface mesurée à une technique de mesure de référence. Par exemple, la température frontale de surface étant toujours inférieure à la température centrale, le TIR propose directement une valeur corrigée par application d'un algorithme spécifique, permettant un passage de la valeur mesurée par le TIR à une valeur de température centrale qui aurait été mesurée par une méthode de référence. (Sermet-Gaudelus *et al.*, 2005; Sullivan *et al.*, 2021). Cet outil permet une obtention de la mesure en quelques secondes, de façon indolore, la plupart du temps sans contact avec le patient et donc avec un risque nosocomial associé très réduit. (Sermet-Gaudelus *et al.*, 2005).

En médecine humaine, il existe trois types de TIR : le thermomètre infrarouge sans contact portable (TISCP), le thermomètre infrarouge tympanique (TIRT) et le scanner thermique (ST). Différents sites peuvent être utilisés selon l'outil :

- Site temporal ou frontal pour le TISCP et le ST, selon le modèle ;
- Site tympanique pour les modèles tympaniques.

Les ST sont rarement d'usage médical et ne seront pas détaillés par la suite. En revanche, les TISCP et TIRT sont particulièrement répandus en médecine humaine. Ainsi, de nombreuses études ont été publiées ces dernières années afin d'attester de leur efficacité et de leur fiabilité.

- Le thermomètre infrarouge tympanique

Le TIRT est un type TIR de forme spécifique, permettant son introduction au sein du conduit auditif et la mesure du rayonnement infrarouge émis par la membrane tympanique. En effet, situé à mi-chemin entre la surface et le plan sagittal de la tête, le tympan est vascularisé par une artère collatérale de l'artère carotide interne, principal apport de sang à l'hypothalamus et aux centres de la régulation. Ainsi, il semble être un site de choix dans la détermination de la température centrale (Benzinger, 1969; Kim *et al.*, 2022).

Le TIRT permet une mesure rapide, indolore la plupart du temps, et hygiénique, notamment lors de la désinfection de l'embout ou d'utilisation d'embouts jetables. Les études semblent montrer une bonne corrélation du TIRT avec la température centrale lorsqu'il est utilisé de manière rigoureuse par un opérateur formé, mais il paraît moins précis lors de son utilisation par des individus

non experts (Amoateng-Adjepong *et al.*, 1999). Parmi les études publiées, la plupart met en évidence une bonne corrélation entre la température rectale et tympanique, en faisant un outil fiable pour la détection de la fièvre, en particulier chez les enfants (Van Staaij *et al.*, 2003). Pour certains, chez les jeunes enfants, ce thermomètre pourrait être un outil utile à des fins de dépistage mais non pour l'obtention d'une valeur exacte (Mogensen *et al.*, 2018). Bien que certaines études soient en faveur d'une absence d'implication de la présence de cérumen dans le conduit auditif (Van Staaij *et al.*, 2003), d'autres statuent sur un potentiel impact de celui-ci sur la température mesurée (Rabinowitz *et al.*, 1996). Ainsi, il est conseillé d'utiliser ce thermomètre sur un patient coopératif, avec une oreille propre, non inflammée et/ou infectée, en suivant scrupuleusement les indications fournies par le fabricant, telle que l'occlusion maximale du canal auditif externe (Sermet-Gaudelus *et al.*, 2005).

- Le thermomètre infrarouge sans contact portable

Le thermomètre infrarouge sans contact portable (TISCP) est un outil ayant connu une ascension fulgurante ces dernières années, en particulier lors de la pandémie de COVID-19 survenue en 2019. Il est principalement conçu pour des prises de température temporale, au niveau de la peau recouvrant l'artère du même nom (Crawford *et al.*, 2006), ou frontale. Comme expliqué précédemment, l'absence de contact avec le patient permet une mesure indolore, sans risque de transmission de pathogènes, et surtout rapide, sans nécessité de désinfection entre les patients. Ces éléments permettent une utilisation à grande échelle dans le cadre de détection massive lors de pandémie par exemple, et en font aussi un outil très sollicité par les parents de jeunes enfants (Sermet-Gaudelus *et al.*, 2005). Ainsi, de très nombreuses études ont été menées afin de conclure quant à la fiabilité et la précision de ces outils, particulièrement dans le domaine pédiatrique. Parmi les plus récentes, l'une publiée en 2022, montre que la température mesurée par TISCP est étroitement corrélée à celle mesurée par TIRT, rendant cet outil utile pour la mesure de la température chez les individus de moins de 18 ans. Cependant, le pourcentage de faux-positifs étant supérieur avec le TISCP lors de température supérieure à 38°C, une seconde mesure avec une autre méthode serait nécessaire le cas échéant (Kim *et al.*, 2022).

Ces dernières années, les études concernant ce sujet se sont accumulées. En 2014, l'Agence canadienne des médicaments et des technologies de la santé conclut, sur la base de 6 études différentes, qu'une différence moyenne de -0,02°C à 0,66°C s'applique entre le TISCP et la méthode de référence utilisée, selon le modèle. Parmi ces 6 études, 3 étaient alors en faveur de son utilisation, tandis les autres étaient plus réservées (Canadian Agency for Drugs and Technologies in Health, 2014). Une méta-analyse de 2020 (Aggarwal *et al.*, 2020) fait quant à elle l'état des données incluant 19 études publiées entre 2004 et 2020, évaluant 10 TISCP et 11 ST, dont les mesures étaient respectivement comparées aux températures rectale, tympanique ou axillaire pour l'un, et à celles tympanique ou axillaire pour l'autre. Sur les 5562 lectures de températures incluses, la sensibilité des TISCP était de 80,8% avec un intervalle de confiance à 95% (IC95%) de [65,6 ; 90,3] et la spécificité de 92% avec IC95%= [76,9 ; 97,5]. Les auteurs considéraient alors que les outils avaient des sensibilités et spécificités correctes pour la détection de la fièvre, justifiant leur utilisation. Néanmoins, la spécificité était augmentée lorsque la méthode de référence était la température rectale, et spécificité et sensibilité étaient modifiées lors de l'exclusion des nouveau-nés. De son côté, une étude de Sullivan *et al.* de 2021 portant sur 6 modèles différents de TISCP testés sur plus de 1000 individus, a montré que pour chaque modèle, la différence obtenue était

hors de l'intervalle de précision indiquée par le produit, en comparaison avec un thermomètre de référence oral. Ainsi, l'erreur pouvait atteindre -3 à $+2^{\circ}\text{C}$ dans des cas extrêmes, et majoritairement de -2°C à $+1^{\circ}\text{C}$, la mesure étant pourtant réalisée dans des conditions rigoureuses minimisant les biais liés à l'utilisateur et aux conditions expérimentales. Dans cette étude, l'erreur de mesure serait aussi dépendante de la température réelle de l'individu (Sullivan *et al.*, 2021). Enfin, en 2021, Kameda publie lui aussi une étude réalisée sur 65 patients adultes au sortir d'une chirurgie abdominale et montre une excellente corrélation de la température frontale mesurée par TISCP avec la température centrale évaluée avec un capteur cutané (Kameda, 2022).

Finalement, on retrouve une grande variabilité quant aux résultats des différentes études menées concernant la fiabilité des TISCP. Cela provient probablement, d'une part, de la grande diversité de modèles disponibles sur le marché, possédant chacun des consignes d'utilisation et un algorithme leur étant propres. D'autre part, un grand nombre de facteurs externes peuvent intervenir, tels que des facteurs environnementaux influençant la température de surface de la peau par réchauffement, refroidissement ou encore formation de sueur (Sullivan *et al.*, 2021). Enfin, grand nombre de ces études présentent des limites comme un échantillon réduit, une non-représentativité de l'échantillon choisi ou encore des imprécisions concernant l'hétérogénéité des méthodes de référence choisies. Ainsi, l'utilisation des TISCP doit respecter strictement les recommandations données par le fabricant, concernant le site choisi, la distance utilisée, et le contexte de la mesure. Chez l'Homme, les TISCP semblent être une aide à la surveillance de la température sans pour autant pouvoir remplacer les méthodes de référence. L'interprétation des mesures obtenues par utilisation d'un TISCP doit alors être consciencieuse et, en cas de doute, l'individu doit pouvoir faire l'objet d'une nouvelle mesure à l'aide d'une méthode de référence.

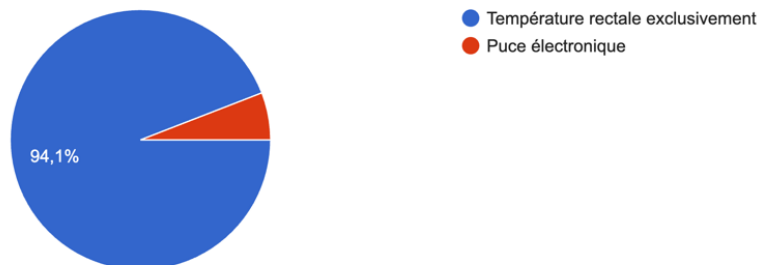
2.3 État des connaissances chez l'animal, en particulier chez le cheval

2.3.1 La température rectale

Par empirisme, le thermomètre électronique est l'outil de référence pour la mesure de la température corporelle chez les animaux domestiques, et particulièrement chez le cheval (Goodwin, 1998b). C'est la mesure rectale qui est prédominante, enseignée dans les écoles vétérinaires et la plus fréquemment utilisée sur le terrain. Le diagramme ci-dessous est issu d'un questionnaire préliminaire, réalisé dans le cadre de cette thèse. Il montre que sur 17 étudiants vétérinaires originaires de 4 écoles publiques vétérinaires françaises, 16 n'ont vu utiliser aucune autre méthode que la température rectale chez le cheval (Figure 6).

Figure 6 : Diagramme de répartition des différentes méthodes de prise de température chez le cheval vues ou réalisées par les étudiants vétérinaires

Quelle méthode utilisez-vous ou avez-vous vu utiliser pour prendre la température corporelle d'un cheval ?
17 réponses



Le coût moyen d'un thermomètre électronique digital est situé entre 10 et 20€, en faisant un outil peu onéreux et facilement accessible, pour les vétérinaires mais aussi pour les particuliers. Il existe des modèles de thermomètres adaptés aux grands animaux, avec une sonde de mesure plus longue, permettant de loger plus profondément le capteur au sein du site choisi, et de s'affranchir du milieu extérieur. Certains modèles ergonomiques sont aussi développés afin de s'adapter à la morphologie du cheval, mais ne seront pas étudiés dans cette thèse.

La prise de température par voie rectale chez les grands animaux se réalise au cours de l'examen clinique, ou lors de dépistage de maladies (voir 2.1.2). L'opérateur se positionne en sécurité à hauteur de la croupe de l'animal, soulève la queue d'une main et de l'autre, insère le thermomètre, de taille adaptée, dans le rectum du cheval. Chez les bovins, l'insertion du thermomètre jusqu'à la fenêtre de lecture semble afficher une meilleure corrélation avec un thermomètre à mercure de référence et donc une meilleure appréciation de la température centrale (Naylor *et al.*, 2012). En revanche, dans cette étude, l'angle d'insertion du thermomètre et le contact avec la muqueuse rectale ont un impact minimal sur la valeur de la température obtenue. Une autre étude précise que les thermomètres électroniques digitaux, bien que plus rapides que les thermomètres à mercure, fournissent une valeur de température souvent inférieure à ces derniers, et montrent une variance supérieure, ce qui peut conduire à d'avantage d'erreurs, notamment dans le cadre de détection massive (Hines *et al.*, 2015).

Outre ces observations, la prise de température rectale présente certaines limites chez les grands animaux, en particulier chez le cheval. En effet, la technique oblige l'opérateur à se placer dans une position parfois dangereuse, à proximité des membres postérieurs, l'exposant à un coup de pied en cas de réaction de l'animal, notamment chez les jeunes chevaux ou les animaux peu manipulés. Le thermomètre électronique, bien que peu invasif, est en contact direct avec l'animal, pouvant en faire un vecteur d'agents pathogènes. Enfin, la mesure peut prendre du temps à se stabiliser, ce qui n'est pas compatible avec des animaux peu coopératifs (Robinson *et al.*, 2008). De cette façon, une alternative à la mesure rectale se doit d'être une technique rapide, hygiénique et sécuritaire.

2.3.2 La température axillaire

Une alternative aux limites rencontrées avec la température rectale pourrait être la méthode axillaire. Chez les petits animaux de compagnie, plusieurs études ont été réalisées à ce sujet, principalement à des fins de trouver une alternative moins stressante pour les animaux, pouvant être utilisée en consultation. En effet, chez le chien, la température rectale semble être associée au plus de signaux de stress tels qu'une augmentation de la fréquence cardiaque, un léchage de babines, ou des tremblements, tandis que la température axillaire apparaît comme étant la moins traumatisante (Gomart *et al.*, 2014). Chez ces espèces, la mesure se réalise, comme en humaine, en plaçant le thermomètre à mi-chemin entre la partie crâniale et la partie caudale de la scapula, en remontant l'outil le plus dorsalement possible (Cichocki *et al.*, 2017).

Chez le chien, la corrélation entre la température rectale et la température axillaire mesurée par thermomètre électronique est discutée. La plupart des études met en évidence une corrélation modérée (Gomart *et al.*, 2014) à pauvre (Mathis et Campbell, 2015) entre celles-ci. Les auteurs, dans leur majorité, concluent que la mesure axillaire sous-estime la température rectale, et ne permet pas de la remplacer (Cichocki *et al.*, 2017; Kahng et Brundage, 2020; Zakari et Omontese, 2023). Néanmoins, elle paraît avoir une meilleure corrélation sur des chiens hyperthermiques (Mathis et Campbell, 2015). La température axillaire semble être corrélée avec la longueur des poils et le sexe de l'animal (Gomart *et al.*, 2014) mais ne serait pas impactée par le score d'état corporel, l'âge ou le statut reproductif (Cichocki *et al.*, 2017; Gomart *et al.*, 2014). En revanche le poids du chien pourrait avoir une influence (Cichocki *et al.*, 2017), ainsi que l'environnement dans lequel est maintenu l'animal (Mathis et Campbell, 2015).

Chez le chat, la température axillaire n'apparaît pas non plus comme un outil fiable pour remplacer la température rectale. Cependant, la différence entre température rectale et axillaire semble moins importante que chez le chien, probablement en raison de la peau plus fine des chats et de leur plus grand rapport surface/masse corporelle (Smith *et al.*, 2015).

Chez les grands animaux, aucune étude ne semble avoir été menée sur l'utilisation du thermomètre électronique digital en région axillaire. En revanche, une étude quant à l'application d'un TISCP dans cette région chez le cheval, montre des résultats décevants, avec des valeurs mesurées incompatibles avec son utilisation (Ramey *et al.*, 2011).

2.3.3 La température tympanique

La température tympanique par TIRT a aussi été expérimentée chez les Mammifères, afin de fournir une mesure rapide et non traumatisante de la température. Chez le chien, elle serait associée à un moindre stress que l'utilisation du thermomètre rectal (Gomart *et al.*, 2014).

Concernant les petits animaux de compagnie et particulièrement le chien, le conduit auriculaire présente une forme en L, tandis que celui de l'Homme montre une conformation linéaire. Les thermomètres utilisés en médecine humaine pourraient être de forme inadaptée, fournissant non pas des mesures de la membrane tympanique mais du conduit auditif ou des débris (Cichocki *et al.*, 2017). Des outils spécifiques ont donc été développés afin de s'émanciper de cette limite, avec des sondes plus finies, des manches plus longs et ainsi, une forme adaptée. Les études

comparant thermomètres auriculaires et thermomètres rectales concluent, pour la plupart, que le thermomètre auriculaire vétérinaire fournit, chez le chien, une alternative fiable pour remplacer le thermomètre rectal, lorsqu'il n'est pas possible de l'utiliser, en consultation vétérinaire, à l'exercice ou encore lors de réveil anesthésique, même si le patient est atteint d'une otite externe (Gomart *et al.*, 2014; González *et al.*, 2002; Hall et Carter, 2017a; Southward *et al.*, 2006). Néanmoins, celui-ci semble systématiquement fournir une valeur inférieure à la température rectale, pouvant conclure à un diagnostic erroné lors d'utilisation chez le patient hypertherme principalement (Cichocki *et al.*, 2017; Greer *et al.*, 2007). Ainsi, Hall et Carter définissent un intervalle de températures du chien normotherme à [36.8–38.8°C] (Hall et Carter, 2017b). Les valeurs obtenues par thermométrie auriculaire sont aussi dépendantes du signalement de l'animal et des conditions environnementales (Lukkanawaraporn *et al.*, 2022).

Chez les grands animaux, de rares études ont été menées quant à l'utilisation du thermomètre tympanique. Une étude de 1998 montre que la température tympanique fournit des valeurs moins élevées et surtout plus variables que la température rectale chez les chèvres, les moutons et les chevaux, dépendant probablement du placement de la sonde (Goodwin, 1998). Elle met aussi en évidence que la réalisation d'une moyenne de trois valeurs mesurées successivement avec un thermomètre tympanique ne permet pas une amélioration de la corrélation avec la température rectale chez le cheval. Cette étude conclut finalement que la température tympanique présente une mauvaise corrélation avec la température rectale et que l'absence d'un intervalle de valeurs de référence établi ne permet pas de la considérer comme une alternative à la température rectale. De plus, de nombreux animaux se montrent intolérants à l'outil de mesure, constat aussi réalisé par Carter *et al.*, 2019. Une autre étude plus récente confirme que le thermomètre tympanique ne fournit pas des valeurs fiables en comparaison avec le thermomètre rectal, ne permettant pas de supplanter ce dernier (Giannetto *et al.*, 2022b).

2.3.4 La thermométrie infrarouge sans-contact portable

2.3.4.1 Les différents sites corporels étudiés

En médecine vétérinaire, de nombreuses études ont été menées afin d'évaluer la corrélation entre la température de différentes régions corporelles mesurée par TISCP, et la température centrale.

Chez le chat, une étude de 2022 comparant la température de 5 sites (sillon jugulaire, épaule, flanc, intérieur de la cuisse et côtes) mesurée avec 3 TISCP différents montre une faible corrélation entre les mesures infrarouges et la température rectale, mais surtout une mauvaise reproductibilité, empêchant l'établissement de valeurs cutanées de référence (Giannetto *et al.*, 2022a). Une étude en canine a quant à elle comparé les mesures infrarouges de plusieurs sites (doigt, museau, aisselle, œil, gencive, région inguinale et berges anales), et a montré que la région gingivale constitue une alternative potentielle convaincante, grâce une différence avec la température rectale inférieure à 1°C, une réduction du stress et une bonne détection des animaux hyperthermes. L'étude a cependant établi qu'un calibrage du thermomètre, une acclimatation de l'animal et un contrôle des facteurs environnementaux étaient probablement nécessaires (Cugmas *et al.*, 2020).

Chez les grands animaux, la relation entre température cutanée infrarouge et température de référence est toujours étudiée, dans un même objectif de faciliter les manipulations des animaux

et de limiter la contention. En 2011, Ramey et al. montrent que la mesure de la température au niveau de la ligne de jonction mucogingivale prémaxillaire avec un TISCP ne fournit pas de valeurs fiables de la température corporelle chez le cheval (Ramey *et al.*, 2011). Cependant, l'instrument semble capable de détecter une augmentation de la température et ainsi, de constituer un outil utile chez les chevaux réfractaires à la mesure de température rectale. Les auteurs considèrent cependant que l'utilisation de l'outil dans des zones poilues n'est pas intéressante, car les poils forment une couche isolante empêchant la détection du rayonnement émis. Ils montrent aussi que la consommation d'eau préalable par les animaux abaisse la température mesurée par TISCP dans cette zone. Une étude de 2019 réalisée sur 80 chevaux, 80 bovins et 80 chameaux a montré une faible corrélation entre température rectale et température infrarouge mesurée au niveau de deux sites, frontal et temporal, ne les rendant pas interchangeables (Muhammed *et al.*, 2019). Finalement, en 2023, Easterwood et Cohen publient une étude sur la comparaison des mesures infrarouges établies avec un TISCP au niveau de l'encolure et en région frontale, avec la température rectale (Easterwood et Cohen, 2023). Ils concluent que bien que les mesures obtenues aient une bonne répétabilité, le biais entre la température mesurée et la température rectale est trop élevé et incohérent pour permettre à l'outil de se substituer au thermomètre rectal, chez des chevaux et poulains sains. Ainsi, des recherches supplémentaires quant à l'utilisation des TISCP sont nécessaires, afin d'évaluer ces outils dans d'autres régions mais aussi de les tester chez animaux hypo ou hyperthermes.

2.3.4.2 Température oculaire

En médecine humaine et vétérinaire, des études ont montré que la température cornéenne aurait une relation avec la température centrale (Kessel *et al.*, 2010; Rysä et Sarvaranta, 2009). Chez le rat, la température cornéenne montrerait une relation linéaire avec la température centrale, avec en moyenne des valeurs de 2°C inférieures à celle-ci, et pourrait s'exprimer par la relation suivante : $\text{Température}_{\text{cornée}} = 1,15 \times \text{Température}_{\text{tympañ}} - 6,50$. Chez l'Homme en revanche, cette température serait plafonnée à une température maximale qui n'augmenterait pas d'avantage malgré une augmentation supplémentaire de la température centrale (Kessel *et al.*, 2010). Les études montrent que la température cornéenne serait aussi influencée par différents éléments environnementaux tels que la température ou le moment de la journée, par la production de larmes, par des modifications hémodynamiques de l'œil ou encore par l'âge (Kessel *et al.*, 2010; Koçak *et al.*, 1999; Mapstone, 1968a, 1968b; Morgan *et al.*, 1999; Rysä et Sarvaranta, 2009). En humaine, il a été montré que sa mesure par thermomètre infrarouge sans contact était hautement reproductible (Koçak *et al.*, 1999). Cependant, la mesure de la température oculaire n'est, à ce jour, pas utilisée pour évaluer la température centrale chez l'Homme, mais est plutôt considérée comme un outil prometteur dans le dépistage de maladies, oculaires ou systémiques (Cohen *et al.*, 2021; Morgan *et al.*, 1999).

En médecine vétérinaire, la thermographie infrarouge a permis d'étudier la température de l'œil. Cette technique, repose sur la mesure, grâce à une caméra spécialisée, de la radiation thermique produite par une surface, et forme une image où chaque plage de température est représentée par une couleur (Johnson *et al.*, 2011). Chez les animaux de compagnie, des études ont montré que la température oculaire mesurée par cette méthode était corrélée à la température rectale de référence (Giannetto *et al.*, 2021; Yanmaz *et al.*, 2015). Chez le chat, la température oculaire serait de 1,2°C inférieure à la température rectale (Giannetto *et al.*, 2021). Chez les grands

animaux, certains auteurs ont conclu que la température oculaire n'était pas significativement différente de la température centrale (Dunbar *et al.*, 2009) bien que d'autres ne retrouvent pas de corrélation entre température rectale de référence et température oculaire (Jansson *et al.*, 2021). Son évaluation présenterait néanmoins un intérêt dans la détection précoce de maladies telle que la bronchopneumonie infectieuse enzootique chez les bovins (Schaefer *et al.*, 2007), ou encore dans l'évaluation du comportement, en particulier du stress (Arfuso *et al.*, 2022; Valera *et al.*, 2012). Johnson *et al.* s'accordent à dire que la thermographie infrarouge oculaire pourrait être considérée comme un premier outil de dépistage de l'hyperthermie chez le poney, mais la température obtenue nécessiterait une réévaluation par un outil de référence lorsqu'elle excéderait une valeur limite définie (Johnson *et al.*, 2011). Par ailleurs, en diminuant à 38°C le seuil de détection de l'hyperthermie, par rapport à une valeur initiale de 38,6°C établie pour la température rectale, la sensibilité serait augmentée, mais pas la spécificité. Ils ont aussi montré qu'en conservant uniquement la valeur maximale de température obtenue dans l'œil après multiples prises, la sensibilité était augmentée. Enfin, d'autres études ont montré que de nombreux éléments pouvaient influencer la température oculaire mesurée par thermographie infrarouge, tels des facteurs environnementaux chez les bovins et chez les chevaux, ou encore des facteurs endogènes (race et sexe), mis en évidence chez les chevaux (Church *et al.*, 2014).

Des recherches ont été menées sur l'utilisation des thermomètres infrarouges sans-contact en région oculaire. Une étude sur 300 chiens a conclu que le TISCP utilisé en région oculaire n'était pas un outil fiable dans la détection des anomalies de température, et que la température ainsi mesurée n'était que faiblement corrélée avec la température rectale (Kreissl et Neiger, 2015). Aussi, des outils ont été spécialement conçus pour un usage vétérinaire (Carter *et al.*, 2019). Dans cette étude de Carter *et al.*, sur les deux TISCP spécifiques, utilisés sur 22 chevaux, seul l'un d'entre eux fournissait des valeurs en accord avec la température rectale chez des chevaux normothermes, en particulier lorsqu'il était utilisé au niveau du canthus médial, par rapport au canthus latéral et l'orbite. L'étude ne pouvait cependant pas conclure quant aux chevaux hypothermes et hyperthermes. Aussi, l'étude montre que le positionnement de l'outil exerce une influence majeure sur les résultats obtenus. Ainsi, peu de données sont à ce jour disponibles quant à l'utilisation d'un TISCP en région oculaire, en particulier chez le cheval.

2.3.5 La lecture par transpondeur à micropuce

Cette méthode de mesure consiste en une implantation sous-cutanée d'un transpondeur à micropuce permettant par la suite une lecture simple, rapide et non invasive de la température par passage d'un lecteur le long de la peau. L'implantation se fait par une injection unique à l'aide d'une aiguille de large diamètre adaptée, et se montre brève et peu douloureuse (Goodwin, 1998). Une première étude réalisée en 1998 par implantation d'un transpondeur sous-cutanée en arrière du coude montre que la température obtenue était significativement inférieure à la température rectale, et d'avantage variable. Ainsi, l'absence d'un intervalle de référence connu pour la mesure par transpondeur à micropuce ne permettait pas de faire de cette méthode un outil valable de substitution de la température rectale (Goodwin, 1998a). Des études plus récentes sur des capteurs placés dans l'encolure montrent que la température ambiante pourrait avoir un impact important sur la mesure obtenue par ce type de capteur, en faisant des outils plus sensibles lorsque la température ambiante serait supérieure à 15,6°C (Auclair-Ronzaud *et al.*, 2020; Robinson *et al.*, 2008). Ainsi, la corrélation de la température rectale avec la température mesurée par la micropuce pourrait aussi

dépendre de la localisation de cette dernière sur l'animal (Kang *et al.*, 2022b). Finalement, les études récentes semblent conclure à des outils prometteurs pour remplacer la prise de mesure rectale, en particulier au cours d'un effort intense ou lors de la récupération post-exercice de l'animal (Kang *et al.*, 2022a).

2.4 Bilan des connaissances concernant les différentes méthodes de mesure de la température dans la littérature

Le Tableau 3 fait le bilan des connaissances actuelles, issues de la littérature et détaillées précédemment.

Tableau 3 : Résumé des conclusions extraites de la littérature concernant les différentes méthodes non invasives alternatives à la température rectale testées chez différentes espèces (liste non exhaustive)

Outil utilisé	Site de mesure	Espèce	Références des études	Résultats et limites
Thermomètre électronique	Axillaire	Homme	Pecoraro <i>et al.</i> , 2021 Falzon <i>et al.</i> , 2007 Miyahara <i>et al.</i> , 1997 Sermet-Gaudelus <i>et al.</i> , 2005 Miyahara <i>et al.</i> , 1997 Sermet-Gaudelus <i>et al.</i> , 2005	Inférieure à la température rectale Augmentation de la variation avec augmentation de la température corporelle Influence de facteurs intrinsèques (état corporel du patient) et extrinsèques (température extérieure) Instrument laissé insuffisamment longtemps en place
		Chien	Gomart <i>et al.</i> , 2014 Mathis et Campbell, 2015 Cichocki <i>et al.</i> , 2017 Kahng et Brundage, 2020 Zakari et Omontese, 2023 Mathis et Campbell, 2015 Gomart <i>et al.</i> , 2014 Cichocki <i>et al.</i> , 2017 Mathis et Campbell, 2015	Corrélation modérée avec la température rectale Corrélation pauvre avec la température rectale Sous-estimation de la température rectale, non fiable Meilleure corrélation lors d'hyperthermie Influence de la longueur de poils et du sexe, ajout entre 0,6 et 1°C à la température mesurée pour obtenir une température rectale selon le pelage Pas d'influence ni du poids ni de l'environnement

		Chien Chat	Goic <i>et al.</i> , 2014	Corrélation avec la température rectale mais gradient de température trop important pour être fiable
		Chat	Smith <i>et al.</i> , 2015	Sous-estimation moindre que chez le chien mais non fiable
		Grands animaux	Absence d'étude disponible	
	Oral	Homme	Latman, 2003 Moran et Mendal, 2002 Tandberg et Sklar, 1983 Moran et Mendal, 2002	Moins fiable qu'avec un thermomètre à mercure Sensible aux variations aiguës du débit sanguin Influence de l'ingestion de boisson ou d'aliments, de la respiration, de l'ouverture de la bouche
		Animal	Pas d'étude disponible, potentiellement lié à la difficulté de mise en pratique chez l'animal	
Thermomètre infrarouge sans-contact	Tympan	Homme	Amoateng-Adjepong <i>et al.</i> , 1999 Van Staaij <i>et al.</i> , 2003 Mogensen <i>et al.</i> , 2018 Van Staaij <i>et al.</i> , 2003 Rabinowitz <i>et al.</i> , 1996	Bonne corrélation avec la température centrale, diminuée lors d'utilisation par des non-experts Bonne corrélation avec la température rectale, notamment chez l'enfant Utile pour du dépistage chez les jeunes enfants mais valeur exacte incorrecte Désaccord quant à l'implication du cérumen
		Chien	Gomart <i>et al.</i> , 2014 Cichocki <i>et al.</i> , 2017 Gomart <i>et al.</i> , 2014 González <i>et al.</i> , 2002 Hall et Carter, 2017a Southward <i>et al.</i> , 2006 Cichocki <i>et al.</i> , 2017	Moins stressante que la température rectale Mauvais résultats avec outils d'humain dû à la forme du conduit Outil spécifique pour chien fournit une alternative fiable lors d'impossibilité à utiliser un thermomètre rectal (en consultation, à l'effort, en réveil d'anesthésie) Température systématiquement inférieure à la température rectale

			Greer <i>et al.</i> , 2007 Hall et Carter, 2017b Lukkanawaraporn <i>et al.</i> , 2022)	Intervalle de température du chien normotherme : [36.8–38.8°C] Influence du signalement et des conditions environnementales
		Cheval Chèvre Mouton	Goodwin, 1998	Valeurs inférieures et plus variables par rapport à la température rectale Mauvaise corrélation avec la température rectale Intolérance de certains individus
		Cheval	Goodwin, 1998	Pas d'amélioration de la corrélation en faisant la moyenne de trois valeurs prises successivement
	<i>Frontal</i> <i>Temporal</i>	Homme	Canadian Agency for Drugs and Technologies in Health, 2014 Sullivan <i>et al.</i> , 2021 Kameda, 2022	<p>Selon l'étude :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Différence de 0,029°C ± 0.01°C ou de - 0.02 ± 0.277°C selon le modèle avec la température rectale - Différence de 0,66°C avec la température mesurée par sonde nasopharyngée <p>Erreur de mesure supérieure aux préconisations du fabricant, allant de -3°C à 2°C au maximum selon le modèle de TISCP, et dépendante de la température réelle du patient</p> <p>Influence des facteurs environnementaux modifiant la température de surface cutanée et la présence de sueur</p> <p>Excellente corrélation avec la température centrale mesurée par capteur cutanée au sortir de chirurgie abdominale</p>
		Cheval Bovin Chameau	Muhammed <i>et al.</i> , 2019	Faible corrélation avec la température rectale (frontale et temporale)
		Cheval	Easterwood et Cohen, 2023	Bonne répétabilité mais biais trop important et irrégulier avec la température rectale chez chevaux et poulains sains
		<i>Encolure</i>		

	<i>Jonction mucogingivale prémaxillaire</i>		Ramey <i>et al.</i> , 2011	Mauvaise corrélation avec la température corporelle mais détection d'une augmentation de température Influence de la consommation d'eau
	<i>Jugulaire Épaule Flanc Intérieur de la cuisse Côtes</i>	Chat	Giannetto <i>et al.</i> , 2022a	Faible corrélation entre température mesurée avec 3 TISCP différents et température rectale Mauvaise reproductibilité Impossibilité d'établir un intervalle de valeurs de référence
	<i>Doigt Museau Aisselle Gencive Région inguinale Berges anales</i>	Chien	Cugmas <i>et al.</i> , 2020	Valeurs de température obtenues toujours inférieures à la température rectale : jusqu'à 4,32°C de différence avec la température axillaire Corrélation modérée avec la température inguinale et la température de la gencive mais seule la gencive permet une détection de l'hyperthermie avec de bonnes sensibilité et spécificité
	<i>Oculaire</i>	Chien	Kreissl et Neiger, 2015 Cugmas <i>et al.</i> , 2020	Température faiblement corrélée à la température rectale 3,41 à 6,30°C de différence avec la température rectale (en visant la pupille)
Cheval		Carter <i>et al.</i> , 2019	Sur 2 TISCP développés pour usage vétérinaire, un seul fournissait des valeurs en accord avec la température rectale chez normothermes, surtout au niveau du canthus médial de l'œil Influence de la distance œil-capteur	
Lecture par transpondeur à micropuce		Cheval	Goodwin, 1998b	Pas d'intervalle de référence connue Influence des paramètres environnementaux et la localisation de la puce

Ce tableau met en évidence le peu de données disponibles chez le cheval. Or, nous avons précédemment souligné les contraintes imposées par la prise de température rectale, et l'intérêt de trouver des méthodes de mesure alternatives sécuritaires, rapides, fiables et bien tolérées par l'animal.

En ce qui concerne la température axillaire, aucune étude publiée chez le cheval à ce propos n'a été trouvée lors de la réalisation de cette thèse. Chez l'Homme et les petits animaux de compagnie cependant, les résultats fournis par cette méthode sont peu convaincants, en particulier du fait d'une sous-estimation systématique et inconstante de la température rectale. Nous avons alors cherché à savoir si les résultats étaient identiques chez le cheval, ou si celle-ci pouvait à l'inverse, fournir une méthode alternative intéressante à la température rectale. L'objectif était aussi de voir si différents facteurs extrinsèques montraient des associations statistiques significatives avec les températures mesurées par méthode axillaire, comme chez d'autres espèces déjà étudiées.

À propos de l'utilisation de thermomètres infrarouges sans contact portable (hors tympan), là aussi peu de données sont disponibles. Bien que fournissant des résultats discutés chez l'Homme, la température frontale semble peu fiable chez le cheval dans les deux études trouvées à ce sujet. L'encolure aussi testée fournit aussi des résultats décevants. La gencive (cheval et chien) et la région inguinale (chien) montrent des résultats mitigés mais plus encourageants, avec des corrélations modérées avec la température rectale et/ou une détection convenable des animaux hyperthermes. Ramey *et al.*, 2011 considérait par ailleurs les sites avec poils non intéressants pour l'utilisation des TISCP. En se basant sur ces observations, nous avons choisi de tester, chez le cheval, un site dépourvu de poils et facile d'accès pour l'utilisateur : le bout du nez. Le but étant ici aussi de trouver une éventuelle corrélation avec la température rectale, et, le cas échéant, d'observer l'influence de différents paramètres.

Aussi, plusieurs études mettent en évidence une relation entre la température oculaire et la température centrale chez différentes espèces. Néanmoins, peu d'études ont été menées concernant l'utilisation de TISCP dans cette région. Parmi celles-ci, une seule a été réalisée chez le cheval, utilisant deux TISCP à usage spécifique vétérinaire. Les résultats étaient concluants pour un seul des deux outils, en particulier dans la région du canthus (médial puis latéral) par rapport au globe, avec une bonne tolérance des animaux. Ainsi, nous avons souhaité tester d'autres TISCP du commerce (usage humain) dans les régions du canthus médial et de la cornée. L'objectif est de confirmer, ou non, la possibilité de les utiliser dans ces régions, comme méthode alternative à la température rectale, ainsi que de tester l'influence de facteurs environnementaux.

Finalement, la difficulté d'accès aux régions orale et tympanique chez le cheval et ainsi d'une mise en œuvre optimale des méthodes nous a conduit à les délaisser dans la suite de cette étude. Elles ne semblent pas fournir de méthodes alternatives intéressantes chez le cheval.

Deuxième partie : Protocole de validation statistique de quatre méthodes de mesure non invasives alternatives à la mesure rectale

1 Objectifs de l'étude

La température rectale demeure, à ce jour, le « gold standard » pour l'évaluation de la température corporelle chez le cheval. Cependant, les limites qu'elle présente, en particulier le risque physique pour l'opérateur, motivent la recherche de méthodes de mesure plus sécuritaires, faciles à réaliser, rapides et hygiéniques.

En médecine humaine, la température axillaire par thermomètre électronique digital constitue une méthode pratique mais peu fiable d'évaluation de la température corporelle, et d'autant plus soumise aux conditions extérieures (Falzon *et al.*, 2007; Moran et Mendal, 2002; Pecoraro *et al.*, 2021). Chez les petits animaux, elle semble fournir des résultats peu probants, avec des valeurs mesurées systématiquement inférieures à la mesure rectale, influencées par différents paramètres tels que longueur des poils, sexe de l'animal (Gomart *et al.*, 2014), poids (Cichocki *et al.*, 2017) et environnement dans lequel est maintenu l'animal (Mathis et Campbell, 2015). Chez le cheval, il n'y a, à notre connaissance, aucune étude menée sur l'utilisation du thermomètre électronique en région axillaire.

La thermométrie infrarouge sans contact a été largement étudiée chez l'Homme. En particulier, le thermomètre infrarouge auriculaire semble fournir une alternative fiable, pratique et rapide, lorsqu'il est correctement utilisé (Amoateng-Adjepong *et al.*, 1999; Van Staij *et al.*, 2003). Chez les petits animaux, cela a mené au développement d'outils spécifiques, avec des formes adaptées à leurs conduits auditifs (Cichocki *et al.*, 2017; Greer *et al.*, 2007). Chez le cheval, elle ne fournit pas une méthode alternative convenable, tant dans les valeurs obtenues que dans sa praticité, avec un nombre élevé d'animaux se montrant intolérants à son utilisation (Goodwin, 1998a). En région frontale et/ou temporale, les résultats des études divergent et les auteurs ne semblent pas unanimes quant à son utilisation chez l'Homme (Canadian Agency for Drugs and Technologies in Health, 2014). Chez les petits animaux, la plupart des différents sites de mesure testés ne fournissent pas d'alternative fiable en comparaison avec les méthodes de référence (Cugmas *et al.*, 2020; Giannetto *et al.*, 2022a), hormis la mesure en région gingivale qui semble présenter une corrélation moyenne avec la mesure de référence (Cugmas *et al.*, 2020). Chez le cheval, les mesures en région temporale (Muhammed *et al.*, 2019) et frontale (Easterwood et Cohen, 2023; Muhammed *et al.*, 2019) semblent être peu fiables tout comme celles en régions mucogingivale et axillaire (Ramey *et al.*, 2011), ou encore au niveau de la peau de l'encolure (Easterwood et Cohen, 2023). Enfin, alors que certains mettent en évidence une relation entre température rectale de référence et température oculaire (Giannetto *et al.*, 2021; Yanmaz *et al.*, 2015), de rares études quant à l'utilisation de thermomètres infrarouges sans contact portables dans

la région ont été menées. Chez le cheval, la seule étude existant à notre connaissance utilisait deux thermomètres spécifiquement développés pour les animaux, et montrait des résultats prometteurs pour l'un d'eux (Carter *et al.*, 2019).

Face à ce manque d'informations, l'objectif de notre étude est de comparer différentes méthodes non invasives de mesure de la température à la méthode rectale, afin de savoir si celles-ci pourraient constituer une alternative à cette méthode de référence. Pour ce faire, nous allons évaluer la répétabilité, la reproductibilité inter-opérateurs et la concordance avec la température rectale des quatre méthodes de mesure suivante : température axillaire mesurée avec un thermomètre électronique (TA), température du bout du nez (TN), température du canthus médial (TCa) et température cornéenne (TCo), ces trois dernières évaluées avec un thermomètre infrarouge sans contact portable. Aussi, nous étudierons la praticité de ces méthodes en comparaison avec la méthode rectale. Enfin, nous évaluerons la capacité de ces outils à détecter les animaux hyperthermes, ainsi que l'association entre différents paramètres et les mesures obtenues.

2 Validation d'une méthode de mesure : définitions

Une méthode de mesure, quelle que soit sa nature, doit, avant d'être utilisée, respecter des critères de validation (Desquilbet, 2019). Parmi ces critères, on retrouve notamment la répétabilité et la reproductibilité. De plus, si la nouvelle méthode de mesure a pour objectif de remplacer une méthode de mesure de référence, il faut aussi assurer la concordance des valeurs fournies par la nouvelle méthode avec les valeurs obtenues par méthode de référence.

2.1 Définition préliminaire : fidélité de mesure

Dans le document « Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM) » (Joint Committee for Guides in Metrology, 2008), la **fidélité** de mesure est définie comme « l'étroitesse de l'accord entre les indications ou les valeurs mesurées obtenues par des mesurages répétés du même objet ou d'objets similaires dans des conditions spécifiées. »

2.2 Répétabilité et reproductibilité inter-opérateurs de la méthode de mesure

Dans le document de Desquilbet (2019), on retrouve une définition de la répétabilité et de la reproductibilité issue du document « VIM » (Joint Committee for Guides in Metrology, 2008).

La **répétabilité** y est définie comme la fidélité de mesure selon un ensemble de conditions de mesure comprenant la même procédure de mesure, les mêmes opérateurs, le même système de mesure, les mêmes conditions de fonctionnement et le même lieu, ainsi que des mesurages répétés sur le même objet ou des objets similaires pendant une courte période.

L'évaluation de la répétabilité de la méthode de mesure se fait par comparaison de deux séries de mesure, réalisées par le même opérateur, avec une même méthode de mesure, dans des

conditions de mesures quasiment identiques, comprenant un intervalle de temps entre les mesures jugé a priori comme négligeable (Barnhart *et al.*, 2007).

La **reproductibilité** y est définie comme la fidélité de mesure selon un ensemble de conditions de mesures qui comprennent des lieux, des opérateurs et des systèmes de mesure différents, ainsi que des mesurages répétés sur le même objet ou des objets similaires.

Dans notre étude, nous cherchons à évaluer la reproductibilité inter-opérateurs. L'évaluation se fait par comparaison de deux séries de mesure réalisées par deux opérateurs différents, avec une même méthode de mesure, dans des conditions de mesure quasiment identiques (Desquilbet, 2019). La reproductibilité spatio-temporelle ne fera pas l'objet de cette thèse.

2.3 Concordance de la méthode de mesure

Si deux méthodes de mesure, mesurant la même chose, dans les mêmes conditions, fournissent les mêmes résultats pour le caractère mesuré, alors les deux méthodes sont considérées comme **concordantes** (Desquilbet, 2019). Dans notre étude, pour limiter les biais, la concordance sera évaluée par un même opérateur, dans des conditions identiques. La méthode de mesure à tester sera alors comparée à une méthode de référence.

3 Matériels et méthodes

3.1 Choix des sujets

3.1.1 Critères d'inclusion

Ont été inclus dans notre étude tout cheval, toutes races confondues, mâle ou femelle, dont l'âge était supérieur ou égal à un an et la taille strictement supérieure à 130 cm, ne présentant pas d'atteinte rectale, oculaire, palpébrale, axillaire ou localisée au bout du nez connue, et séjournant à la Clinique Équine de l'École Nationale Vétérinaire d'Alfort (ENVA), entre mars 2022 et septembre 2023.

Le seuil de 130 cm a été choisi afin d'homogénéiser la population et de ne pas introduire un biais trop important lié à la taille de l'animal. La valeur de 130 cm a été choisie en se basant sur l'indexation de l'IFCE : ainsi, ont été inclus les poneys de catégories C et D (Crichan, 2020).

3.1.2 Critères de non-inclusion

Tout cheval d'âge inférieur à un an ou de taille inférieure à 130 cm (poney de catégorie A et B) n'a pas été inclus dans l'étude.

Tout cheval présentant une atteinte oculaire (uvéite, ulcère, cataracte *etc.*), palpébrale (plaie, masse de tout type *etc.*), axillaire (plaie, masse, lésions dermatologiques *etc.*), rectale (mélanome, plaie *etc.*) ou du bout du nez (lésions dermatologiques, *etc.*) n'était pas non plus inclus dans l'étude.

3.1.3 Critère d'exclusion

Pour des raisons éthiques, les chevaux jugés par l'opérateur comme très inconfortables ou étant en décubitus constant n'ont pas été inclus dans l'étude. Pour des raisons sanitaires, les chevaux logés en box contagieux n'ont pas non plus été inclus dans l'étude.

3.1.4 Choix du nombre d'animaux à recruter

La méthode de détermination de la taille de l'échantillon est issue du travail de Walter *et al.*, 1998. Notre étude repose sur le calcul du coefficient de concordance (CCC) de Lin, dont la méthode sera détaillée à postériori.

Nous avons cherché à déterminer le nombre de sujets sur lesquels réaliser les séries de mesure permettant de montrer que la valeur du CCC de Lin réelle était supérieure à une valeur de CCC de Lin minimale, pour une étude à puissance donnée (Desquilbet, 2019). Ainsi, il a fallu déterminer, d'après Desquilbet, 2019 :

- Le CCC Lin mini (CCC0) = « valeur du CCC de Lin minimale dont on souhaite montrer de façon statistique que la valeur réelle de Lin est supérieure à cette valeur minimale » ;
- Le CCC Lin attendu (CCC1) : « valeur du CCC de Lin que l'on s'attend à observer dans l'étude qui va être mise en place » ;
- La puissance statistique souhaitée, en général entre 0,80 et 0,90.

Tableau 4 : Interprétation de la valeur du coefficient de concordance de Lin, tableaux issus du fichier Excel® "Concordance quantitative (Bland et Altman et CC Lin) v3.30" fourni avec le document de L. Desquilbet (2019)

<i>Partik, 2002</i>		<i>Landis and Koch, 1977</i>	
< 0.50	Inacceptable	< 0	Très mauvais (Poor)
0.51-0.60	Mauvais (Poor)	0-0.20	Mauvais (Slight)
0.61-0.70	Passable (Mediocre)	0.21-0.40	Passable (Fair)
0.71-0.80	Moyennement satisfaisant	0.41-0.60	Moyenne (Moderate)
0.81-0.90	Plutôt bon (fairly good)	0.61-0.80	Bonne (Substantial)
0.91-0.95	Très bonne (very good)	0.81-1.00	Très bonne (Almost perfect)
> 0.95	Excellente		

Les recommandations du document de Desquilbet, 2019 et les tableaux d'interprétation du CCC de Lin (Tableau 4) nous ont mené à fixer le CCC0 à 0,60 et la puissance à 0,80. Concernant le CCC1, une valeur de 0,80 nous a paru acceptable. Le fichier Excel® "Concordance quantitative (Bland et Altman et CC Lin) v3.30" fourni par Loïc Desquilbet nous a permis de calculer la taille de l'échantillon à inclure (Tableau 5) :

Tableau 5 : Calcul de la taille de l'échantillon à inclure d'après le fichier Excel® "Concordance quantitative (Bland et Altman et CC Lin) v3.30" (Desquilbet, 2019)

CCC Lin mini (CCC0)	0,60
CCC Lin attendu (CCC1)	0,80
Puissance	0,80
Taille échantillon	39

Au total, 52 chevaux ont été inclus dans notre étude. Pour l'évaluation de la répétabilité et de la concordance des méthodes axillaire et infrarouges réalisées avec le TISCP ANKOVO®, 40 individus ont été mesurés. Pour la reproductibilité de ces méthodes, seuls 13 individus ont pu être inclus pour des questions techniques. Nous avons aussi souhaité comparer les valeurs obtenues par deux TISCP® différents (ANKOVO® et iHealth®). Pour ce faire, nous avons évalué la concordance entre les deux séries de mesure réalisées sur 15 chevaux.

L'objectif initial était d'inclure des chevaux normothermes et hyperthermes ($T \geq 38,5^{\circ}\text{C}$) dans notre étude. Cependant, l'effectif de chevaux présents à la Clinique Équine de l'ENVA, la non-présence constante des opérateurs sur le site de l'ENVA, la non-inclusion des chevaux en isolement ainsi que le statut de clinique de référés de la Clinique Équine de l'ENVA ne nous ont permis d'inclure que cinq individus hyperthermes.

3.2 Description des outils

3.2.1 Thermomètre électronique

Le thermomètre électronique utilisé dans cette étude était un modèle vendu pour usage vétérinaire, optimisé pour les grands animaux. Le modèle est le SC 1080 de la marque Scala. Sa plage de température évaluable s'étend de 32°C à $43,9^{\circ}\text{C}$. En dehors de cette fourchette, le thermomètre affiche un message d'erreur. La précision décrite par le fabricant est de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ pour des températures comprises entre $35,5^{\circ}\text{C}$ et 42°C . Le résultat s'affiche en 15 à 25 secondes, avec mémoire de la dernière prise de température. L'outil doit être conservé entre 0 et 50°C et est résistant aux projections d'eau.

Dans notre étude, il a été utilisé pour mesurer la température axillaire (TA) et la température rectale (TR).

3.2.2 Thermomètres infrarouges sans-contact

3.2.2.1 ANKOVO®

Le premier thermomètre infrarouge sans-contact portable utilisé pour nos mesures était le modèle HTD8813 de la marque ANKOVO, thermomètre du commerce destiné à mesurer la température frontale chez l'Homme. Il possède deux modes : le mode "body", utilisé dans notre étude, permettant de mesurer la température infrarouge frontale de l'Homme et le mode "surface" évaluant la température de surface d'objets, de liquides ou d'aliments par exemple. La plage de température corporelle mesurable est comprise entre 34 et 43°C avec une précision de $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ entre 34 et

34,9°C et entre 42,1 et 43°C, et de +/- 0,2°C entre 35 et 42°C. Sa vitesse de prise de mesure est de 2 secondes. La mesure doit être réalisée avec le capteur situé entre 1 et 5 cm de la zone d'intérêt. Différents paramètres sont à prendre en compte lors de l'utilisation du thermomètre : il n'est pas résistant à l'eau et fonctionne pour une température ambiante comprise entre 15 et 40°C, une humidité relative $\leq 85\%$ et une pression atmosphérique comprise entre 70 et 106 kPa. L'outil doit préalablement avoir été acclimaté à la température ambiante pendant 30 minutes en cas d'importants changements de température ambiante. Enfin, le fabricant indique qu'il doit être stocké à l'abri de l'humidité, entre -20 et 55°C. L'outil affiche une couleur différente selon si la température est strictement inférieure à 37,4°C, comprise entre 37,4°C inclus et 38°C inclus, ou strictement supérieure à 38°C.

Ce thermomètre a été utilisé pour mesurer la température entre les naseaux (TN1), la température du cantus médial de l'œil (TCa1) et la température de la cornée (TCo1).

3.2.2.2 *iHealth*®

Le second thermomètre infrarouge sans-contact portable utilisé pour nos mesures était le modèle PT2L de la marque *iHealth*®, thermomètre du commerce destiné à mesurer la température frontale chez l'Homme. Il est constitué d'un mode unique. La plage de température mesurable est de 34°C à 43°C avec une précision de $\pm 0,2^\circ\text{C}$ entre 35,0°C et 42°C. La mesure doit être réalisée avec le capteur à moins de 3 cm de la zone d'intérêt. Il fonctionne pour une température ambiante comprise entre 15 et 40°C et une humidité relative $\leq 95\%$. L'outil doit préalablement avoir été acclimaté à la température ambiante pendant 30 minutes en cas d'importants changements de température ambiante. Enfin, il doit être stocké à l'abri de l'humidité, entre -25 et 55°C. L'outil affiche une couleur différente selon si la température est strictement inférieure à 37,5°C, comprise entre 37,5°C inclus et 38°C non inclus, ou supérieure ou égale à 38°C. La notice conseille :

- D'utiliser l'outil sur une surface (front dans la notice) sans sueur, sans produit « cosmétique » ;
- De ne pas manger, boire ou exercer une activité physique avant de prendre la température, sinon d'attendre 30 minutes ;
- De ne pas utiliser l'outil sur une plaie ou du tissu cicatriciel ;
- Que l'individu ne soit pas tourné vers le soleil ou une sortie d'air (chauffage, climatisation...);
- De ne pas prendre de mesure dans un environnement soumis à de fortes interférences électromagnétiques.

Ce thermomètre a été utilisé pour mesurer la température entre les naseaux (TN2), la température du cantus médial de l'œil (TCa2) et la température de la cornée (TCo2).

3.3 Protocole de mesure

3.3.1 Sites de mesure

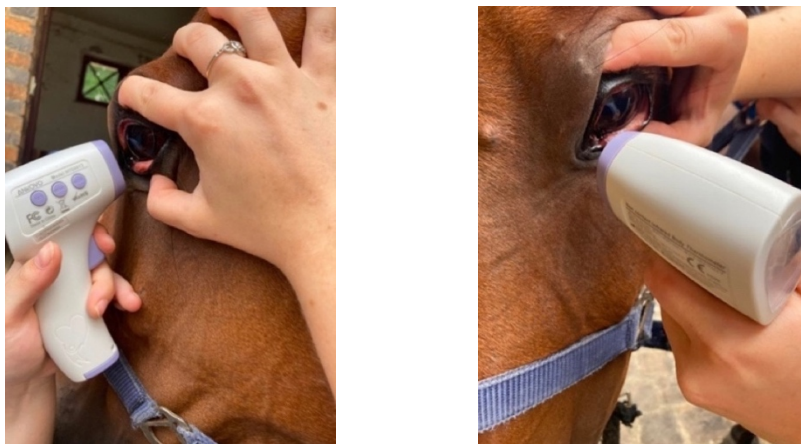
Les figures suivantes présentent le positionnement du TISCP pour les différents sites de mesure. Les démonstrations ont été réalisées avec le TISCP ANKOVO®, le positionnement étant identique avec le TISCP iHealth®.

Figure 7 : Positionnement du thermomètre infrarouge sans-contact pour la mesure au bout du nez avec le thermomètre ANKOVO®



Pour la mesure du bout du nez, le capteur du TISCP était placé à une distance approximative de 1 à 3 cm entre les naseaux, au milieu de la ligne rejoignant les commissures ventrales des deux naseaux.

Figure 8 : Positionnement du thermomètre infrarouge sans-contact pour la mesure au canthus médial de l'œil avec le thermomètre ANKOVO®



Pour la mesure du canthus médial, le capteur du TISCP était placé à une distance approximative de 1 à 3 cm du canthus médial de l'œil gauche, l'opérateur maintenant l'œil ouvert avec son autre main.

Figure 9 : Positionnement du thermomètre infrarouge sans-contact pour la mesure au niveau de la cornée avec le thermomètre ANKOVO®



Le capteur du TISCP était placé à une distance approximative de 1 à 3 cm de la surface du globe oculaire gauche, l'opérateur maintenant l'œil ouvert avec son autre main.

Figure 10 : Positionnement du thermomètre électronique pour la mesure axillaire



La sonde du thermomètre électronique était enfoncée au maximum sous l'aisselle gauche de l'animal, en remontant au maximum le thermomètre dans le creux axillaire et en la plaquant contre la paroi thoracique.

Figure 11 : Positionnement du thermomètre électronique pour la mesure rectale



Le thermomètre était enfoncé horizontalement dans le rectum jusqu'à la fenêtre de lecture blanche, en plaquant l'embout du thermomètre contre la paroi rectale dorsale.

3.3.2 *Protocole expérimental*

Pour tous les chevaux inclus dans le protocole, les mesures se faisaient dans le box dans lequel ils étaient logés. Les chevaux séjournèrent tous à la Clinique Équine de l'ENVA, soit dans un box en pierre extérieur, soit dans un box intérieur, dans l'une des deux écuries couvertes. Durant toute notre étude, la pression atmosphérique était toujours considérée comme inférieure à 106 kPa. L'humidité relative n'a pu être évaluée.

Pour chaque cheval, nous relevions les informations suivantes :

- Date de la mesure ;
- Horaire du début des mesures ;
- Température extérieure, indiquée par le site internet Météo France ;
- Signalement du cheval : âge, sexe, poids ;
- Événements rapportés dans l'heure précédente (sortie, sédation...) ;
- Port d'une couverture et/ou du panier de jeun.

Entre les séries de mesure, les outils de mesure étaient conservés dans leur emballage dans une pièce à l'abri de l'humidité, des températures extrêmes et des changements majeurs de température. Avant chaque début de session de mesures, les thermomètres étaient acclimatés à la température ambiante. À noter que les mesures ont toutes été réalisées lors de températures extérieures supérieures ou égales à 10°C, en considérant que la température ambiante du box était toujours plus élevée.

- **Temps 1** : Validité des méthodes de mesure axillaire (thermomètre électronique) et infrarouges avec le thermomètre infrarouge sans contact ANKOVO® (nez, canthus médial et cornée), appréciation de la tolérance et de la durée d'acquisition des mesures

Lorsque le cheval était logé en box extérieur, il était placé au fond du box parallèlement au mur, face gauche de l'animal vers le fond, afin de s'affranchir des courants d'air et du rayonnement solaire adjacents à la porte. Lorsque le cheval était logé en box intérieur, les portes des bâtiments étaient closes afin de réduire ces mêmes éléments. Les séries de mesures étaient alors réalisées dans l'ordre suivant : TN1, TCa1, TCo1, TA puis TR, le gold standard. Pour chaque cheval, deux séries de mesure successives étaient réalisées par l'opérateur principal Léna LEGRAND (série 1 et série 2) afin d'évaluer la répétabilité de chaque méthode. Pour les 13 premiers chevaux, une troisième série était réalisée à la suite par l'opérateur secondaire Chloé HERVÉ (série 3) afin d'évaluer la reproductibilité inter-opérateurs de chaque méthode. Les valeurs obtenues par le premier opérateur n'étaient pas connues du second. L'heure de début de chacune des séries était relevée. Chaque mesure était réalisée une unique fois, hormis lors de mouvement important de l'animal ou de l'opérateur, où la mesure était réitérée.

Après le relevé des températures par l'opérateur principal, une note était attribuée à l'animal selon sa tolérance pour chaque méthode de mesure, selon le barème suivant établi en amont :

Tableau 6 : Barème de notation de la coopérativité du cheval face à une méthode de mesure

Note	Description
1/4	Mesure très aisée : cheval calme, pas de repositionnement de l'outil nécessaire
2/4	Mesure faisable : nécessité de replacer l'outil une à deux fois et/ou léger mouvement d'échappement de l'animal
3/4	Mesure compliquée : réalisable après plusieurs replacements de l'outil et/ou nombreux mouvements de l'animal
4/4	Mesure très compliquée : non réalisable ou réalisée avec mise en danger de l'opérateur

Enfin, au cours des mesures, nous avons constaté que la durée d'acquisition de la mesure différait selon la méthode de mesure mise en œuvre. Ainsi, afin d'apprécier cette différence, nous avons chronométré le temps écoulé entre le déclenchement de l'outil et l'affichage de la valeur de température finale pour chaque méthode, et ce pour dix individus.

- **Temps 2** : Évaluation de la concordance entre deux séries de mesures obtenues avec deux TISCP différents : le TISCP ANKOVO® et le TISCP iHealth®

Ce second de temps de l'étude a été mené avoir récolté toutes les données du Temps 1, dans les mêmes conditions que celles décrites ci-dessus. Seuls les individus n°38 et 39 ont été inclus dans les Temps 1 et 2. Ici, les séries de mesure ont été réalisées de la façon suivante : TN1, TCa1, TCo1, TN2, TCa2, TCo2 puis TR par l'opérateur principal Léna LEGRAND.

Enfin, lorsque le cheval était hypertherme « vrai » par méthode rectale, une mesure de TA était réalisée.

3.4 Recueil des données

Pour chaque cheval, toutes les informations relevées ainsi que les séries de mesures étaient rapportées dans un tableur afin d'être, à postériori, analysées.

4 Méthodes statistiques d'analyse des différentes méthodes de mesure

Notre étude concerne l'évaluation de la répétabilité, de la reproductibilité inter-opérateurs et de la concordance avec la température rectale de 4 méthodes de mesure. Pour chacune, le caractère mesuré est identique et quantitatif : il s'agit de la temporelle corporelle. Cette évaluation va alors s'appuyer sur des méthodes numériques et graphiques. Dans le cadre d'un caractère quantitatif, nous utiliserons le coefficient de concordance de Lin comme méthode numérique, et la méthode de Bland et Altman comme méthode graphique.

Dans la suite de cette partie, nous allons décrire succinctement ces méthodes afin de faciliter la compréhension des résultats. Les descriptions qui font suite sont issues du document « Guide pratique de validation statistique de méthodes de mesure : répétabilité, reproductibilité, et concordance » écrit et mis à disposition par Loïc Desquilbet (Desquilbet, 2019).

4.1 Validité des différentes méthodes de mesure

4.1.1 Méthode numérique : le coefficient de concordance de Lin

L'outil de choix pour la quantification numérique de la concordance de 2 séries de mesures, et donc de la répétabilité, de la reproductibilité inter-opérateurs et de la concordance d'une méthode de mesure avec une méthode de référence, est le coefficient de concordance de Lin (Lin *et al.*, 2007).

4.1.1.1 Formule

Tableau 7 : Formule de calcul du coefficient de concordance de Lin (d'après Lin, 1989)

$$\rho_c = \frac{2\sigma_{12}}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + (\mu_1 - \mu_2)^2} = \rho C_b,$$

where

$$C_b = [(v + 1/v + u^2)/2]^{-1},$$

$$v = \sigma_1/\sigma_2 = \text{scale shift},$$

$$u = (\mu_1 - \mu_2)/\sqrt{\sigma_1\sigma_2} = \text{location shift relative to the scale}.$$

Avec :

- ρ_c = coefficient de concordance de Lin
- ρ = coefficient de corrélation de Pearson
- C_b = un coefficient dépendant de l'écart de variabilité du caractère quantitatif entre les deux séries, et de l'écart de moyennes entre les deux séries. Compris entre 0 et +1, il quantifie (de façon inverse) l'écart entre la droite de régression estimée à partir des deux séries de mesures et la droite à 45° (Lin, 1989)

Pour la réalisation de cette thèse, un document Excel[®] mis à disposition par Loïc Desquilbet a permis le calcul direct de ce coefficient.

4.1.1.2 Interprétation (Desquilbet, 2019)

Le coefficient de concordance de Lin fournit une valeur entre -1 et +1, -1 correspondant à une discordance parfaite, 0 à une concordance nulle et +1 à une concordance parfaite. La concordance parfaite se traduira, sur un graphique d'ordonnée les valeurs de la première série de mesure et d'abscisse les valeurs de la seconde série, par une superposition de la droite de régression correspondante à la droite de pente 45°. De façon simplifiée, le CCC de Lin permet de quantifier l'écart entre les points de la droite de régression obtenue et la droite de concordance parfaite. Le Tableau 4 permet d'interpréter la valeur du CCC de Lin afin de conclure sur l'acceptabilité de la concordance calculée.

4.1.1.3 Précision et exactitude (Desquilbet, 2019)

Deux éléments majeurs peuvent affecter la valeur du CCC de Lin : l'exactitude et la précision (Lin, 2000).

Lorsqu'on trace, la droite de régression correspondant à nos séries de mesure à comparer, si la concordance n'est pas parfaite, on peut être face à différentes situations :

- Si les mesures observées s'éloignent de part et d'autre de la droite de régression estimée, alors il y a un manque de **précision** autour de cette droite de régression.
- Si la droite de régression estimée est éloignée de la droite de concordance parfaite, alors il y a un manque d'**exactitude**.

Le manque de « précision » sera inversement quantifié par le coefficient de corrélation de Pearson tandis que le manque d'exactitude sera inversement quantifié par le coefficient C_b . Les formules pour les obtenir sont les suivantes :

Tableau 8 : Formules de calcul de la part du manque de précision et du manque d'exactitude dans la valeur du CCC de Lin (Desquilbet, 2019)

$$\text{Part (en \%)} \text{ du manque de précision} = \frac{\text{Ln}(\rho)}{\text{Ln}(\rho) + \text{Ln}(C_b)}$$

$$\text{Part (en \%)} \text{ du manque d'exactitude} = \frac{\text{Ln}(C_b)}{\text{Ln}(\rho) + \text{Ln}(C_b)}$$

Ainsi, la connaissance de la part de chacun va permettre de savoir quelle stratégie adopter afin de réduire le manque de concordance :

- S'il s'agit d'un manque de **précision**, alors le protocole doit être amélioré afin de limiter les erreurs aléatoires.
- S'il s'agit d'un manque d'**exactitude**, il faut regarder l'allure de notre droite de régression par rapport à la droite de concordance parfaite. Si la première est au-dessus de la droite à 45°, alors il faut corriger la surestimation systématique de la méthode étudiée, et inversement si la droite de régression est en-dessous.

4.1.2 Méthode graphique : la méthode de Bland et Altman

4.1.2.1 Pourquoi l'utiliser ? (Desquilbet, 2019)

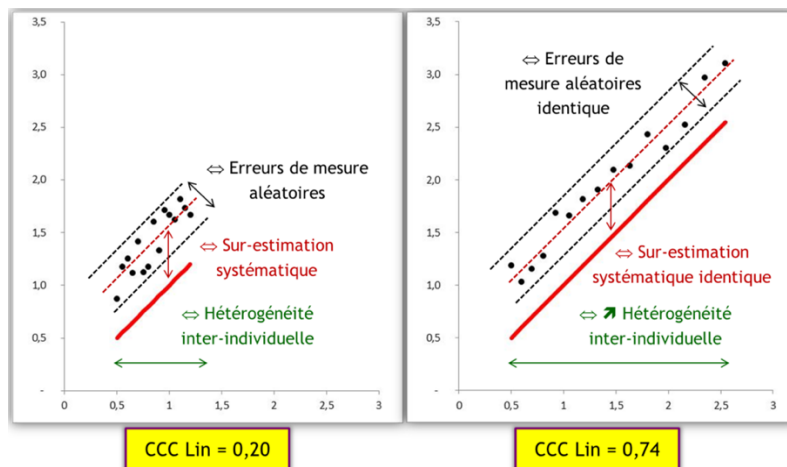
L. Desquilbet explique dans son document la différence entre deux notions, extraites du vocabulaire anglophone, que sont l'« agreement » et la « reliability ».

L'« **agreement** » correspond à la capacité d'une méthode de mesure à fournir deux fois la même valeur chez un individu mesuré deux fois, indépendamment des valeurs des individus. La « **reliability** » correspond à la capacité d'une méthode de mesure à distinguer deux individus, malgré l'erreur de mesure (systématique + aléatoire).

Le CCC de Lin est proportionnel au ratio hétérogénéité individuelle/erreur de mesure, et quantifie ainsi davantage la « reliability » que l'« agreement ». En effet, plus le ratio est élevé moins

la distinction entre deux individus est impactée par le bruit engendré par la méthode de mesure, et ainsi plus le CCC de Lin est proche de 1. La Figure 12 illustre cela.

Figure 12 : Illustration de l'influence majoritaire de la "reliability" sur le CCC de Lin (Desquilbet, 2019)



On s'aperçoit que, bien que l'erreur systématique soit identique dans les deux situations, avec une surestimation en moyenne de la même quantité, et une erreur aléatoire comparable, le CCC de Lin est plus élevé dans le second cas (à droite). Cela s'explique par le fait que l'hétérogénéité individuelle est plus importante dans le second cas.

Ainsi, pour mieux apprécier ces deux notions et cibler la cause d'un faible CCC de Lin, la méthode graphique préconisée est la méthode de Bland et Altman.

4.1.2.2 Présentation de la méthode

- Définition

La méthode graphique de Bland et Altman permet une évaluation clinique de la concordance entre deux séries de mesures, tandis que le coefficient de concordance de Lin est un critère uniquement statistique. À noter qu'elle est utilisable uniquement lorsque les deux séries de mesure sont censées, lorsqu'elles sont parfaitement concordantes, donner des valeurs identiques (Desquilbet, 2019). Selon cette méthode, on dira que deux séries sont concordantes si l'une ne surestime ou ne sous-estime pas l'autre de façon trop importante, et si les écarts entre les deux séries pour chaque individu mesuré (deux fois) ne sont pas trop élevés. (Bland et Altman, 1986) Les écarts acceptables seront fixés, à priori, par l'investigateur.

- Composition du graphique (Desquilbet, 2019)

Le graphique de Bland et Altman se compose :

- De points, représentant les mesures des individus ;
- D'une droite centrale, représentant le biais, correspondant à la moyenne des écarts entre les deux séries ;

- Des deux droites extérieures, représentant les limites d'agrément inférieur (Lim_{inf}) et supérieur (Lim_{sup}). On peut l'interpréter comme : « si l'ensemble des écarts entre les deux séries de mesures suit une loi parfaitement normale, 95% des écarts entre les mesures réalisées par la 2ème méthode et celles réalisées par la 1ère méthode sont à l'intérieur de l'intervalle $\{Lim_{inf}; Lim_{sup}\}$ » ;
- L'axe des abscisses, qui est la moyenne des mesures des deux séries ;
- L'axe de ordonnées, qui est la différence entre les mesures des deux séries ($S2-S1$).

Ainsi, plus le point est éloigné de l'axe des abscisses, plus l'écart entre S1 et S2 pour l'individu correspondant est important.

- Calculs (Desquilbet, 2019)

On fait l'hypothèse que les écarts entre les deux séries de mesures suivent une loi normale. Pour l'élaboration du graphique, on va créer deux variables :

- Variable « **MOYENNES** » (abscisse) : valant la moyenne des deux valeurs (S1 et S2) pour chaque individu ;
- Variable « **ÉCARTS** » (ordonnée) : valant la différence des deux valeurs pour chaque individu.

Ensuite on va calculer :

- Le « **biais** » (ordonnée droite centrale) = moyenne de « **ÉCARTS** » (M_{ECARTS}) sur l'ensemble de individus ;
- Les **limites d'agrément** (ordonnées des droites extérieures) = $M_{ECARTS} \pm 1,96 \times (\text{Standard Deviation})_{ECARTS}$

Le document Excel® fourni par L. Desquilbet permet la réalisation directe de ces calculs ainsi que celui des intervalles de confiance à 95% du « biais » et des limites d'agrément estimées.

- Vérifications préliminaires

Avant de construire un graphique de Bland Altman, il faut avoir une idée à priori des valeurs X et Y dans les trois contextes correspondants à notre étude (Desquilbet, 2019) :

- Répétabilité d'une méthode de mesure : « Je considère que la méthode de mesure est répétable si (1) En moyenne, la deuxième série de mesures (S2) ne surestime ou ne sous-estime pas les valeurs par rapport à la première série de mesures de plus de X, et si (2) La quasi-totalité des écarts (en valeur absolue) entre les deux séries de mesures est inférieure à Y ».
- Reproductibilité inter-opérateurs d'une méthode de mesure : « Je considère que les deux opérateurs donnent des valeurs concordantes si (1) En moyenne, l'un ne surestime ou ne sous-estime pas les valeurs par rapport à l'autre opérateur de plus de X, et si (2) La quasi-totalité des écarts (en valeur absolue) entre les deux opérateurs est inférieure à Y ».
- Concordance entre deux méthodes de mesure : « Je considère que les deux méthodes de mesure sont concordantes si (1) En moyenne, S2 ne surestime ou ne sous-estime pas les valeurs par rapport à S1 de plus de X, et si (2) La quasi-totalité des écarts (en valeur absolue)

entre les deux séries de mesures provenant des deux méthodes de mesure est inférieure à Y ».

Ainsi, X fait référence au « biais » et correspond au « biais maximal acceptable ». Y correspond à la zone d'agrément tel que $\{-Y ; +Y\}$ correspond à la « zone d'agrément maximale acceptable » (Chhapola *et al.*, 2015). Par conséquent, après avoir fixé les critères a priori, on vérifiera leur respect par nos données de mesure. Dans notre cas nous fixerons les critères X et Y suivants (Tableau 9) :

Tableau 9 : Valeurs de X et Y fixées a priori pour notre étude

Contexte		Valeur de X fixée à priori	Valeur de Y fixée à priori
Répétabilité (<i>toutes méthodes</i>)		0,200	0,300
Reproductibilité inter-opérateurs (<i>toutes méthodes</i>)		0,200	0,300
Concordance (<i>sur nouvelle méthode corrigée</i>)	Bout du nez	0,100	0,300
	Canthus médial	0,100	0,300
	Cornée	0,100	0,300
	Axillaire	0,100	0,300

- Coefficient de répétabilité

Bland et Altman définissent un coefficient de répétabilité égal à $1,96 \times (\text{Standard deviation})_{\text{ECARTS}}$. Il peut s'interpréter comme « 95% des écarts entre les deux séries de mesures, en valeur absolue, sont inférieurs ou égaux à la valeur du coefficient de répétabilité, en retirant l'écart systématique (le « biais » observé) entre les deux séries de mesures » (Desquilbet, 2019).

Ce coefficient peut s'avérer utile dans le cas où une méthode nouvelle sur ou sous-estimerait systématiquement la méthode de référence : en effet, en ajoutant de façon systématique le « biais » observé (à condition que l'intervalle de confiance à 95% de celui-ci soit resserré autour de sa valeur) aux valeurs obtenues avec la nouvelle méthode, la droite rouge (« biais ») serait alors confondue avec la droite d'ordonnées = 0 et les limites d'agrément à 95% seraient $[- \text{coefficient de répétabilité} ; + \text{coefficient de répétabilité}]$. Ainsi, plus le coefficient de répétabilité est faible, plus l'intervalle d'agrément obtenu après correction est étroit, ce qui est recherché.

4.2 Analyse de l'association de différents paramètres avec les températures mesurées : test de Student pour séries non appariées (Desquilbet, 2023a)

Des tests de Student pour séries non appariées ont été réalisés à partir des séries obtenues avec les nouvelles méthodes étudiées, pour différents critères. L'objectif du test de Student est de montrer

que deux groupes A et B de la population cible diffèrent sur la moyenne d'un caractère quantitatif. Les tests ont été réalisés avec le site internet BiostaTGV.

Pour la réalisation de ces tests, seuls les chevaux normothermes étaient pris en compte. Pour chacun des tests, trois conditions préliminaires étaient à vérifier :

- Indépendance des individus (toujours vérifiée) ;
- Différence faible entre les variances SD_A^2 et SD_B^2 (avec SD la Standard Deviation) : vérifiée si $1/3 < SD_A^2/SD_B^2 < 3$;
- Normalité de distribution de la variable quantitative dont on calcule les moyennes (vérifiée par tracé d'histogramme par le site internet Social Science Statistics).

L'hypothèse H_0 était acceptée si $p > 0,05$ et de cette façon, aucune inférence ne pouvait être faite. L'hypothèse H_0 était rejetée si $p \leq 0,05$ et dans ce cas, il était possible d'inférer.

4.3 Détection des hyperthermes : sensibilité, spécificité et valeurs prédictives des différentes méthodes

Pour chaque nouvelle méthode de mesure, nous avons calculé différents indicateurs à partir des résultats obtenus. Les calculs n'ont été réalisés que pour le TISCP ANKOVO®, manquant de données pour le TISCP iHealth®. On définit un hypertherme vrai tel que $TR \geq 38,5^\circ\text{C}$. Seule la première série de mesure était prise en compte pour chaque méthode. Par la suite, pour chaque méthode, nous avons dressé le tableau suivant :

Tableau 10 : Résultats obtenus pour une méthode donnée permettant le calcul de différents indicateurs d'intérêt

	Hypertherme (TR $\geq 38,5^\circ\text{C}$)	Normotherme (TR $< 38,5^\circ\text{C}$)	
Hypertherme d'après la méthode	VP : nombre de vrais positifs	FP : nombre de faux positifs	Total des hyperthermes d'après la méthode
Normotherme d'après la méthode	FN : nombre de faux négatifs	VN : nombre de vrais négatifs	Total des normothermes d'après la méthode
	Total des hyperthermes vrais	Total des normothermes vrais	

Dès lors, nous avons calculé, d'après (Crozet, 2023) :

- La sensibilité de la méthode : Aptitude du test à détecter un individu hypertherme. Probabilité pour un individu hypertherme vrai d'être hypertherme d'après la méthode testée.

$$\frac{VP}{VP + FN}$$

- La spécificité de la méthode : Aptitude du test à détecter un individu normotherme. Probabilité pour un individu normotherme vrai d'être normotherme d'après la méthode testée.

$$\frac{VN}{FP + VN}$$

De plus, nous avons aussi calculé (Crozet, 2023; Desquilbet, 2023) :

- La valeur prédictive positive : Confiance lors d'un hypertherme d'après la méthode testée. Probabilité qu'un hypertherme à la méthode corresponde à un hypertherme vrai.

$$\frac{VP}{VP + FP}$$

- La valeur prédictive négative : Confiance lors d'un normotherme d'après la méthode testée. Probabilité qu'un normotherme à la méthode corresponde à un normotherme vrai.

$$\frac{VN}{FN + VN}$$

Il est à noter qu'en médecine individuelle, ces deux dernières formules sont valables et interprétables uniquement dans un contexte bien particulier que nous considérerons effectif dans cette thèse tel que :

- **Condition n°1** : Le taux de prévalence de l'hyperthermie dans l'échantillon est à priori proche de celui dans la population d'où est issu l'individu.
- **Condition n°2** : L'hyperthermie est totalement asymptomatique, et on ne connaît aucune caractéristique potentiellement liée à elle dont la présence ou l'absence pourrait influencer dans l'évaluation à priori de la présence (ou de l'absence) de l'hyperthermie concernant l'individu.

Troisième partie : Présentation des résultats

1 Chevaux inclus et contextes de mesure dans l'étude

Dans notre étude, 52 chevaux ont été inclus entre le 07 mars 2022 et le 5 septembre 2023. Parmi eux, 33 étaient des hongres, un était un étalon, et les autres des femelles. Les chevaux avaient entre 1,5 et 32 ans et leur poids était compris entre 272 et 708 kg. Parmi ces chevaux, 15 étaient des chevaux d'enseignement de l'École Nationale Vétérinaire d'Alfort. Les autres chevaux étaient des chevaux hospitalisés à l'ENVA pour des raisons diverses. L'ensemble de ces informations sont rapportées dans le Tableau 11.

Tableau 11 : Signalement et motif de présence des 52 chevaux inclus dans l'étude

N° individu	Sexe¹	Âge (en années)	Poids (en kg)	Motif de présence
1	H	1,5	410	Enseignement
2	F	3	411	Enseignement
3	H	25	400 ²	Enseignement
4	H	3	344	Enseignement
5	H	2	434	Enseignement
6	H	5	580	Enseignement
7	F	4	456	Enseignement
8	H	5	512	Enseignement
9	F	2	407	Enseignement
10	F	2	400	Enseignement
11	H	4	470	Colique chirurgicale
12	H	32	490	Paraphimosis
13	F	24	488	Péritonite septique
14	H	10	708	Péritonite septique
15	H	5	500	Hyperthermie
16	F	13	660	Colique médicale
17	H	28	438	Colique médicale
18	F	4	450	Colique médicale
19	H	9	380	Fracture de métacarpien
20	H	21	500	Urétrostomie périnéale
21	H	24	654	Colique médicale
22	F	11	400	Enseignement
23	F	14	520	Enseignement
24	H	16	600	Trépanation sinusale
25	H	5	560	Colique chirurgicale
26	F	17	500	Accompagnante poulain
27	F	5	500	Accompagnante poulain
28	H	18	272	Bronchopneumonie
29	E	8	460	Castration inguinale
30	H	5	588	Ostéocondrite disséquante
31	F	15	588	Colique médicale
32	H	22	622	Retrait de sarcoïdes
33	F	10	614	Colique médicale
34	H	3	376	Enseignement
35	H	3	391	Enseignement
36	H	22	550	Colique chirurgicale
37	F	10	610	Accompagnante poulain
38	H	10	480	Mycose des poches gutturales
39	F	10	500	Accompagnante poulain
40	F	2	500	Phlegmon antérieur gauche
41	H	16	480	Bursite nuchale
42	H	10	546	Colique médicale
43	H	14	570	Colique chirurgicale
44	H	4	498	Plaie sternale
45	H	4	595	Colique chirurgicale
46	F	11	400	Enseignement

47	H	8	364	Retrait de masse
48	H	14	510	Trépanation sinusale
49	H	12	500	Mycose des poches gutturales
50	H	13	550	Exérèse métacarpien rudimentaire
51	F	8	500	Fièvre d'origine indéterminée
52	H	17	550	Colique médicale

¹ Avec H : hongre, F : femelle entière, E : étalon

² Les cases colorées en rose correspondent aux poids évalués visuellement.

Les informations sur une éventuelle sortie dans l'heure précédant les mesures, le port d'une couverture ou d'un panier de jeun ont été rapportés dans le Tableau 12. La localisation du box y est aussi mentionnée.

Tableau 12 : Informations contextuelles relevées pour chaque cheval au moment des mesures

<i>N° individu</i>	<i>Localisation du box</i>	<i>Sortie/événement</i>	<i>Panier de jeun</i>	<i>Couverture</i>
1	Extérieur	Non ³	Non	Non
2	Extérieur	Non	Non	Non
3	Extérieur	Non	Non	Non
4	Intérieur (écurie 2)	Non	Non	Non
5	Extérieur	Sédaté 30 min avant	Oui	Oui
6	Extérieur	Non	Non	Non
7	Extérieur	Non	Non	Non
8	Extérieur	Non	Non	Non
9	Extérieur	Non	Non	Non
10	Extérieur	Non	Non	Non
11	Intérieur (écurie 1)	Oui, au pas	Oui	Non
12	Extérieur	Non	Non	Non
13	Intérieur (écurie 2)	Non	Non	Non
14	Mesures réalisées dans une salle d'examen intérieure	Non, mais en cours de tonte	Non	Non
15	Extérieur	Non	Non	Oui
16	Intérieur (écurie 1)	Non	Oui	Non
17	Intérieur (écurie 1)	Non	Oui	Non
18	Intérieur (écurie 2)	Non	Oui	Non
19	Intérieur (écurie 2)	Non	Non	Oui
20	Intérieur (écurie 2)	Non	Non	Non
21	Intérieur (écurie 2)	Non	Oui	Non
22	Extérieur	Non	Oui	Non
23	Extérieur	Non	Non	Non
24	Intérieur (écurie 2)	Non	Non	Non
25	Intérieur (écurie 1)	Non	Oui	Non

26	Intérieur (écurie 1)	Non	Non	Non
27	Box capitonné	Non	Non	Non
28	Intérieur (écurie 1)	Non	Oui	Non
29	Intérieur (écurie 1)	Non	Non	Non
30	Intérieur (écurie 2)	Non	Non	Non
31	Intérieur (écurie 2)	Non	Oui	Non
32	Intérieur (écurie 2)	Non	Non	Non
33	Intérieur (écurie 2)	Non	Oui	Non
34	Extérieur	Non	Non	Non
35	Extérieur	Non	Non	Non
36	Intérieur (écurie 2)	Non	Non	Non
37	Intérieur (écurie 1)	Non	Non	Non
38	Intérieur (écurie 2)	Non	Non	Non
39	Intérieur (écurie 2)	Non	Non	Non
40	Intérieur (écurie 1)	Non	Non	Non
41	Extérieur	Non	Non	Non
42	Intérieur (écurie 2)	Non	Oui	Non
43	Intérieur (écurie 1)	Non	Non	Non
44	Intérieur (écurie 2)	Non	Non	Non
45	Intérieur (écurie 1)	Non	Oui	Non
46	Extérieur	Non	Non	Non
47	Extérieur	Non	Non	Non
48	Extérieur	Non	Non	Non
49	Intérieur (écurie 1)	Non	Non	Non
50	Intérieur (écurie 2)	Non	Non	Non
51	Intérieur (écurie 2)	Non	Oui	Non
52	Intérieur (écurie 1)	Non	Oui	Non

³ « Non » signifie que le cheval n'a pas été sorti de son box dans l'heure précédant les mesures.

Enfin, on rapporte dans le Tableau 13 les différentes conditions dans lesquelles les mesures ont été réalisées. Pour rappel, la température extérieure était relevée sur le site internet Météo France. On a considéré que les chevaux étaient isolés des courants d'air et du rayonnement solaire direct, ce pourquoi ces éléments n'ont pas été relevés. Pour chaque jour de mesure, les chevaux évalués l'étaient un à un à la suite, à partir de l'horaire de début des mesures. Cet horaire a été relevé afin de situer les mesures sur la journée.

Tableau 13 : Informations spatio-temporelles relevées pour chaque cheval au moment des mesures

<i>Individus mesurés</i>	<i>Date</i>	<i>Horaire du début des mesures</i>	<i>Température extérieure</i>
1 à 5	07/03/2022	9h58	13°C
6 à 8	17/06/2022	14h50	33°C
9 et 10	02/11/2022	14h50	17°C
11 à 13	27/12/2022	18h00	10°C
14	28/12/2022	14h00	11°C
15 à 17	31/12/2022	22h00	11°C
18 et 19	01/01/2023	5h10	14°C
20 et 21	15/03/2023	23h12	13°C
22 à 25	18/03/2023	1h03	12°C
26 à 29	20/03/2023	21h20	12°C
30 à 33	23/05/2023	22h59	15°C
34 et 35	09/07/2023	17h38	27°C
36 et 37	23/07/2023	11h53	23°C
38 à 43	15/08/2023	18h53	25°C
44 à 46	19/08/2023	16h20	27°C
47 et 48	01/09/2023	20h00	20°C
49 à 52	06/09/2023	19h45	30°C

2 Appréciation qualitative de la facilité de mise en pratique des quatre méthodes

Nous avons vu que l'une des motivations principales de notre étude est de trouver une alternative à la prise de température rectale, qui soit simple, rapide, facile d'utilisation, hygiénique et surtout sécuritaire pour l'opérateur. Ainsi, il est intéressant d'évaluer la rapidité de chaque méthode de mesure ainsi que la coopérativité de l'animal lors de leur mise en œuvre.

2.1 Durée d'acquisition de la mesure

2.1.1 Acquisition avec les TISCP

Pour chaque mesure avec les TISCP, indépendamment du site d'intérêt et de l'outil employé, la valeur de la température mesurée s'affichait en moins de 3 secondes.

2.1.2 Acquisition avec le thermomètre électronique digital

2.1.2.1 Température rectale

La durée d'acquisition de la température rectale a été relevée sur 10 chevaux lors du Temps n°1. Pour chaque cheval, le thermomètre affichait la valeur en moins de 15 secondes.

2.1.2.2 Température axillaire

La durée d'acquisition de la température axillaire a été relevée sur les 10 mêmes chevaux lors du Temps n°1. Les durées sont rapportées dans le Tableau 14.

Tableau 14 : Durée d'acquisition de la température axillaire relevée sur 10 chevaux lors du Temps n°1

Temps en secondes	20	62	76	34	38	13	18	30	17	30
--------------------------	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

La variable « Temps » ne suivant pas ici une loi normale, nous avons calculé la médiane, les premier et troisième quartiles et l'étendue des valeurs dans l'échantillon (Tableau 15).

Tableau 15 : Détermination de différents indicateurs concernant la durée d'acquisition de la température axillaire dans l'échantillon

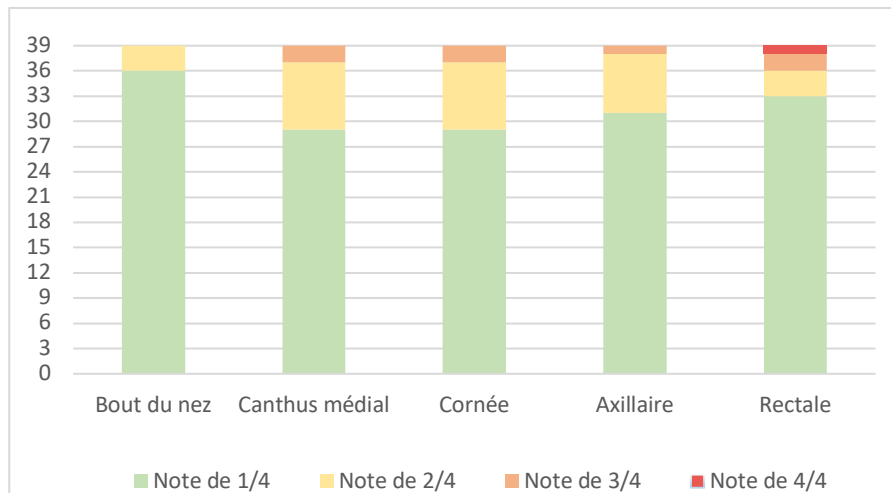
<i>Étendue</i>	<i>Médiane</i>	<i>Premier quartile</i>	<i>Troisième quartile</i>
[13 ; 76]	30	18	38

La mesure a été chronométrée sur quelques animaux seulement afin d'apprécier la durée d'acquisition de la température axillaire, sans pour autant avoir la vocation d'étendre les résultats et de déterminer un intervalle exact de durée d'acquisition. Dans l'échantillon mesuré, l'acquisition prenait de 13 à 76 secondes. Pour 50% des individus, la durée d'acquisition était supérieure à 30 secondes. Enfin, 50% des individus montraient une durée d'acquisition de 18 à 38 secondes.

2.2 Note de tolérance des différentes méthodes de mesure

Les notes ont été attribuées lors du premier temps de l'étude, comprenant 39 chevaux mesurés avec le thermomètre électronique digital et le thermomètre infrarouge ANKOVO®, selon le barème Tableau 6. Le détail des notes est rapporté en annexe (Annexe 2). Elles sont résumées dans la Figure 13. Nous avons considéré que les notes seraient identiques pour n'importe quel modèle de thermomètre infrarouge.

Figure 13 : Notes de tolérance obtenues pour les 39 chevaux évalués lors du Temps n°1, pour les cinq méthodes de mesure de températures appliquées, selon le barème établi dans le Tableau 6



La mesure de la température au bout du nez est la mieux tolérée, avec une mesure aisée (Tableau 6) pour 92% des individus. Les méthodes du canthus médial et de la cornée ont fourni les mêmes résultats de tolérance avec une mesure aisée pour 74% des individus, et une mesure faisable à compliquée pour le reste des individus. La méthode axillaire présente une tolérance similaire aux deux méthodes précédentes, avec seulement 20% des individus pour lesquels la mesure était faisable à compliquée. Enfin, la méthode rectale s'est montrée aisée à réaliser pour 85% des individus, mais a été réalisée avec mise en danger de l'opérateur pour un individu.

3 Analyse des données de température rectale obtenues avec un thermomètre digital électronique

Dans cette partie, nous avons calculé les coefficients de concordance de Lin et dressé les graphiques de Bland et Altman obtenus lors de l'évaluation la répétabilité et la reproductibilité inter-opérateurs de la méthode rectale. L'objectif était d'ensuite pouvoir les comparer avec les résultats obtenus pour les autres méthodes de mesure. Dans toute cette partie, la méthode rectale a ensuite été considérée comme la méthode de référence pour l'évaluation de la concordance des nouvelles méthodes de mesure. Les séries de mesure sont consultables en annexe (Annexe 3).

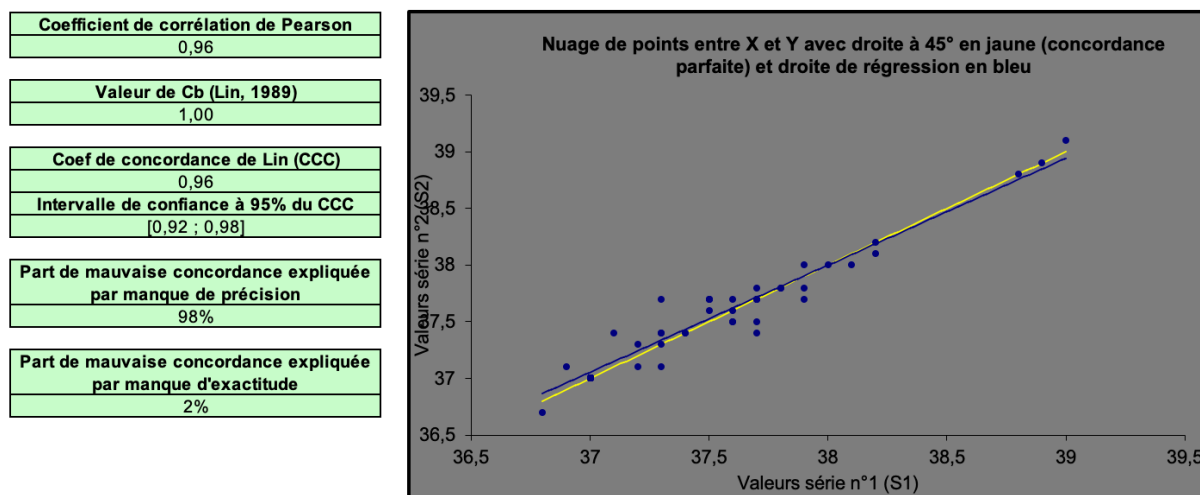
3.1 Vérification de la répétabilité des mesures réalisées deux fois par le même opérateur dans un espace de temps considéré comme négligeable

Pour ce calcul, les mesures ont été réalisées sur 39 chevaux (individus 1 à 39) par l'opérateur principal, Léna LEGRAND.

- Méthode numérique du coefficient de concordance de Lin

La Figure 14 présente les graphiques et calculs associés au coefficient de concordance de Lin.

Figure 14 : Étude numérique de la répétabilité de la méthode TR grâce au coefficient de concordance de Lin et graphique associé

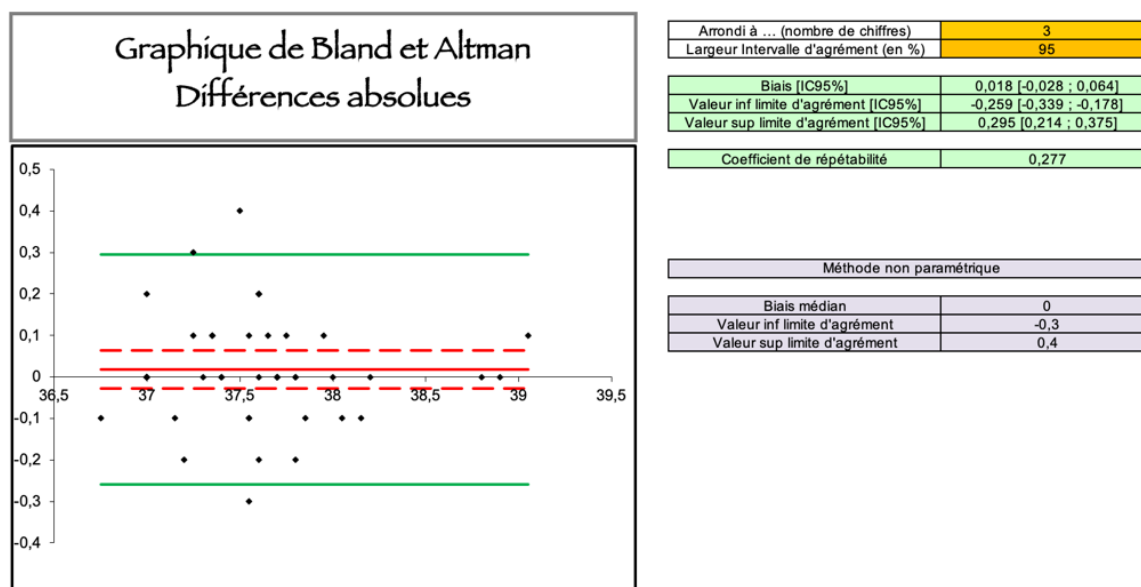


Le CCC de Lin calculé était de **0,96**, ce qui correspond, d'après les tableaux d'interprétation à une très bonne concordance d'après l'interprétation de Landis et Koch, et à une concordance excellente selon Partik. Dans la suite, nous avons uniquement considéré la classification de Landis et Koch, moins sévère. Ici, la concordance aurait pu être améliorée par une meilleure précision (part de responsabilité à 98%).

- Méthode graphique de Bland et Altman

La Figure 15 présente le graphique et les résultats obtenus par la méthode de Bland et Altman.

Figure 15 : Graphique de Bland et Altman pour l'évaluation de la répétabilité de TR



La droite rouge pleine représente le « biais » observé, dont la valeur était dans ce cas de 0,018. Cela signifiait que la moyenne des écarts entre S1 et S2 était de 0,018, et donc, qu'en moyenne, S2 surestimait S1 de 0,018°C. Le critère X (« biais maximal ») avait été fixé à priori à 0,2°C, la condition X était donc remplie. De plus, l'intervalle de confiance à 95% du « biais », représenté par les droites rouges en pointillés, était de [-0,028 ; +0,064] et comprenait la valeur 0, ce qui signifiait que la surestimation de S2 par rapport à S1 était non significative.

Les limites d'agrément représentées par les droites vertes étaient de [-0,259; +0,295] ce qui était inclus dans l'intervalle fixé à priori par le critère Y, de [-0,300 ; +0,300]. Il y a donc 95% des écarts de mesures compris entre deux limites qui sont inférieures aux limites d'agrément maximales définies au préalable, ce qui vérifie la condition.

Le coefficient de répétabilité n'a pas été utile dans ce cas. Par ailleurs, les valeurs obtenues par méthode non paramétrique sur la Figure 15 sont fournies à titre indicatif.

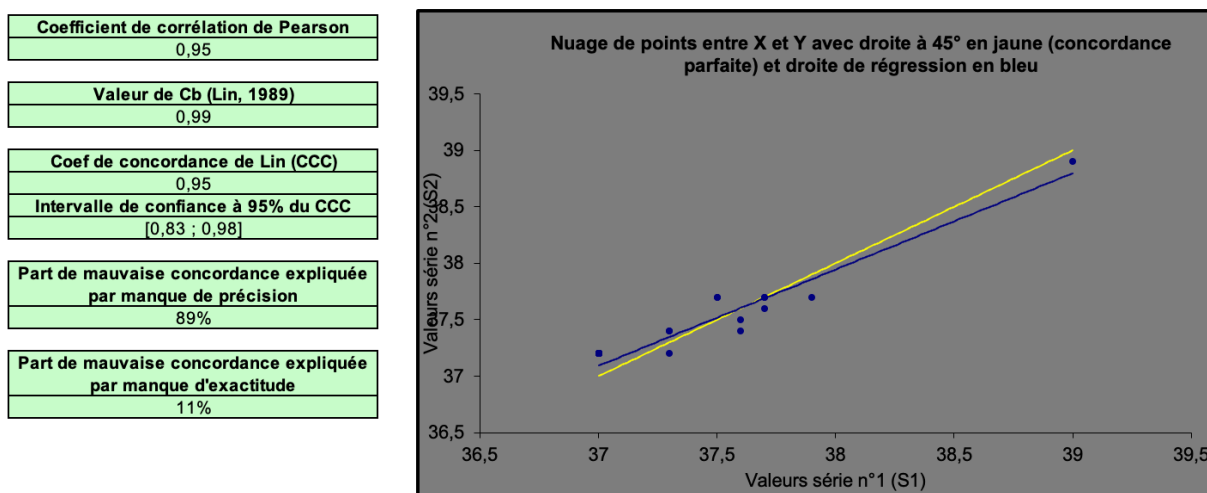
3.2 Vérification de la reproductibilité inter-opérateur à partir de deux séries de mesures réalisées par deux opérateurs différents dans un espace de temps considéré comme négligeable

Pour ce calcul, les mesures ont été réalisées sur 13 chevaux (individus 1 à 13) par l'opérateur principal puis par l'opérateur secondaire Chloé HERVÉ.

- Méthode numérique du coefficient de concordance de Lin

La Figure 16 présente les graphiques et calculs associés au coefficient de concordance de Lin.

Figure 16 : Étude numérique de la reproductibilité de la méthode TR grâce au coefficient de concordance de Lin et graphique associé

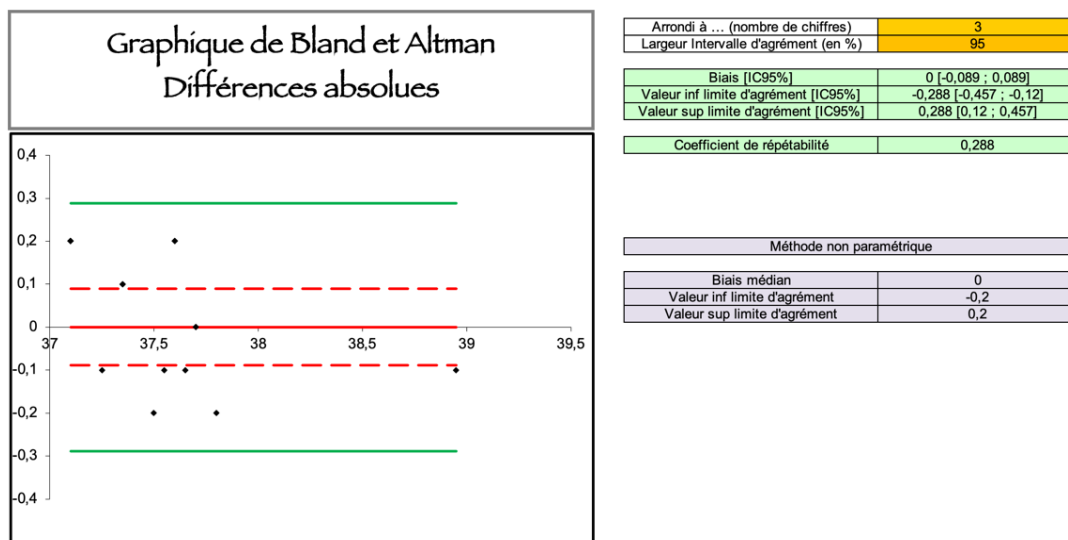


Le CCC de Lin calculé était de **0,95**, ce qui correspond, à une très bonne concordance d'après Landis et Koch. La concordance des séries aurait pu être améliorée par une meilleure précision (part de responsabilité à 89%).

➤ Méthode graphique de Bland et Altman

La Figure 17 présente le graphique et les résultats obtenus par la méthode de Bland et Altman.

Figure 17 : Graphique de Bland et Altman pour l'évaluation de la reproductibilité de TR



Le « biais » observé était de 0, ce qui signifie que la moyenne des écarts entre S1 et S2 était de 0, et donc, qu'en moyenne, S2 ne surestimait ou ne sous-estimait pas S1. La condition X était donc remplie.

Les limites d'agrément représentées par les droites vertes étaient de $[-0,288 ; +0,288]$ ce qui était inclus dans l'intervalle fixé à priori par le critère Y, de $[-0,300 ; +0,300]$. Il y a donc 95% des écarts de mesures compris entre deux limites qui sont inférieures aux limites d'agrément maximales définies au préalable, ce qui vérifie la condition.

3.3 Bilan pour la méthode rectale

Le Tableau 16 résume les données issues des calculs concernant la répétabilité et la reproductibilité de la méthode rectale.

Tableau 16 : Bilan des valeurs de CCC de Lin obtenues et de la vérification des critères pour la méthode rectale

Outil	Caractéristique évaluée	CCC de Lin	Vérification du critère X avec $X=0,200$	Vérification du critère Y avec $Y=0,300$
Scala®	Répétabilité	0,96	Oui	Oui
	Reproductibilité	0,95	Oui	Oui

3.4 Association entre différents paramètres et les données collectées

Des tests de Student ont été réalisés afin de savoir si la valeur de la température rectale était associée à différentes conditions, décrites dans la partie 5.1.3. Les résultats des tests, réalisés grâce au site internet BiostaTGV sont résumés dans le Tableau 17. Les animaux hyperthermes ($TR \geq 38,5^{\circ}\text{C}$) n'ont pas été inclus. Les conditions des tests (indépendance des individus, normalité de la variable et différence moindre des variances entre les groupes) ont toutes été vérifiées au préalable.

Tableau 17 : Évaluation de l'association entre la localisation du box et la valeur de TR et entre la température extérieure et la valeur de TR

Association testée	Groupe	Nombre d'individus	Moyenne	Degré de signification (p)
Localisation du box	<i>Intérieur</i>	29	37,55	0,80
	<i>Extérieur</i>	18	37,53	
Température extérieure	$\leq 15^{\circ}\text{C}$	25	37,60	0,18
	$> 15^{\circ}\text{C}$	22	37,47	

Par la suite pour plus de lisibilité, les résultats obtenus pour la détermination de la répétabilité, de la reproductibilité inter-opérateurs et de la concordance avec la température rectale des nouvelles méthodes seront fournies sous forme de tableaux. L'interprétation est identique à celle de la partie 3. Les séries de mesure, ainsi que les graphiques obtenus pour le calcul du CCC de Lin et la méthode de Blanc Atman sont consultables en annexe (Annexes 3 et 4).

4 Évaluation de la validité de la prise de température axillaire évaluée avec un thermomètre électronique digital

4.1 Répétabilité et reproductibilité inter-opérateurs de la méthode axillaire

Pour l'évaluation de la répétabilité, les mesures ont été réalisées sur 39 chevaux (individus 1 à 39) par l'opérateur principal, Léna LEGRAND. Pour la reproductibilité, les mesures ont été réalisées sur 13 chevaux (individus 1 à 13) par l'opérateur principal puis par l'opérateur secondaire Chloé HERVÉ. Les résultats obtenus sont consignés dans le Tableau 18.

Tableau 18 : Résultats obtenus pour l'évaluation de la répétabilité et de la reproductibilité de la méthode axillaire (Desquilbet, 2019)

		Répétabilité	Reproductibilité
Méthode numérique du CCC de Lin	CCC de Lin obtenu	0,87	0,79
	Intervalle de confiance à 95%	[0,76 ; 0,93]	[0,46 ; 0,93]
	Part de mauvaise concordance expliquée par manque de précision	87%	57%
	Part de mauvaise concordance expliquée par manque d'exactitude	13%	43%
	Interprétation du CCC de Lin (Landis et Koch, 1997)	Très bonne	Bonne
Méthode graphique de Bland et Altman	Valeur du « biais » observé	+0,097	+0,208
	Intervalle de confiance à 95% du « biais » observé	[-0,021 ; +0,216]	[-0,077 ; +0,493]
	Vérification du critère X avec X=0,200	Oui	Non
	Limites d'agrément	[-0,62 ; +0,815]	[-0,717 ; +1,132]
	Vérification du critère Y avec Y=0,300	Non	Non

4.2 Concordance de la méthode axillaire avec la méthode rectale

Comme dans la littérature, nous avons constaté lors de nos mesures que la température axillaire était systématiquement inférieure à la température rectale. De cette façon, l'objectif était de savoir s'il existait un coefficient de correction pour lequel les méthodes axillaire et rectale seraient concordantes. Pour cela, la méthode de Bland et Altman a été appliquée entre les mesures de TA « brutes » et TR, permettant l'obtention du « biais », correspondant à la moyenne des écarts entre les deux méthodes sur l'ensemble des individus. Les méthodes du coefficient de concordance de Lin et de Bland et Altman ont ensuite été appliquées entre les méthodes TA ajoutée du biais ($TA_{\text{corrigée}}$) et TR afin d'évaluer leur concordance.

Pour ce calcul, les mesures ont été réalisées sur 41 chevaux (individus 1 à 40 et 47) par l'opérateur principal, Léna LEGRAND. En effet, nous avons choisi d'ajouter aux 39 premiers individus mesurés lors du temps n°1, les individus hyperthermes (selon TR) mis en évidence lors du temps n°2, en leur mesurant une TA. La première série de mesures de chaque méthode a été prise en compte pour les calculs.

Ici, « le biais » était de +1,880 avec pour intervalle de confiance à 95% : [1,608 ; 2,153]. Cela signifie qu'en moyenne, la méthode axillaire sous-estimait la méthode rectale de 1,88°C, et que cette sous-estimation était significative. De plus, sous réserve que cette estimation du « biais » n'était pas biaisée, la vraie valeur de la correction avait 95% de chance d'être comprise entre 1,608 et 2,153. Les méthodes ont alors été appliquées entre les séries TA ajoutée du biais ($TA_{\text{corrigée}}$) et TR. Les résultats sont consignés dans le Tableau 19.

Tableau 19 : Résultats obtenus pour l'évaluation de la concordance entre la méthode axillaire corrigée (TA_{corrigée}) et la méthode rectale (TR) (Desquilbet, 2019)

Méthode numérique du CCC de Lin	CCC de Lin obtenu	0,19
	Intervalle de confiance à 95%	[-0,12 ; 0,47]
	Part de mauvaise concordance expliquée par manque de précision	97%
	Part de mauvaise concordance expliquée par manque d'exactitude	3%
	Interprétation du CCC de Lin (Landis et Koch, 1997)	Mauvais
Méthode graphique de Bland et Altman	Valeur du « biais » observé	0
	Vérification du critère X avec X=0,200	Oui
	Limites d'agrément	[-1,690; +1,691]
	Vérification du critère Y avec Y=0,300	Non

4.3 Association entre différents paramètres et les données collectées

Les résultats des tests de Student, réalisés grâce au site internet BiostaTGV, sont résumés dans le Tableau 20. Ces calculs ont été réalisés sur les chevaux mesurés lors du Temps 1. Les animaux hyperthermes (TR $\geq 38,5^{\circ}\text{C}$) n'ont pas été inclus. Les conditions des tests ont toutes été vérifiées au préalable.

Tableau 20 : Évaluation de l'association entre la localisation du box et la valeur de TA et entre la température extérieure et la valeur de TA

Association testée	Groupe	Nombre d'individus	Moyenne	Degré de signification (p)
Localisation du box	<i>Intérieur</i>	21	35,83	0,82
	<i>Extérieur</i>	15	35,79	
Température extérieure	$< 15^{\circ}\text{C}$	21	35,81	0,96
	$\geq 15^{\circ}\text{C}$	15	35,82	

4.3.1 Détection des hyperthermes

Pour rappel, nous avons défini un hypertherme vrai comme un individu ayant une température rectale supérieure ou égale à $38,5^{\circ}\text{C}$. Nous avons fixé le seuil d'hyperthermie par méthode axillaire à $36,6^{\circ}\text{C}$. Cela correspond à la valeur de $38,5^{\circ}\text{C}$ (hyperthermie par méthode rectale), soustraite de $1,9^{\circ}\text{C}$, « biais » calculé entre la méthode axillaire brute et la méthode rectale. Le Tableau 21 résume

le nombre de chevaux hyperthermes et normothermes obtenus par méthode axillaire et par méthode rectale parmi les individus pris en compte. Les individus 1 à 39 ont été pris en compte (Temps 1) ainsi que les individus 40 et 47 (hyperthermes lors du Temps 2).

Tableau 21 : Détection des hyperthermes par la méthode axillaire avec thermomètre électronique

	Hypertherme (TR ≥ 38,5°C)	Normotherme (TR < 38,5°C)	
Hypertherme par méthode axillaire	2	4	6
Normotherme par méthode axillaire	3	32	35
	5	36	

À partir ce tableau, différents indicateurs ont été calculés et reportés dans le Tableau 22, à partir des formules détaillées dans la partie 4.3.

Tableau 22 : Indicateurs calculés pour la méthode axillaire pour le dépistage de l'hyperthermie

Indicateur	Sensibilité	Spécificité	Valeur prédictive positive	Valeur prédictive négative
	40%	89%	33%	91%

5 Évaluation de la prise de température du bout du nez mesurée avec un thermomètre infrarouge sans contact

5.1 Étude des résultats obtenus avec le TISCP ANKOVO®

5.1.1 Répétabilité et reproductibilité inter-opérateurs

Pour l'évaluation de la répétabilité, les mesures ont été réalisées sur 39 chevaux (individus 1 à 39) par l'opérateur principal, Léna LEGRAND. Pour la reproductibilité, les mesures ont été réalisées sur 13 chevaux (individus 1 à 13) par l'opérateur principal puis par l'opérateur secondaire Chloé HERVÉ. Les résultats obtenus sont détaillés dans le Tableau 23.

Tableau 23 : Résultats obtenus pour l'évaluation de la répétabilité et de la reproductibilité de la méthode du bout du nez avec le TISCP ANKOVO® (Desquilbet, 2019)

		Répétabilité	Reproductibilité
Méthode numérique du CCC de Lin	CCC de Lin obtenu	0,88	0,92
	Intervalle de confiance à 95%	[0,78 ; 0,93]	[0,75 ; 0,98]
	Part de mauvaise concordance expliquée par manque de précision	90%	82%
	Part de mauvaise concordance expliquée par manque d'exactitude	10%	18%
	Interprétation du CCC de Lin (Landis et Koch, 1997)	Très bonne	Très bonne
Méthode graphique de Bland et Altman	Valeur du « biais » observé	+0,013	-0,023
	Intervalle de confiance à 95% du « biais » observé	[-0,06 ; 0,085]	[-0,159 ; +0,112]
	Vérification du critère X avec X=0,200	Oui	Oui
	Limites d'agrément	[-0,426 ; +0,451]	[-0,462 ; +0,416]
	Vérification du critère Y avec Y=0,300	Non	Non

5.1.2 Concordance avec la méthode rectale

Comme pour la méthode axillaire, la méthode du bout du nez évaluée avec le TISCP ANKOVO® sous-estimait quasi systématiquement la méthode rectale. La valeur corrective a été déterminée de la même façon que pour la méthode axillaire (voir 4.2).

Pour ce calcul, les mesures ont été réalisées sur 41 individus (individus 1 à 40 et 47) par l'opérateur principal. En effet, nous avons choisi d'ajouter aux 39 premiers individus mesurés lors du temps n°1, les hyperthermes (selon TR) mis en évidence lors du temps n°2. La première série de mesures a été prise en compte pour les calculs. La valeur corrective (« biais ») et les résultats obtenus pour l'évaluation de la concordance sont consignés dans les Tableaux 24 et 25.

Tableau 24 : "Biais" et intervalle de confiance à 95% entre les séries TN1 brute et TR

« Biais »	Intervalle de confiance à 95%
1,388	[1,152 ; 1,664]

Les méthodes ont alors été appliquées entre les séries TN1_{corrigée} et TR.

Tableau 25 : Résultats obtenus pour l'évaluation de la concordance entre la méthode du bout du nez corrigée (TN1_{corrigée}) et la méthode rectale (TR) (Desquilbet, 2019)

Méthode numérique du CCC de Lin	CCC de Lin obtenu	-0,10
	Intervalle de confiance à 95%	[-0,39 ; 0,12]
	Interprétation du CCC de Lin (Landis et Koch, 1997)	Très mauvais
Méthode graphique de Bland et Altman	Valeur du « biais » observé	0
	Vérification du critère X avec X=0,200	Oui
	Limites d'agrément	[-1,464 ; +1,464]
	Vérification du critère Y avec Y=0,300	Non

5.1.3 Association entre différents paramètres et les données collectées

Les résultats des tests de Student, réalisés grâce au site internet BiostaTGV, sont résumés dans le Tableau 26. Les animaux hyperthermes (TR \geq 38,5°C) n'ont pas été inclus. Les conditions des tests ont toutes été vérifiées au préalable.

Tableau 26 : Évaluation de l'association entre la localisation du box et la valeur de TN1 et entre la température extérieure et la valeur de TN1

Association testée	Groupe	Nombre d'individus	Moyenne	Degré de signification (p)
Localisation du box	<i>Intérieur</i>	29	36,46	0,52
	<i>Extérieur</i>	18	36,39	
Température extérieure	$\leq 15^{\circ}\text{C}$	25	36,25	7,22⁻⁶
	$> 15^{\circ}\text{C}$	22	36,64	

5.1.4 Détection des hyperthermes

Nous avons choisi de fixer le seuil de détection de l'hyperthermie par méthode du bout du nez à 37,1°C, correspondant à la température rectale seuil diminuée du « biais moyen » entre les deux séries (rectale et bout du nez). Cependant, le TISCP ANKOVO® n'a détecté aucun hypertherme avec cette méthode.

5.2 Comparaison des séries de mesure obtenues avec les deux TISCP lors de l'évaluation de la température du bout du nez

Pour ce calcul, les mesures ont été réalisées sur 15 chevaux par l'opérateur principal.

Tableau 27 : Résultats obtenus pour l'évaluation de la concordance entre les séries de mesures obtenues avec les deux TISCP pour la méthode du bout du nez (Desquilbet, 2019)

Méthode numérique du CCC de Lin	CCC de Lin obtenu	0,58
	Intervalle de confiance à 95%	[0,19 ; 0,81]
	Part de mauvaise concordance expliquée par manque de précision	47%
	Part de mauvaise concordance expliquée par manque d'exactitude	53%
	Interprétation du CCC de Lin (Landis et Koch, 1997)	Moyenne
Méthode graphique de Bland et Altman	Valeur du « biais » observé	-0,107
	Intervalle de confiance à 95% du « biais » observé	[-0,183 ; -0,03]
	Limites d'agrément	[-0,379 ; 0,165]

6 Évaluation de la prise de température du canthus médial de l'œil mesurée avec un thermomètre infrarouge sans contact

6.1 Étude des résultats obtenus avec le TISCP ANKOVO®

6.1.1 Répétabilité et reproductibilité inter-opérateurs

Pour l'évaluation de la répétabilité, les mesures ont été réalisées sur 39 chevaux (individus 1 à 39) par l'opérateur principal, Léna LEGRAND. Pour la reproductibilité, les mesures ont été réalisées sur 13 chevaux (individus 1 à 13) par l'opérateur principal puis par l'opérateur secondaire Chloé HERVÉ. Les résultats sont rapportés dans le Tableau 28.

Tableau 28 : Résultats obtenus pour l'évaluation de la répétabilité de la méthode du canthus médial avec le TISCP ANKOVO® (Desquilbet, 2019)

		Répétabilité	Reproductibilité
Méthode numérique du CCC de Lin	CCC de Lin obtenu	0,89	0,45
	Intervalle de confiance à 95%	[0,80 ; 0,94]	[-0,15 ; +0,81]
	Part de mauvaise concordance expliquée par manque de précision	99%	92%
	Part de mauvaise concordance expliquée par manque d'exactitude	1%	8%
	Interprétation du CCC de Lin (Landis et Koch, 1997)	Très bonne	Moyenne
Méthode graphique de Bland et Altman	Valeur du « biais » observé	-0,018	-0,077
	Intervalle de confiance à 95% du « biais » observé	[-0,057 ; 0,036]	[-0,217 ; +0,063]
	Vérification du critère X avec X=0,200	Oui	Oui
	Limites d'agrément	[-0,290 ; +0,270]	[-0,531 ; +0,377]
	Vérification du critère Y avec Y=0,300	Oui	Non

6.1.2 Concordance avec la méthode rectale

Comme pour les méthodes précédentes, la méthode du canthus médial évaluée avec le TISCP ANKOVO® sous-estimait quasi systématiquement la méthode rectale. La valeur corrective a été déterminée de la même façon que pour la méthode axillaire (voir 4.2).

Pour ce calcul, les mesures ont été réalisées sur 41 individus (individus 1 à 40 et 47) par l'opérateur principal. La première série de mesures a été prise en compte pour les calculs. La valeur corrective (« biais ») et les résultats obtenus pour l'évaluation de la concordance sont consignés dans les Tableaux 29 et 30.

Tableau 29 : "Biais" et intervalle de confiance à 95% entre les séries TCa1 brute et TR

« Biais »	Intervalle de confiance à 95%
+ 0,920	[0,744 ; 1,095]

Les méthodes sont alors appliquées entre les séries TCa1 ajoutée du biais (TCa1_{corrigée}) et TR (Tableau 30)

Tableau 30 : Résultats obtenus pour l'évaluation de la concordance entre la méthode du canthus médial corrigée (TCa1_{corrigée}) et la méthode rectale (TR) (Desquilbet, 2019)

Méthode numérique du CCC de Lin	CCC de Lin obtenu	0,29
	Intervalle de confiance à 95%	[0,03 ; 0,52]
	Part de mauvaise concordance expliquée par manque de précision	88%
	Part de mauvaise concordance expliquée par manque d'exactitude	12%
	Interprétation du CCC de Lin (Landis et Koch, 1997)	Passable
Méthode graphique de Bland et Altman	Valeur du « biais » observé	0
	Vérification du critère X avec X=0,200	Oui
	Limites d'agrément	[-1,090; +1,089]
	Vérification du critère Y avec Y=0,300	Non

6.1.3 Association entre différents paramètres et les données collectées

Après exclusion des hyperthermes et vérification des conditions préalables, les tests de Student sont réalisés (Tableau 31).

Tableau 31 : Évaluation de l'association entre la localisation du box et la valeur de TCa1 et entre la température extérieure et la valeur de TCa1

Association testée	Groupe	Nombre d'individus	Moyenne	Degré de signification (p)
Localisation du box	<i>Intérieur</i>	29	36,79	0,91
	<i>Extérieur</i>	18	36,78	
Température extérieure	$\leq 15^{\circ}\text{C}$	25	36,72	0,08
	$> 15^{\circ}\text{C}$	22	36,85	

6.1.4 Détection des hyperthermes

On considère le seuil de l'hyperthermie pour cette méthode à 37,6°C. Le Tableau 32 résume le nombre de chevaux hyperthermes et normothermes obtenus par méthode du canthus médial (TISCP ANKOVO®) et par méthode rectale parmi les individus 1 à 52.

Tableau 32 : Détection des hyperthermes par la méthode du canthus médial avec le TISCP ANKOVO®

	Hypertherme (TR ≥ 38,5°C)	Normotherme (TR < 38,5°C)	
Hypertherme d'après le TISCP	2	1	3
Normotherme d'après le TISCP	3	46	49
	5	47	

À partir ce tableau, différents indicateurs ont été calculés et reportés dans le Tableau 33, à partir des formules détaillées dans la partie 4.3.

Tableau 33 : Indicateurs calculés pour la méthode du canthus médial pour le dépistage de l'hyperthermie

Indicateur	Sensibilité	Spécificité	Valeur prédictive positive	Valeur prédictive négative
	40%	98%	67%	94%

6.2 Comparaison des séries de mesure obtenues avec les deux TISCP lors de l'évaluation de la température du canthus médial de l'œil

Pour ce calcul, les mesures ont été réalisées sur 15 chevaux par l'opérateur principal.

Tableau 34 : Résultats obtenus pour l'évaluation de la concordance entre les séries de mesures obtenues avec les deux TISCP pour la méthode du canthus médial (Desquilbet, 2019)

Méthode numérique du CCC de Lin	CCC de Lin obtenu	0,37
	Intervalle de confiance à 95%	[-0,15 ; 0,73]
	Part de mauvaise concordance expliquée par manque de précision	90%
	Part de mauvaise concordance expliquée par manque d'exactitude	10%
	Interprétation du CCC de Lin (Landis et Koch, 1997)	Passable
Méthode graphique de Bland et Altman	Valeur du « biais » observé	0,053
	Intervalle de confiance à 95% du « biais » observé	[-0,155 ; 0,261]
	Limites d'agrément	[-0,683 ; 0,790]

7 Évaluation de la prise de température du cornéenne mesurée avec un thermomètre infrarouge sans contact

7.1 Étude des résultats obtenus avec le TISCP ANKOVO®

7.1.1 Répétabilité et reproductibilité inter-opérateurs

Pour l'évaluation de la répétabilité, les mesures ont été réalisées sur 39 chevaux (individus 1 à 39) par l'opérateur principal, Léna LEGRAND. Pour la reproductibilité, les mesures ont été réalisées sur 13 chevaux (individus 1 à 13) par l'opérateur principal puis par l'opérateur secondaire Chloé HERVÉ. Les résultats obtenus sont résumés dans le Tableau 35.

Tableau 35 : Résultats obtenus pour l'évaluation de la répétabilité et de la reproductibilité de la méthode cornéenne avec le TISCP ANKOVO® (Desquilbet, 2019)

		Répétabilité	Reproductibilité
Méthode numérique du CCC de Lin	CCC de Lin obtenu	0,90	0,80
	Intervalle de confiance à 95%	[0,81 ; 0,95]	[0,42 ; 0,94]
	Part de mauvaise concordance expliquée par manque de précision	98%	99%
	Part de mauvaise concordance expliquée par manque d'exactitude	2%	1%
	Interprétation du CCC de Lin (Landis et Koch, 1997)	Très bonne	Bonne
Méthode graphique de Bland et Altman	Valeur du « biais » observé	-0,013	0
	Intervalle de confiance à 95% du « biais » observé	[-0,053 ; 0,027]	Non nécessaire
	Vérification du critère X avec X=0,200	Oui	Oui
	Limites d'agrément	[-0,256 ; +0,230]	-0,310 ; +0,310]
	Vérification du critère Y avec Y=0,300	Oui	Non

7.1.2 Concordance avec la méthode rectale

Comme pour la méthode axillaire, la méthode cornéenne évaluée avec le TISCP ANKOVO® sous-estimait quasi systématiquement la méthode rectale. Une valeur corrective a été déterminée de la même façon que pour la méthode axillaire (voir 4.2).

Pour ce calcul, les mesures ont été réalisées sur 40 individus (individus 1 à 40) par l'opérateur principal. La première série de mesures a été prise en compte pour les calculs. La valeur corrective (« biais ») et les résultats obtenus pour l'évaluation de la concordance sont consignés dans les Tableaux 36 et 37.

Tableau 36 : "Biais" et intervalle de confiance à 95% entre les séries TCo1 brute et TR

« Biais »	Intervalle de confiance à 95%
+ 0,966	[0,794 ; 1,138]

Les méthodes sont alors appliquées entre les séries TCo1 ajoutée du « biais » (TCo1_{corrigée}) et TR.

Tableau 37 : Résultats obtenus pour l'évaluation de la concordance entre la méthode du cornéenne corrigée (TCo1_{corrigée}) et la méthode rectale (Desquilbet, 2019)

Méthode numérique du CCC de Lin	CCC de Lin obtenu	0,28
	Intervalle de confiance à 95%	[0,03 ; 0,50]
	Part de mauvaise concordance expliquée par manque de précision	83%
	Part de mauvaise concordance expliquée par manque d'exactitude	17%
	Interprétation du CCC de Lin (Landis et Koch, 1997)	Passable
Méthode graphique de Bland et Altman	Valeur du « biais » observé	0
	Vérification du critère X avec X=0,200	Oui
	Limites d'agrément	[-1,070 ; +1,069]
	Vérification du critère Y avec Y=0,300	Non

7.1.3 Association entre différents paramètres et les données collectées

Les résultats des tests de Student, sont résumés dans le Tableau 38.

Tableau 38 : Évaluation de l'association entre la localisation du box et la valeur de TCo1 et entre la température extérieure et la valeur de TCo1

Association testée	Groupe	Nombre d'individus	Moyenne	Degré de signification (p)
Localisation du box	<i>Intérieur</i>	29	36,73	0,99
	<i>Extérieur</i>	18	36,73	
Température extérieure	$\leq 15^{\circ}\text{C}$	25	36,70	0,35
	$> 15^{\circ}\text{C}$	22	36,75	

7.1.4 Détection des hyperthermes

On considère le seuil de l'hyperthermie pour cette méthode à 37,5°C. Le Tableau 39 résume le nombre de chevaux hyperthermes et normothermes obtenus par méthode cornéenne (TISCP ANKOVO®) et par méthode rectale parmi les individus 1 à 52.

Tableau 39 : Détection des hyperthermes par la méthode cornéenne avec le TISCP ANKOVO®

	Hypertherme (TR ≥ 38,5°C)	Normotherme (TR < 38,5°C)	
Hypertherme d'après le TISCP	2	0	2
Normotherme d'après le TISCP	3	47	50
	5	47	

À partir ce tableau, différents indicateurs ont été calculés et reportés dans le Tableau 40, à partir des formules détaillées dans la partie 4.3.

Tableau 40 : Indicateurs calculés pour la méthode cornéenne pour le dépistage de l'hyperthermie

Indicateur	Sensibilité	Spécificité	Valeur prédictive positive	Valeur prédictive négative
	40%	100%	100%	94%

7.2 Comparaison des séries de mesure obtenues avec les deux TISCP lors de l'évaluation de la température cornéenne

Pour ce calcul, les mesures ont été réalisées sur 15 chevaux par l'opérateur principal.

Tableau 41 : Résultats obtenus pour l'évaluation de la concordance entre les séries de mesures obtenues avec les deux TISCP pour la méthode cornéenne (Desquilbet, 2019)

Méthode numérique du CCC de Lin	CCC de Lin obtenu	0,62
	Intervalle de confiance à 95%	[0,17 ; 0,86]
	Part de mauvaise concordance expliquée par manque de précision	82%
	Part de mauvaise concordance expliquée par manque d'exactitude	18%
	Interprétation du CCC de Lin (Landis et Koch, 1997)	Bonne
Méthode graphique de Bland et Altman	Valeur du « biais » observé	-0,087
	Intervalle de confiance à 95% du « biais » observé	[-0,214 ; 0,04]
	Limites d'agrément	[-0,536 ; 0363]

8 Bilan sur la validation des différentes méthodes

Le Tableau 42 résume les résultats obtenus pour les quatre méthodes testées, concernant la répétabilité, la reproductibilité inter-opérateurs et la concordance avec la température rectale.

Tableau 42 : Bilan des résultats de répétabilité, reproductibilité inter-opérateurs et concordance avec la température rectale pour les différentes méthodes testées

		<i>Axillaire</i>	<i>Bout du nez</i>	<i>Canthus médial</i>	<i>Cornée</i>
Répétabilité	CC de Lin	0,87	0,88	0,89	0,90
	X vérifié	Oui	Oui	Oui	Oui
	Y vérifié	Non	Non	Oui	Oui
Reproductibilité inter-opérateurs	CC de Lin	0,79	0,92	0,45	0,80
	X vérifié	Non	Oui	Oui	Oui
	Y vérifié	Non	Non	Non	Non
Concordance	CC de Lin	0,19	-0,10	0,29	0,28
	X vérifié	Oui	Oui	Oui	Oui
	Y vérifié	Non	Non	Non	Non

Quatrième partie : Discussion des résultats

1 Discussion des résultats

1.1 Facilité de mise en œuvre des méthodes testées

La recherche de méthodes de mesure de la température alternatives à la température rectale est principalement motivée par l'insécurité et l'intolérance associées à certains individus. De cette façon, avant même de fournir des valeurs fiables de la température corporelle, les méthodes testées doivent se montrer sécuritaires, bien tolérées par l'animal et rapides d'acquisition.

Parmi les méthodes testées, l'écart de durée d'acquisition était particulièrement élevé entre les thermomètres infrarouges sans contact portables et le thermomètre électronique digital. Les deux TISCP testés ont fourni des valeurs de température en moins de trois secondes, indifféremment du site de mesure. Cette caractéristique était déjà mentionnée dans la littérature comme étant l'un de ses principaux avantages (Muhammed *et al.*, 2019) et a été l'une des justifications à son utilisation massive durant l'épidémie de COVID-19 (Aggarwal *et al.*, 2020). Chez le cheval, cela pourrait être particulièrement intéressant dans le cadre d'un dépistage de l'hyperthermie à grande échelle, sur les terrains de concours par exemple. Le thermomètre électronique digital a quant à lui montré des durées d'acquisition plus élevées. Pour la température rectale, cette durée était relativement acceptable, avec un affichage en quelques secondes la plupart du temps, concordant avec le délai mentionné par le fabricant. Cependant, cela suffisait parfois à rendre le cheval impatient, se traduisant par des mouvements de l'animal, des fouillements de la queue, ou encore des coups de sabots au sol. Concernant la température axillaire, nous avons rapidement constaté la variabilité de la durée d'acquisition d'un cheval à l'autre. Pour la mettre en évidence, nous avons quantifié cette durée sur 10 chevaux. Les durées d'acquisition (Tableau 14) allaient alors de 13 à 78 secondes, et étaient comprises entre 18 et 38 secondes pour la moitié des chevaux, avec une médiane à 30 secondes. Cela signifie que la mesure axillaire était quasi systématiquement plus longue que la mesure rectale, et cet écart pouvait être de plusieurs dizaines de secondes dans certains cas. Outre l'aspect chronophage de la méthode, on peut facilement imaginer que cela pourrait conduire à des erreurs sur la mesure. Le cheval pourrait être coopératif au début de la mesure puis s'impatienter au cours de l'acquisition, conduisant à des mouvements de l'animal, voire uniquement de l'antérieur concerné, déplaçant l'outil et modifiant la mesure. Aussi, un opérateur pressé ou impatient pourrait ne pas laisser le temps au thermomètre de se stabiliser, et pourrait conduire à une mesure erronée de la température. C'est un inconvénient qui avait déjà été relevé en médecine humaine (Moran et Mendal, 2002; Sermet-Gaudelus *et al.*, 2005). Dans ces conditions, la mesure axillaire ne semble pas être une bonne alternative dans le cadre d'une compétition ou d'un contrôle sanitaire de grande ampleur.

L'évaluation de la tolérance des différentes méthodes de mesure de la température a montré des résultats plutôt homogènes. En effet, pour toutes les méthodes testées, la grande majorité des chevaux évalués présentaient une note de 1/4, ce qui correspondait d'après le barème

préalablement établi (Tableau 6) à une « Mesure très aisée ». Néanmoins, quelques subtilités ont été relevées. La méthode du bout du nez était la méthode la mieux tolérée par les chevaux de notre étude. Dans les rares cas où les chevaux ont reçu une note de 2/4 pour cette méthode, cela était dû à des légers mouvements de la lèvre supérieure, probablement causés par un effleurement des vibrisses du bout du nez par l'opérateur. Cette excellente tolérance était attendue car la méthode du bout du nez ne nécessite ni contact ni contention particulière. Les méthodes cornéenne et du canthus médial de l'œil, ont été légèrement moins bien tolérées. Dix chevaux ont montré une note de 2 à 3 sur 4, mais la mesure a toujours été réalisable. Dans ces derniers cas, les mouvements d'échappement correspondaient à des mouvements de tête plus ou moins importants, soit lorsque l'opérateur maintenait les paupières, soit lorsque l'outil était approché. Cela était peu surprenant du fait de la manipulation de l'œil auquel les chevaux sont rarement habitués, et de la proximité de l'outil avec l'œil. Nous avons, à l'inverse, plutôt constaté avec surprise que les chevaux étaient assez coopératifs à cette manipulation, même les plus jeunes. Ce constat avait déjà été réalisé dans une étude précédente (Carter *et al.*, 2019). La méthode axillaire a montré approximativement les mêmes résultats que les mesures oculaires. Les notes de 2 ou 3 sur 4 étaient la plupart du temps associées à une durée d'acquisition particulièrement longue. Les chevaux présentaient alors des mouvements de piétinement de l'antérieur gauche (concerné par la mesure) ou d'échappement de l'ensemble du corps. Cela est assez facilement justifiable par la pression assez importante du thermomètre contre la paroi thoracique, qui pouvait être inconfortable pour l'animal, notamment lorsque la mesure s'éternisait. Enfin, la température rectale était étonnamment bien tolérée par les chevaux évalués, ce qui était pourtant la raison pour laquelle une méthode alternative était recherchée. Cependant, c'est l'unique méthode de mesure pour laquelle l'opérateur s'est jugé en danger lors de la mesure sur un des individus. Ainsi, la tolérance est ici à nuancer. Seuls 39 chevaux ont été évalués dans notre étude. Ces 39 chevaux étaient tous au box, dans un environnement calme. Ces chevaux étaient soit des chevaux hospitalisés, soit des chevaux d'enseignement. Or, les chevaux de la Clinique Équine de l'ENVA sont examinés à minima deux fois par jour, examen associé à chaque fois à une prise de température rectale. Les chevaux étaient donc pour la plupart familiers avec la mesure rectale et dans un environnement qui n'était pas propice à l'excitation : les résultats auraient probablement été différents dans un autre contexte. Ainsi, aucune des méthodes testées n'est, selon nous, excluable sur la base de la tolérance de l'animal. Néanmoins, la méthode du bout du nez était la mieux tolérée. Une habitude à la manipulation de l'œil pourrait potentiellement faciliter les mesures en région oculaire.

1.2 Répétabilité et reproductibilité des différentes méthodes de mesure

La répétabilité et la reproductibilité d'une méthode de mesure étant des critères indispensables à l'évaluation d'une méthode de mesure de la température, elles ont été évaluées, pour chaque méthode testée, en prenant pour référence la méthode rectale.

La méthode axillaire présentait un coefficient de concordance de Lin de 0,87 pour la répétabilité et de 0,79 pour la reproductibilité inter-opérateurs. Ces coefficients étaient assez satisfaisants en comparaison avec la méthode rectale dont les coefficients étaient respectivement de 0,96 et 0,95. Cependant, sur un plan clinique, les limites d'agrément de la répétabilité et de la reproductibilité inter-opérateurs étaient au-delà des limites maximales acceptables, ce qui signifiait que 95% des écarts entre les deux séries étaient compris dans un intervalle trop large pour pouvoir considérer la méthode comme répétable et reproductible. De plus, la reproductibilité ne remplissait

pas non plus le critère X, donc le « biais » moyen entre les deux séries était supérieur à la limite fixée préalablement. La répétabilité aurait pu, d'après les résultats, être améliorée par augmentation de la précision, par réduction des erreurs aléatoires. Un placement de l'outil plus précis et standardisé aurait pu être une solution, néanmoins il semble difficile à mettre en place. En effet, l'opérateur est soumis aux mouvements de l'animal, d'autant plus importants que la valeur met du temps à se stabiliser. Ils peuvent dès lors modifier le placement de l'antérieur de l'animal entre les deux mesures et ne pas permettre de placer l'outil à l'identique. On peut aussi supposer qu'une modification de la position du coude par rapport au thorax peut modifier la température mesurée. La problématique était la même pour la reproductibilité, dont la part de manque de précision dans la valeur du CCC de Lin était de 57%. Cependant, une part non négligeable du manque de concordance était aussi due à un défaut d'exactitude, lors de l'évaluation de la reproductibilité. Il semblait que l'opérateur secondaire avait tendance à surestimer la température axillaire par rapport à l'opérateur principal. On peut penser que le positionnement de l'outil était légèrement différent d'un opérateur à l'autre, modifiant la zone de contact de la sonde du thermomètre avec le thorax et ainsi la mesure qui en découlait.

La méthode du bout du nez fournissait des coefficients de concordance de Lin « très bons », tant pour la répétabilité que pour la reproductibilité. Cette méthode était la plus reproductible statistiquement, parmi les méthodes testées. Cependant, pour les deux critères évalués, les limites d'agrément n'étaient pas incluses dans l'intervalle maximal admis, bien qu'étant relativement proches de celui-ci. Le « biais » maximal était à chaque fois respecté. Ces résultats assez satisfaisants étaient attendus : la zone du bout du nez était aisément accessible et la mesure bien tolérée par l'animal, ce qui permettait un placement optimal et standardisé de l'outil par rapport à la zone mesurée. L'amélioration de la précision aurait pu permettre de réduire les limites d'agrément et de fournir une répétabilité et une reproductibilité cliniquement acceptables. Cela aurait potentiellement été possible en se plaçant une distance strictement constante de la surface du bout du nez, ce qui est, en pratique, difficilement réalisable.

Les méthodes oculaires réalisées avec le TISCP ANKOVO® montraient toutes les deux de très bonnes répétabilités avec des coefficients de concordance de Lin voisins de celui de la répétabilité rectale. De plus, les conditions X et Y étaient respectées, ce qui permettait de les considérer répétables sur un plan statistique et clinique. Néanmoins, une grande différence de reproductibilité inter-opérateurs a été constatée, avec un CCC de Lin de 0,80 pour la méthode cornéenne et de 0,45 pour la méthode du canthus médial. Cela était attendu, car le thermomètre infrarouge sans contact ne possède pas de « pointeur » ou de signal lumineux permettant à l'utilisateur de localiser exactement la zone qui est mesurée par le thermomètre. Ainsi, selon l'appréciation de l'opérateur, le placement du thermomètre et donc la zone mesurée peut légèrement différer d'un utilisateur à l'autre et modifier les résultats obtenus. Cette difficulté était particulièrement vraie pour la méthode du canthus médial, car la cornée est suffisamment large pour que le placement de l'opérateur influence moins la mesure. Ainsi, un outil avec un marqueur permettant de cibler la zone d'intérêt pourrait permettre d'augmenter la précision.

Concernant la répétabilité et la reproductibilité inter-opérateurs, c'est donc la méthode cornéenne qui a fourni les meilleurs résultats. Les méthodes du bout du nez et axillaire sont assez satisfaisantes mais pourraient être améliorées par un placement plus standardisé. La méthode du canthus médial présente quant à elle un net défaut de reproductibilité inter-opérateurs.

1.3 Concordance des méthodes testées avec la température rectale

Pour toutes les méthodes testées, les mesures obtenues étaient quasi systématiquement inférieures à la température rectale associée. Ainsi, pour pouvoir vérifier la concordance de la méthode testée avec la méthode rectale, nous avons déterminé des valeurs correctives pour chaque méthode, correspondant au « biais » entre les mesures brutes avec la méthode testée et les mesures avec la méthode rectale. Un coefficient de concordance de Lin et un graphique de Bland et Altman ont alors pu être établis.

La méthode axillaire affichait les valeurs les plus basses par rapport à la méthode rectale. En ajoutant le « biais » de 1,880°C comme valeur correctrice pour cette méthode, le coefficient de concordance obtenu était mauvais. En particulier, les limites d'agrément étaient beaucoup trop larges pour pouvoir fournir un outil fiable de mesure de la température en clinique, par rapport à la thermométrie rectale. À nouveau, une réduction des erreurs aléatoires avec un placement de l'outil plus constant pourrait légèrement améliorer la concordance.

Concernant la méthode du bout du nez, le calcul de la concordance avec la température rectale à partir de la série corrigée du « biais » a montré une très mauvaise concordance avec la température rectale, avec un coefficient de concordance de Lin négatif correspondant à une discordance complète entre les méthodes.

Pour les méthodes oculaires, des biais de 0,920 pour la méthode du canthus médial et de 0,966 pour la méthode cornéenne ont été calculés. En les ajoutant aux valeurs initiales de leurs séries de mesure respectives, des coefficients de concordance de Lin similaires pour les deux méthodes ont été déterminés (0,29 et 0,28 respectivement). Cela correspondait à des concordances « passables ». Néanmoins, les limites d'agrément étaient dans les deux cas d'environ $\pm 1^\circ\text{C}$, ce qui ne permettait pas de valider ces méthodes sur le plan clinique.

1.4 Sensibilité, spécificité, valeurs prédictives positive et négative

La méthode de mesure au bout du nez n'a été capable de détecter aucun animal hypertherme réel. Ainsi, elle ne fournit pas une méthode alternative valable, ni dans un cadre de dépistage, ni dans un cadre de mesure précise de la température corporelle, et ne sera pas traitée dans cette partie.

Les méthodes axillaire, du canthus médial de l'œil et cornéenne présentaient toutes trois une sensibilité de 40% pour la détection de l'hyperthermie dans notre échantillon. La méthode cornéenne fournissait une excellente spécificité (100%), tout comme la méthode du canthus médial (98%). La méthode axillaire a elle aussi montré une très bonne spécificité (89%). Concernant les valeurs prédictives positives et négatives, nous avons obtenu pour la méthode axillaire, la méthode du canthus médial et la méthode cornéenne, respectivement les résultats suivants : 33 et 91%, 67 et 94% et 100 et 94%.

L'interprétation des valeurs prédictives positive (VPP) et négative (VPN) est délicate. Nous avons vu que plus la VPP est proche de 100%, plus on est confiant quant à l'hyperthermie réelle de l'individu suite à un résultat positif du test (Desquilbet, 2023b). De la même façon, plus la VPN est

proche de 100%, plus on est confiant dans le fait de penser que l'individu est sain suite à un résultat négatif du test. Dans un cadre de médecine individuelle, nous avons aussi vu (voir partie 4.3) que nos calculs de VPP et VPN étaient basés sur deux conditions bien précises telles que le taux de prévalence de l'hyperthermie dans l'échantillon était à priori proche de celui dans la population (qui est celle des chevaux séjournant à la Clinique Équine de l'ENVA) et que l'hyperthermie était totalement asymptomatique, sans caractéristique potentiellement liée dont la présence ou l'absence pouvait influencer dans l'évaluation à priori de la présence (ou de l'absence) de l'hyperthermie chez l'individu. Or, dans notre cas, on peut aisément penser qu'il existe tout de même des éléments pouvant influencer la présence d'hyperthermie (motif d'hospitalisation, intervention chirurgicale, statut vaccinal, traitements reçus, etc.). De cette façon, les valeurs prédictives que nous avons calculées sont à interpréter avec précaution, et il serait plus rigoureux de calculer, pour chaque individu, des valeurs prédictives prenant en compte ces éléments. L. Desquilbet fournit les formules suivantes (Desquilbet, 2023b) :

Figure 18 : Formule de calcul des valeurs prédictives positive et négative dans un contexte de médecine individuelle (Desquilbet, 2023b)

$$VPP = \frac{Se \times P_{pré}}{(Se \times P_{pré}) + ((1 - Sp) \times (1 - P_{pré}))}$$

$$VPN = \frac{Sp \times (1 - P_{pré-test})}{(Sp \times (1 - P_{pré})) + ((1 - Se) \times P_{pré})}$$

avec :

- $P_{pré}$: « probabilité pré-test » qu'a l'individu de présenter la maladie avant d'avoir le résultat du test, à partir de son tableau clinique.
- Sp : Spécificité
- Se : Sensibilité

Ainsi, pour pouvoir calculer des VPP ou VPN justes, il aurait fallu établir préalablement des valeurs de $P_{pré}$ (subjectives) pour chaque individu. La valeur de la VPP (ou de la VPN) aurait été une probabilité « post-test », et aurait alors pu être interprétée en connaissance de la probabilité « pré-test ». De plus, une autre nuance à apporter quant à l'interprétation des valeurs prédictives est la suivante : une valeur élevée de la VPN (comme dans nos cas) ne traduit pas forcément une grande utilité du test quand son résultat est négatif. En effet, l'utilité d'un test repose sur la quantité d'information apportée par un résultat négatif (ou positif) d'un test diagnostique, correspondant à la différence entre la probabilité « pré-test » définie et la probabilité « post-test » obtenue, selon que le résultat du test est positif ou bien négatif. Les meilleurs indicateurs pour quantifier cette utilité sont les rapports de vraisemblance (RV), définis par :

Figure 19 : Formules de calcul des rapports de vraisemblance (Desquilbet, 2023b)

$$RV^+ = \frac{Se}{1 - Sp}$$

$$RV^- = \frac{(1 - Se)}{Sp}$$

avec :

- RV^+ : Rapport de Vraisemblance positif. Quantifie la différence entre la probabilité pré-test et la probabilité post-test dans la situation où le résultat du test diagnostique a été positif.
- RV^- : Rapport de Vraisemblance positif. Quantifie la différence entre la probabilité pré-test et la probabilité post-test dans la situation où le résultat du test diagnostique a été négatif.

De cette façon, afin de juger de l'utilité de nos tests pour détecter l'hyperthermie, il aurait probablement été judicieux de déterminer ces rapports. Le Tableau 43 rassemble les résultats obtenus pour ces calculs :

Tableau 43 : Calcul des rapports de vraisemblance pour les méthodes axillaire, du canthus médial et cornéenne

	RV^+	RV^-	$1/RV^-$
Méthode axillaire	3,6	0,674	1,46
Méthode du canthus médial	20	0,61	1,64
Méthode cornéenne	Non nécessaire	0,6	1,67

À noter que le calcul de RV^+ dans le cadre de la méthode cornéenne est inutile car un résultat positif correspondait nécessairement à un individu positif dans notre étude (spécificité = 100%).

Leur interprétation repose alors sur la classification suivante (Desquilbet, 2023b) :

Tableau 44 : Apport d'information de la part d'un test diagnostique lorsque son résultat est positif selon la valeur du rapport de vraisemblance positif (RV^+) (d'après Hayden et Brown, 1999)

Valeur de RV^+	Apport d'information suite au résultat positif du test	Utilité du test diagnostique lorsque le résultat est positif
> 10	Important	Très utile
5-10	Modéré	Modérément utile
2-5	Faible	Faiblement utile
1-2	Quasi nul	Quasiment inutile
≤ 1	Nul	Inutile

Tableau 45 : Apport d'information de la part d'un test diagnostique lorsque son résultat est négatif selon la valeur de l'inverse du rapport de vraisemblance négatif ($1/RV^-$) (d'après Hayden et Brown, 1999)

Valeur de $1/RV^-$	Apport d'information suite au résultat négatif du test	Utilité du test diagnostique lorsque le résultat est négatif
> 10	Important	Très utile
5-10	Modéré	Modérément utile
2-5	Faible	Faiblement utile
1-2	Quasi nul	Quasiment inutile
≤ 1	Nul	Inutile

Ainsi, en conciliant les valeurs de sensibilité, de spécificité et des rapports de vraisemblance, il semble que la méthode cornéenne soit la méthode la plus informative concernant l'hyperthermie chez le cheval, bien que sa sensibilité de 40% ne lui permette pas de remplacer la méthode rectale.

1.5 Association entre les différents paramètres testés et les températures mesurées

Lors des mesures de températures avec les différentes méthodes, de nombreuses informations ont été relevées, concernant l'animal et le contexte de la mesure. Parmi celles-ci, nous avons choisi d'étudier l'association entre les températures mesurées et premièrement la température extérieure et deuxièmement la localisation du box de l'individu. Nous n'avons pas inclus les hyperthermes pour ces calculs pour ne pas biaiser les moyennes des groupes testés.

Pour pouvoir interpréter nos résultats, nous avons tout d'abord étudié l'association entre la température rectale et ces deux éléments. Pour les deux critères testés, les tests de Student fournissaient à chaque fois une valeur de p supérieure à 0,05. Cela signifiait que dans l'échantillon testé, la moyenne de la température rectale n'était pas significativement différente entre les chevaux logés à l'extérieur et logés à l'intérieur. Elle n'était donc pas non plus significativement différente entre ceux mesurés sous une température extérieure supérieure ou inférieure à 15°C.

Concernant l'association avec la localisation du box, les résultats ont été similaires pour toutes les méthodes testées. Aucun des tests de Student n'a fourni de valeur de p permettant de suggérer une association réelle entre l'appartenance à l'un des deux groupes (box à l'intérieur ou à l'extérieur) et la température mesurée avec la méthode testée. Il n'y avait donc aucune inférence possible. En revanche, concernant l'association avec la température extérieure, pour la méthode du bout du nez, le test de Student affichait une valeur de p inférieure à 0,05 ($p=7,22^{-6}$). Cela signifiait que dans l'échantillon, la moyenne de la température du bout du nez parmi les chevaux mesurés sous une température extérieure inférieure ou égale à 15°C était significativement inférieure à la moyenne de la température du bout du nez parmi les chevaux mesurés sous une température extérieure strictement supérieure à 15°C. Ainsi, sous l'hypothèse d'absence de biais d'association, chez le cheval, il y a des chances pour que la moyenne de la température du bout du nez soit réellement différente selon que la température extérieure est inférieure ou supérieure à 15°C. Ce n'est pas le cas pour les autres méthodes, pour lesquelles la valeur de p était supérieure à 0,05. Ces résultats n'étaient pas tous en accord avec la littérature. En humaine par exemple, la température axillaire est décrite comme l'une des méthodes les plus influencée par la température extérieure (Sermet-Gaudelus *et al.*, 2005).

1.6 Comparaison des deux thermomètres infrarouges sans contact portables

Avant de généraliser nos résultats à tous les modèles de TISCP, nous avons comparé deux modèles différents afin de savoir si les deux outils fournissaient des valeurs identiques de la température mesurée (température du bout du nez, température du canthus médial, température cornéenne). Ainsi, pour 15 chevaux, les résultats obtenus avec les deux TISCP pour les trois méthodes ont été comparés, principalement par la méthode du coefficient de concordance de Lin.

Pour la méthode du bout du nez, une concordance moyenne (0,58) a été mise en évidence entre les deux outils. Pour les méthodes oculaires, les mesures du canthus médial et cornéenne ont respectivement montré des coefficients de concordance respectifs de 0,37 et 0,62 entre les deux

thermomètres. Ainsi, les deux thermomètres infrarouges ne fournissaient pas exactement les mêmes valeurs de température. De cette façon, les résultats obtenus avec ANKOVO® ne sont pas généralisables à l'ensemble des TISCP. En effet, les mêmes calculs de répétabilité, reproductibilité inter-opérateurs et concordance avec la température rectale auraient probablement fourni des résultats différents s'ils avaient été réalisés avec le TISCP iHealth®. De cette façon, se pose une limite importante à l'utilisation des TISCP, qui est l'hétérogénéité des outils disponibles.

2 Limites de l'étude

2.1 Échantillon : représentativité et taille

Pour notre étude, nous avons choisi de nous restreindre aux chevaux séjournant à la Clinique Équine de l'École Nationale Vétérinaire d'Alfort. Ce choix a été fait pour faciliter les prises de mesure et pour limiter les biais liés aux conditions de détention des chevaux. En effet, cela permettait d'avoir des chevaux logeant tous dans des espaces confinés, à l'abri des intempéries, des courants d'air et d'un ensoleillement majeur. De plus, ces chevaux étaient tous « au repos », c'est-à-dire qu'ils ne fournissaient pas d'efforts physiques importants avant les mesures, comme aurait pu le faire un cheval à l'entraînement ou à l'exercice. Dans le cas des chevaux d'enseignement, pouvant réaliser des exercices légers avec des étudiants vétérinaires, nous avons veillé à ce qu'ils n'aient pas lieu dans l'heure précédant les mesures. Néanmoins, le but de notre étude était de trouver des méthodes alternatives à la température rectale afin de fournir un outil plus sécuritaire pour l'utilisateur. Deux usages majeurs avaient été mis en évidence : le cadre médical (par un vétérinaire, en clinique ou sur le terrain) ou dans un cadre prophylactique (par le propriétaire, sur le lieu de détention du cheval ou sur le lieu de performance ; par le vétérinaire, sur le lieu de performance). De ce fait, l'échantillon choisi ne recouvre pas l'ensemble de ces circonstances, comme celle rencontrée lors de l'examen d'un cheval à l'arrivée sur un site de compétition, par exemple. Ainsi, il est difficile d'étendre les notes de tolérance à l'ensemble des chevaux susceptibles d'être soumis à une mesure de la température. Un cheval au sortir du transport sera potentiellement moins tolérant aux manipulations, du fait du trajet, de l'arrivée sur un site nouveau, de l'effervescence et surtout du manque de contention (rarement réalisé au box). De plus, on peut supposer que les températures mesurées pourraient être modifiées par le transport, du fait de la vasodilatation ou de la production de sueur par exemple. Enfin, les cinétiques des différentes températures évaluées par différentes méthodes pourraient ne pas être les mêmes et les écarts entre la température testée et la température rectale pourraient différer de nos résultats.

Nous avons choisi d'inclure dans notre étude des chevaux d'âge supérieur à un an. Ce choix a été fait d'une part car nous avons vu dans la partie bibliographique que les métabolismes de l'adulte et du poulain différaient. Par exemple, le poulain peut présenter des variations rapides de la température en situation de stress (Desjardins et Cadore, 2004) ou de températures « extrêmes » (White, 2014). La température du poulain est aussi plus élevée que celle du cheval adulte. Enfin, la maigre couche grasseuse et la conformation physique du poulain auraient pu modifier le positionnement des outils de mesure et modifier nos résultats. Ainsi, nous n'avons pas souhaité inclure de jeunes individus afin de ne pas introduire de biais liés à ces observations. Nos résultats ne concernent donc que les adultes. Les poulains sont cependant peu concernés par les compétitions (hormis élevage), ce n'était donc pas nécessairement la population que nous ciblions avec notre problématique.

La non-inclusion dans cette thèse des individus de taille au garrot inférieure à 130 cm a aussi été choisie afin d'homogénéiser la population et de ne pas introduire de biais supplémentaires liés à la taille et au poids. Aussi, cela aurait pu modifier le positionnement des outils par l'utilisateur (profondeur d'enfoncement en particulier), notamment lors de l'utilisation du thermomètre électronique digital. De la même façon que pour l'âge, les individus les plus représentés sur les terrains de concours internationaux sont des chevaux, toisant plus de 148 cm au garrot. Aussi, en course, les trotteurs français et les pur-sang anglais sont les races les plus fréquentes, toisant respectivement en moyenne plus de 160 cm. Cela permet donc d'appliquer nos résultats à la majorité des chevaux évalués sur le terrain pour des motifs réglementaires. Néanmoins, un vétérinaire est amené à examiner des individus de toute taille. Les résultats de notre étude ne pourront alors pas s'appliquer aux poneys de taille inférieure à 130 cm.

Enfin, nous avons au total inclus 52 chevaux dans notre étude. Cependant, les différents calculs n'ont pas été réalisés sur l'ensemble des individus. Pour l'évaluation de la répétabilité et de la concordance avec la température rectale des méthodes de mesure, 41 individus ont été pris en compte, ce qui correspondait à l'effectif à inclure, calculé à partir du tableur fourni par L. Desquilbet. En revanche, pour la reproductibilité inter-opérateurs, nous ne sommes pas parvenus à inclure plus de 13 chevaux du fait de la nécessité pour les deux opérateurs de se rendre disponibles au même moment. Nous avons repris le tableur Excel utilisé préalablement pour calculer l'effectif à inclure (voir 3.1.4), en conservant une valeur CCC0 (« valeur du CCC de Lin minimale dont on souhaite montrer de façon statistique que la valeur réelle de Lin est supérieure à cette valeur minimale ») de 0,60 et une valeur CCC1 (« valeur du CCC de Lin que l'on s'attend à observer dans l'étude qui va être mise en place ») de 0,80. En incluant 13 individus seulement, la puissance statistique obtenue est 0,40. Cela signifie que la probabilité pour l'étude de mettre en évidence, de façon significative, une concordance « satisfaisante » (coefficient de concordance de Lin $\geq 0,60$) entre les deux séries de mesures était de 0,4, ce qui est faible. Ainsi, l'idéal aurait été d'augmenter l'effectif mesuré pour évaluer la reproductibilité inter-opérateurs, afin d'augmenter la puissance du calcul. Concernant l'évaluation des différents indicateurs pour chaque méthode, le calcul de la spécificité et de la sensibilité (qualité du test), ne dépend pas de la prévalence. En revanche, les valeurs prédictives positive et négative (qualité du résultat au test) dépendent de la prévalence et des valeurs de spécificité et de sensibilité. Ici, la prévalence réelle d'hyperthermes est faible (10%), ce qui diminue la VPP et augmente la VPN.

2.2 Choix des opérateurs et des outils de mesure

Pour les mesures de température, l'opérateur principal était l'auteur de cette thèse, étudiante d'avant-dernière puis de dernière année à dominante équine au moment des expériences. L'étudiante était familière des chevaux et avait déjà reçu des enseignements concernant l'abord et la manipulation d'un cheval, mais aussi l'examen oculaire et donc savait maintenir les paupières de l'animal ouvertes. Le second opérateur du premier temps de l'étude était une étudiante de première année au moment des expériences. Elle était habituée aux chevaux mais ne les avait jamais manipulés dans un cadre médical. De plus, elle n'avait jamais manipulé la zone oculaire. L'opérateur principal pouvait être comparé au vétérinaire de terrain, bien que moins expérimenté, tandis que l'opérateur secondaire mimait un propriétaire de chevaux. Il aurait cependant été intéressant de comparer entre eux des étudiants de dernière année puis des étudiants de première année familiers

des chevaux, afin de voir si la répétabilité et la reproductibilité inter-opérateurs différaient selon l'expérience de l'opérateur.

Concernant le choix des outils de mesure, le thermomètre électronique digital choisi est un modèle conçu pour les grands animaux. Ce même modèle est offert aux étudiants de dernière année à dominante équine à l'École Nationale Vétérinaire d'Alfort, traduisant le fait qu'il puisse être utilisé par un grand nombre de vétérinaires. Le premier modèle infrarouge sans contact, sur lequel repose nos calculs, est un modèle vendu sur un site internet très populaire (Amazon.fr®). C'est l'un des modèles les mieux notés par les utilisateurs, peu onéreux et le mieux vendu. C'est alors que nous avons considéré ce modèle comme étant accessible à n'importe quel utilisateur et pouvant ainsi constituer un support de test intéressant pour cette thèse. Pour le choix du deuxième TISCP, des critères similaires ont été recherchés (avis des utilisateurs, coût, nombre de ventes), mais nous avons aussi souhaité prendre un outil de forme légèrement différente du premier. Cependant, une multitude de modèles existent, avec des formes et des fonctionnalités propres. Cela, associé aux observations de la partie 1.6, montre la difficulté d'étendre nos résultats à tous les modèles de TISCP existant : un outil ne fournissant pas de résultats satisfaisants ne signifie pas qu'un autre ne le fera pas, l'inverse étant aussi vrai. Ainsi, se pose aussi la difficulté pour l'utilisateur de choisir, parmi tous les modèles disponibles, celui montrant les meilleurs résultats.

2.3 Évaluation des paramètres extérieurs et réalisation des tests de Student

Nous avons réalisé des tests de Student afin d'évaluer l'association entre les températures mesurées avec les différentes méthodes et premièrement la température extérieure, deuxièmement la localisation du box. Les tests ont été réalisés sur 36 (TA) à 47 (TR, TN1, TCa1, TCo2) chevaux.

L'objectif était ici de rejeter H_0 , donc de montrer qu'il existait une association statistique significative entre l'appartenance au premier ou au second groupe testé et la valeur de la température mesurée. Pour cela, il fallait concevoir une étude qui maximisait les chances de rejeter H_0 et donc qui avait une puissance suffisante (Desquilbet, 2023a). Or, la puissance statistique dépend de la différence réelle entre les deux moyennes de chacun des deux groupes dans la population cible, de la taille d'échantillon, et de la variabilité du caractère. Ainsi, plus l'échantillon est grand, plus la probabilité de rejet de H_0 si H_0 est fautive est grande, d'autant plus lorsque la différence entre les moyennes est faible.

Par exemple, pour montrer que la moyenne de la température du canthus médial mesurée diffère selon la température extérieure (inférieure ou égale à 15°C vs. supérieure à 15°C), le site BiostaTGV fournit le résultat suivant (Figure 20) :

Figure 20 : Individus à inclure pour rejet H0 si H0 est fautive lors de l'évaluation de l'association entre la température extérieure et la température du canthus médial (d'après le site internet BiostaTGV)

The screenshot shows the 'Saisie des paramètres' (Parameter Input) section of the BiostaTGV calculator. The parameters are as follows:

- Moyenne du premier groupe μ_1 : 36.72
- Moyenne du deuxième groupe μ_2 : 36.85
- $d = |\mu_1 - \mu_2|$: 0.130000000000000256
- Ecart type commun σ : 0.25
- Risque de première espèce α : 0.05 (valeur entre 0 et 1)
- Puissance $1 - \beta$: 0.8 (valeur entre 0 et 1)
- Nature du test: Bilatéral (selected) / Unilatéral

The 'Calculer' button is visible. Below, the 'Résultats' (Results) section shows the number of subjects required (n per group) using the epiR package 0.9-96:

- Nombre total de sujet: 118
- Nombre sujet dans le groupe 1: 59
- Nombre sujet dans le groupe 2: 59

Ainsi, pour avoir 80% de chances d'obtenir dans l'échantillon une différence significative de moyennes du caractère quantitatif entre deux groupes au risque d'erreur de 1ère espèce α fixé à 0,05, en supposant que les moyennes de ce caractère au niveau de la population cible soient de 36,72°C et 36,85°C (valeurs données à titre d'exemple, issues du test de Student partie 6.1.3) respectivement pour chaque groupe et en supposant que la SD, dans la population cible, soit égale à 0,25 (valeur donnée à titre d'exemple, issue du test de Student partie 6.1.3), alors il faudrait recruter 118 individus dans l'étude clinique au total, avec 59 individus par groupe. De cette façon, notre effectif est insuffisant et la puissance de notre étude est beaucoup trop faible pour pouvoir maximiser les chances de ne pas se tromper, et il est possible qu'il existe effectivement une association significative entre les paramètres évalués et la température mesurée, pour l'une ou plusieurs des méthodes testées. Les résultats de ces tests sont ici à interpréter avec précaution.

Enfin, dans notre étude, l'évaluation de la température extérieure n'était pas réalisée de façon précise. En effet, l'idéal aurait été d'utiliser un thermomètre local afin d'avoir une température extérieure réelle et non estimée par le site internet utilisé. De ce fait, le classement dans un groupe ou dans l'autre (température extérieure inférieure ou égale à 15°C ou supérieure à 15°C) était biaisé par cette méconnaissance de la température extérieure réelle. Ainsi, l'évaluation de l'association entre la température extérieure et les températures mesurées nécessiterait un protocole plus précis et un effectif mesuré plus important.

3 Perspectives

Trouver une alternative sécuritaire, hygiénique, bien tolérée et rapide à la prise de température rectale serait une avancée majeure en termes de sécurité, pour le vétérinaire notamment, mais aussi en termes de biosécurité, en permettant de mesurer un grand nombre d'individus rapidement, sans

être limité par la tolérance de ces derniers. Néanmoins, la difficulté de trouver une méthode satisfaisante tant dans sa praticité que sur les résultats fournis n'a, à ce jour, pas permis de mettre en lumière une alternative non invasive supplantant la température rectale, le gold standard.

Certaines des méthodes testées dans cette thèse, en particulier les méthodes infrarouges, présentent des avantages indéniables, tels qu'une grande rapidité d'acquisition et une bonne tolérance des individus. Cependant, les températures mesurées aux différents sites avec cet outil ne permettent pas d'en faire un outil de choix, ni pour l'évaluation de la température corporelle, ni pour le dépistage de l'hyperthermie. Les méthodes oculaires montrent néanmoins des concordances passables avec la température rectale avec le TISCP ANKOVO®. Or, l'hétérogénéité des modèles de TISCP, mise en évidence dans la littérature (Canadian Agency for Drugs and Technologies in Health, 2014) et confirmée par notre étude, empêche la généralisation des résultats à tous les TISCP. Ainsi, pour les mesures oculaires, il pourrait être intéressant de mener une nouvelle étude sur d'autres modèles de TISCP, afin de voir si les résultats auraient été modifiés voire améliorés. Au vu des résultats moyens, les méthodes oculaires pourraient tout de même être utilisées dans le cas d'un cheval totalement réfractaire à la mesure rectale. La méthode cornéenne, en particulier, présentait une excellente spécificité et pourrait fournir un premier indice sur la température corporelle de l'animal. Néanmoins, la sensibilité moyenne ne permettrait pas de fournir un diagnostic de certitude. La température axillaire présente, d'après notre étude, trop d'inconvénients pour être considérée comme une méthode prometteuse.

Aussi, si des études futures venaient à montrer de meilleurs résultats pour les températures oculaires avec d'autres modèles de TISCP, il serait intéressant de tester l'association entre différents éléments, extrinsèques mais aussi intrinsèques et les températures obtenues, sur des effectifs plus importants que ceux de cette étude. En effet, les données réduites de cette thèse ne permettent pas de conclure.

Finalement, la méthode rectale demeure aujourd'hui la méthode de référence pour la mesure de la température chez le cheval. Bien que potentiellement dangereuse à mettre en œuvre, la démocratisation de la prise de température sur les terrains de concours et la meilleure médicalisation des animaux pourraient, à termes, diminuer le nombre de chevaux intolérants à cette méthode. Une autre méthode de mesure semble aussi prometteuse d'après la littérature : la lecture par transpondeur à micropuce. Des études sont encore à faire sur cette technique mais elle pourrait devenir, dans quelques années, une méthode de choix pour la mesure de la température corporelle, chez le cheval.

Conclusion

À ce jour, la prise de température rectale est la méthode de référence pour l'évaluation de la température corporelle chez le cheval, et la seule méthode validée dans le cadre de compétitions internationales. Cependant, les limites qu'elle présente, en particulier le risque physique pour l'opérateur, le risque de transmission de pathogènes et la durée d'acquisition parfois allongée nous ont poussé à étudier la validité d'autres méthodes de mesure, utilisées chez l'Homme. Nous avons choisi d'étudier quatre méthodes pour lesquelles les connaissances sont pauvres chez le cheval : la température axillaire par thermomètre électronique, la température du bout du nez, la température du canthus médial de l'œil et la température cornéenne, toutes trois évaluées par thermomètre infrarouge sans-contact portable.

Pour ce faire, nous avons recruté 52 chevaux séjournant à la Clinique Équine de l'École Nationale Vétérinaire d'Alfort, pour l'enseignement des élèves vétérinaires ou pour raisons médicales, entre mars 2022 et septembre 2023. Parmi eux, 41 ont permis d'évaluer la tolérance des chevaux à la méthode de mesure ainsi que la validité statistique de chaque méthode. Pour cela, la répétabilité, la reproductibilité inter-opérateurs et la concordance avec la température rectale de chaque méthode a été déterminée, en utilisant la méthode numérique du coefficient de corrélation de Lin et la méthode graphique de Bland et Altman. Afin de vérifier que la généralisation de nos résultats était possible pour les méthodes infrarouges, nous avons aussi évalué la concordance entre les valeurs de température mesurées avec deux TISCP différents, sur 15 des chevaux. Nous avons aussi testé l'association entre la localisation du box (intérieur ou extérieur) et la température mesurée, ainsi que celle entre cette dernière et la température extérieure (supérieure ou inférieure à 15°C), sur l'ensemble des chevaux mesurés par chaque méthode. Enfin, nous avons calculé les spécificités et sensibilités de chaque méthode pour le dépistage de l'hyperthermie sur l'ensemble des chevaux.

Les méthodes étaient dans l'ensemble bien tolérées par les chevaux de l'étude, même pour la température rectale, avec de meilleurs résultats pour la température du bout du nez. Cependant, le contexte de la mesure (au box, cheval hospitalisé depuis plusieurs jours parfois) ne permet pas de généraliser ces résultats. Néanmoins, les méthodes infrarouges montraient une durée d'acquisition de moins de 3 secondes, tandis que la méthode axillaire pouvait nécessiter plusieurs dizaines de secondes pour afficher un résultat, ce qui nuisait à la coopération de l'animal.

Toutes les méthodes évaluées présentaient une très bonne répétabilité, bien que les méthodes axillaire et du bout du nez aient des limites d'agrément plus larges que celles acceptées par notre étude. La reproductibilité inter-opérateurs était aussi bonne à très bonne pour les méthodes, hormis la méthode du canthus médial pour lequel le placement de l'outil était plus subjectif et pouvait modifier la mesure. Les limites d'agrément étaient néanmoins toutes en dehors de l'intervalle accepté, mais en étaient très proches pour la mesure cornéenne. Enfin, l'évaluation de la concordance avec la température rectale a demandé une correction des mesures obtenues par les nouvelles méthodes, grâce à l'ajout du « biais moyen » aux valeurs initiales. En effet, les températures étaient quasi systématiquement inférieures à la température rectale. Les coefficients de concordance de Lin montraient une mauvaise concordance de la température axillaire (0,19) et

une discordance totale de la température du bout du nez (-0,10) avec la température rectale de référence. Les températures oculaire, cornéenne et du canthus de l'œil, montraient une concordance passable. Cependant, les limites d'agrément étaient beaucoup trop larges pour considérer ces méthodes satisfaisantes d'un point de vue clinique. Aussi, la comparaison de deux TISCP, ANKOVO® et iHealth® sur 15 chevaux a montré une concordance de 0,58 pour la méthode du bout du nez, 0,37 pour la méthode du canthus médial et 0,62 pour la méthode cornéenne. Cette concordance non optimale, en particulier pour le canthus médial met en évidence l'hétérogénéité des TISCP et l'impossibilité de généraliser les résultats obtenus à l'ensemble des TISCP existants. Pour finir, la méthode du bout du nez n'a permis la mise en évidence d'aucun hypertherme ($TR \geq 38,5^{\circ}\text{C}$). Les trois autres méthodes ont montré de très bonnes spécificités, mais une sensibilité de 40% pour chacune, ne permettant pas d'en faire un outil satisfaisant pour détecter l'hyperthermie chez le cheval.

Enfin, dans l'échantillon, seule la méthode du bout du nez a montré une association significative entre le fait, pour le cheval, d'être mesuré sous une température extérieure inférieure ou égale à 15°C ou supérieure à 10°C , et la valeur de température obtenue. Cependant, l'effectif réduit utilisé dans cette thèse ne permet pas de conclure lorsque la valeur de p était supérieure à 0,05.

Ainsi, parmi les méthodes testées, la méthode cornéenne semblait fournir les meilleurs résultats, sans pour autant être suffisamment concordante avec la température rectale et sensible pour pouvoir la remplacer. Ceci est valable uniquement pour le TISCP ANKOVO® et les résultats pourraient être différents avec un autre outil. Ainsi, avec le TISCP ANKOVO®, la méthode cornéenne pourrait constituer un outil intéressant pour évaluer la température corporelle, uniquement dans le cas où la température rectale serait impossible à mesurer. Elle apporterait un indice sur la température réelle de l'animal, en ne permettant néanmoins pas de conclure lors d'un résultat négatif (normotherme avec l'outil). De cette façon, aucune des méthodes testées ne peut, d'après nos calculs, remplacer la température rectale. Des études supplémentaires sur d'autres TISCP, sur un échantillon plus important et contenant plus de chevaux hyperthermes pourraient fournir de meilleurs résultats, en particulier pour les méthodes oculaires.

Liste des références bibliographiques

- ACADÉMIE NATIONALE DE MÉDECINE (2023) Dictionnaire de l'Académie Nationale de Médecine. In *Académie Nationale de Médecine*. [<https://www.academie-medecine.fr/le-dictionnaire/index.php?q=thermogen%C3%A8se#:~:text=thermogen%C3%A8se%20n.f.&text=Production%20de%20chaleur%20de%20l,dite%20%C2%AB%20point%20de%20consigne%20%C2%BB.>] (consulté le 17/07/2023).
- AGGARWAL, N., GARG, M., DWARAKANATHAN, V., *et al.* (2020) Diagnostic accuracy of non-contact infrared thermometers and thermal scanners: a systematic review and meta-analysis. *Journal of Travel Medicine* vol. 27, n° 8, p. taaa193. [<https://doi.org/10.1093/jtm/taaa193>]
- AMOATENG-ADJEPONG, Y., DEL MUNDO, J., MANTHOUS, C.A. (1999) Accuracy of an Infrared Tympanic Thermometer. *Chest* vol. 115, n° 4, p. 1002-1005. [<https://doi.org/10.1378/chest.115.4.1002>]
- ARFUSO, F., ACRI, G., PICCIONE, G., *et al.* (2022) Eye surface infrared thermography usefulness as a noninvasive method of measuring stress response in sheep during shearing: Correlations with serum cortisol and rectal temperature values. *Physiology & Behavior* vol. 250, p. 113781. [<https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2022.113781>]
- ASTER, J.C., KUMAR, V., ABBAS, A.K. (2020) Robbins & Cotran pathologic basis of disease, 10th Edition. Philadelphia, Elsevier.
- AUCLAIR-RONZAUD, J., BENOIST, S., DUBOIS, C., *et al.* (2020) No-Contact Microchip Monitoring of Body Temperature in Yearling Horses. *Journal of Equine Veterinary Science* vol. 86, p. 102892. [<https://doi.org/10.1016/j.jevs.2019.102892>]
- BARNHART, H.X., HABER, M.J., LIN, L.I. (2007) An Overview on Assessing Agreement with Continuous Measurements. *Journal of Biopharmaceutical Statistics* vol. 17, n° 4, p. 529-569. [<https://doi.org/10.1080/10543400701376480>]
- BENZINGER, T.H. (1969) Clinical Temperature: New Physiological Basis. *JAMA* vol. 209, n° 8, p. 1200. [<https://doi.org/10.1001/jama.1969.03160210032008>]
- BLAND, J.M., ALTMAN, D.G. (1986) Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Lancet* vol. 1, n° 8476, p. 307-310.
- BLUMENTHAL, I. (1992) Should We Ban the Mercury Thermometer? Discussion Paper. *Journal of the Royal Society of Medicine* vol. 85, n° 9, p. 553-555. [<https://doi.org/10.1177/014107689208500915>]
- BOWMAN, M.C., VOGELANG, M.M., GIBBS, P.G., *et al.* (2007) Utilizing body temperature to evaluate ovulation in mares. *The Professional Animal Scientist* vol. 23, n° 3, p. 267-271. [[https://doi.org/10.15232/S1080-7446\(15\)30972-4](https://doi.org/10.15232/S1080-7446(15)30972-4)]
- CANADIAN AGENCY FOR DRUGS AND TECHNOLOGIES IN HEALTH (2014) Non-Contact Thermometers for Detecting Fever: A Review of Clinical Effectiveness, CADTH Rapid Response Reports. Ottawa (ON), Canadian Agency for Drugs and Technologies in Health.
- CARTER, A.J., DIMITROVA, A., HALL, E.J. (2019) Field testing two animal-specific non-contact thermometers on healthy horses. *Veterinary Nursing Journal* vol. 34, n° 4, p. 96-101. [<https://doi.org/10.1080/17415349.2018.1559115>]
- CHHAPOLA, V., KANWAL, S.K., BRAR, R. (2015) Reporting standards for Bland–Altman agreement analysis in laboratory research: a cross-sectional survey of current practice. *Annals of Clinical Biochemistry* vol. 52, n° 3, p. 382-386. [<https://doi.org/10.1177/0004563214553438>]
- CHURCH, J.S., HEGADOREN, P.R., PAETKAU, M.J., *et al.* (2014) Influence of environmental factors on infrared eye temperature measurements in cattle. *Research in Veterinary Science* vol. 96, n° 1, p. 220-226. [<https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2013.11.006>]
- CICHOCKI, B., DUGAT, D., PAYTON, M. (2017) Agreement of Axillary and Auricular Temperature with Rectal Temperature in Systemically Healthy Dogs Undergoing Surgery. *Journal of the American Animal Hospital Association* vol. 53, n° 6, p. 291-296. [<https://doi.org/10.5326/JAAHA-MS-6500>]
- CLAPHAM, J.C. (2012) Central control of thermogenesis. *Neuropharmacology* vol. 63, n° 1, p. 111-123. [<https://doi.org/10.1016/j.neuropharm.2011.10.014>]
- COHEN, G.Y., BEN-DAVID, G., SINGER, R., *et al.* (2021) Ocular Surface Temperature:

- Characterization in a Large Cohort of Healthy Human Eyes and Correlations to Systemic Cardiovascular Risk Factors. *Diagnostics* vol. 11, n° 10, p. 1877. [https://doi.org/10.3390/diagnostics11101877]
- CRAWFORD, D.C., HICKS, B., THOMPSON, M.J. (2006) Which thermometer? Factors influencing best choice for intermittent clinical temperature assessment. *Journal of Medical Engineering & Technology* vol. 30, n° 4, p. 199-211. [https://doi.org/10.1080/03091900600711464]
- CRÉPEAUX, G. (2022) Thermorégulation. Polycopié. Maisons-Alfort, Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort, Département des Sciences Biologiques et Pharmaceutiques.
- CRICHAN, H. (2020) Indexation des poneys et toise. *In Institut français du cheval et de l'équitation*. [https://www.ifce.fr/wp-content/uploads/2020/01/webconf_toise_poney_pdf.pdf] (consulté le 08/06/2023).
- CROZET, G. (2023) Épidémiologie appliquée à la lutte contre les maladies animales infectieuses - Synthèse des démarches et outils. Maisons-Alfort, École Nationale Vétérinaire d'Alfort, Unité pédagogique de Maladies Réglementées, Zoonoses et Épidémiologie Département de Productions Animales et de Santé Publique.
- CUGMAS, B., ŠUŠTERIČ, P., GORENJEK, N.R., *et al.* (2020) Comparison between rectal and body surface temperature in dogs by the calibrated infrared thermometer. *Veterinary and Animal Science* vol. 9, p. 100120. [https://doi.org/10.1016/j.vas.2020.100120]
- DESJARDINS, L., CADORE, J.-L. (2004) Étiologie et pathogénie de l'altération de la température corporelle chez le cheval. *Pratique vétérinaire équine* vol. 36, n° 142, p. 7-12.
- DESQUILBET, L. (2023a) Biostatistique en Médecine Vétérinaire. Maisons-Alfort, École Nationale Vétérinaire d'Alfort, Unité Pédagogique de Communication et Réglementation dans la profession vétérinaire.
- DESQUILBET, L. (2023b) Utilité pratique et interprétation des résultats d'un test diagnostique en médecine individuelle. Maisons-Alfort, École Nationale Vétérinaire d'Alfort, Unité Pédagogique de Biostatistiques et d'Épidémiologie Clinique.
- DESQUILBET, L. (2019) Guide pratique de validation statistique de méthodes de mesure : répétabilité, reproductibilité, et concordance. Maisons-Alfort, École Nationale Vétérinaire d'Alfort, Unité Pédagogique de Biostatistiques et d'Épidémiologie Clinique.
- DINARELLO, C.A. (1996) Thermoregulation and the pathogenesis of fever. *Infectious Disease Clinics of North America* vol. 10, n° 2, p. 433-449. [https://doi.org/10.1016/S0891-5520(05)70306-8]
- DUNBAR, M.R., JOHNSON, S.R., RHYAN, J.C., *et al.* (2009) Use of Infrared Thermography to Detect Thermographic Changes in Mule Deer (*Odocoileus hemionus*) Experimentally Infected with Foot-and-Mouth Disease. *Journal of Zoo and Wildlife Medicine* vol. 40, n° 2, p. 296-301. [https://doi.org/10.1638/2008-0087.1]
- EASTERWOOD, L., COHEN, N.D. (2023) Agreement of Temperatures Measured Using a Non-Contact Infrared Thermometer With a Rectal Digital Thermometer in Horses. *Journal of Equine Veterinary Science* vol. 123, p. 104243. [https://doi.org/10.1016/j.jevs.2023.104243]
- EICHNA, L.W., BERGER, A.R., RADER, B., *et al.* (1951) Comparison of intracardiac and intravasculaire temperatures with rectal temperatures in man. *Journal of Clinical Investigation* vol. 30, n° 4, p. 353-359. [https://doi.org/10.1172/JCI102451]
- FALZON, A., GRECH, V., CARUANA, B., *et al.* (2007) How reliable is axillary temperature measurement? *Acta Paediatrica* vol. 92, n° 3, p. 309-313. [https://doi.org/10.1111/j.1651-2227.2003.tb00551.x]
- FÉDÉRATION ÉQUESTRE INTERNATIONALE (2023) Sanctions in case of FEI Veterinary Regulation violations. *In 2023 Veterinary Regulations*. [https://inside.fei.org/sites/default/files/2023%20Veterinary%20Regulations%20-%20Clean_0.pdf] (consulté le 21/03/2023).
- GIANNETTO, C., ACRI, G., PENNISI, M., *et al.* (2022a) Short Communication: Use of Infrared Thermometers for Cutaneous Temperature Recording: Agreement with the Rectal Temperature in *Felis catus*. *Animals* vol. 12, n° 10, p. 1275. [https://doi.org/10.3390/ani12101275]
- GIANNETTO, C., DI PIETRO, S., FALCONE, A., *et al.* (2021) Thermographic ocular temperature correlated with rectal temperature in cats. *Journal of Thermal Biology* vol. 102, p. 103104. [https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2021.103104]
- GIANNETTO, C., DI PIETRO, S., PENNISI, M., *et al.* (2022b) Applicability of the auricular

temperature for the assessment of body temperature in healthy large and small domestic species, in a normal metabolic state and in controlled environmental conditions. *Journal of Thermal Biology* vol. 108, p. 103281. [<https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2022.103281>]

GOIC, J.B., REINEKE, E.L., DROBATZ, K.J. (2014) Comparison of rectal and axillary temperatures in dogs and cats. *Journal of the American Veterinary Medical Association* vol. 244, n° 10, p. 1170-1175. [<https://doi.org/10.2460/javma.244.10.1170>]

GOMART, S.B., ALLERTON, F.J.W., GOMMEREN, K. (2014) Accuracy of different temperature reading techniques and associated stress response in hospitalized dogs: Reducing stress of temperature measurement in dogs. *Journal of Veterinary Emergency and Critical Care* vol. 24, n° 3, p. 279-285. [<https://doi.org/10.1111/vec.12155>]

GONZÁLEZ, A.M., MANN, F.A., PREZIOSI, D.E., *et al.* (2002) Measurement of body temperature by use of auricular thermometers versus rectal thermometers in dogs with otitis externa. *Journal of the American Veterinary Medical Association* vol. 221, n° 3, p. 378-380. [<https://doi.org/10.2460/javma.2002.221.378>]

GOODWIN, S. (1998a) Comparison of Body Temperatures of Goats, Horses, and Sheep Measured With a Tympanic Infrared Thermometer, an Implantable Microchip Transponder, and a Rectal Thermometer. *Contemporary Topics in Laboratory Animal Science* vol. 37, n° 3, p. 51-55.

GOODWIN, S. (1998b) Comparison of Body Temperatures of Goats, Horses, and Sheep Measured With a Tympanic Infrared Thermometer, an Implantable Microchip Transponder, and a Rectal Thermometer. *Contemporary Topics in Laboratory Animal Science* vol. 37, n° 3, p. 51-55.

GRAYSON, J. (1951) Observations on the Temperature of the Human Rectum. *British Medical Journal* vol. 2, n° 4744, p. 1379-1382. [<https://doi.org/10.1136/bmj.2.4744.1379>]

GREER, R.J., COHN, L.A., DODAM, J.R., *et al.* (2007) Comparison of three methods of temperature measurement in hypothermic, euthermic, and hyperthermic dogs. *Journal of the American Veterinary Medical Association* vol. 230, n° 12, p. 1841-1848. [<https://doi.org/10.2460/javma.230.12.1841>]

GUTHRIE, A.J., LUND, R.J. (1998) Thermoregulation: Base Mechanisms and Hyperthermia. *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice* vol. 14, n° 1, p. 45-59. [[https://doi.org/10.1016/S0749-0739\(17\)30211-0](https://doi.org/10.1016/S0749-0739(17)30211-0)]

HALL, E.J., CARTER, A. (2017a) Comparison of rectal and tympanic membrane temperature in healthy exercising dogs. *Comparative Exercise Physiology* vol. 13, n° 1, p. 37-44. [<https://doi.org/10.3920/CEP160034>]

HALL, E.J., CARTER, A. (2017b) Establishing a reference range for normal canine tympanic membrane temperature measured with a veterinary aural thermometer. *Veterinary Nursing Journal* vol. 32, n° 12, p. 369-373. [<https://doi.org/10.1080/17415349.2017.1377133>]

HAYDEN, S.R., BROWN, M.D. (1999) Likelihood Ratio: A Powerful Tool for Incorporating the Results of a Diagnostic Test Into Clinical Decisionmaking. *Annals of Emergency Medicine* vol. 33, n° 5, p. 575-580. [[https://doi.org/10.1016/S0196-0644\(99\)70346-X](https://doi.org/10.1016/S0196-0644(99)70346-X)]

HINE, L., LAVEN, R., SAHU, S. (2015) An analysis of the effect of thermometer type and make on rectal temperature measurements of cattle, horses and sheep. *New Zealand Veterinary Journal* vol. 63, n° 3, p. 171-173. [<https://doi.org/10.1080/00480169.2014.967325>]

HINES, M.T. (2018) Clinical Approach to Commonly Encountered Problems. *In Equine Internal Medicine*, 4th Edition. St-Louis, Elsevier, p. 232-310. [<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-44329-6.00007-3>]

HISSINK MULLER, P.C.E., VAN BERKEL, L.H., DE BEAUFORT, A.J. (2008) Axillary and Rectal Temperature Measurements Poorly Agree in Newborn Infants. *Neonatology* vol. 94, n° 1, p. 31-34. [<https://doi.org/10.1159/000112840>]

HUBERT, J.D., BEADLE, R.E., NORWOOD, G. (2002) Equine anhidrosis. *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice* vol. 18, n° 2, p. 355-369. [[https://doi.org/10.1016/s0749-0739\(02\)00016-0](https://doi.org/10.1016/s0749-0739(02)00016-0)]

HYMCZAK, H., GOŁĄB, A., MENDRALA, K., *et al.* (2021) Core Temperature Measurement—Principles of Correct Measurement, Problems, and Complications. *International Journal of Environmental Research and Public Health* vol. 18, n° 20, p. 10606. [<https://doi.org/10.3390/ijerph182010606>]

JANSSON, A., LINDGREN, G., VELIE, B.D., *et al.* (2021) An investigation into factors influencing basal eye temperature in the domestic horse (*Equus caballus*) when measured using infrared

thermography in field conditions. *Physiology & Behavior* vol. 228, p. 113218. [https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2020.113218]

JENSEN, B.N. (2000) Accuracy of Digital Tympanic, Oral, Axillary, and Rectal Thermometers Compared with Standard Rectal Mercury Thermometers. *The European Journal of Surgery* vol. 166, n° 11, p. 848-851. [https://doi.org/10.1080/110241500447218]

JOHNSON, S.R., RAO, S., HUSSEY, S.B., *et al.* (2011) Thermographic Eye Temperature as an Index to Body Temperature in Ponies. *Journal of Equine Veterinary Science* vol. 31, n° 2, p. 63-66. [https://doi.org/10.1016/j.jevs.2010.12.004]

JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY (2008) Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM), 3th Edition. Sèvres.

KAHNG, E., BRUNDAGE, C. (2020) Comparing alternatives to canine rectal thermometry at the axillary, auricular and ocular locations. *Open Veterinary Journal* vol. 9, n° 4, p. 301. [https://doi.org/10.4314/ovj.v9i4.4]

KAMEDA, N. (2022) Clinical accuracy of non-contact forehead infrared thermometer and infrared tympanic thermometer in postoperative adult patients: A comparative study. *Journal of Perioperative Practice* vol. 32, n° 6, p. 142-148. [https://doi.org/10.1177/17504589211022314]

KANG, H., SOLE-GUITART, A., MELLOR, V.A., *et al.* (2022b) The use of percutaneous thermal sensing microchips for non-invasive measurement of body temperature in foals during summer seasons in a subtropical region. *Animal* vol. 16, n° 9, p. 100620. [https://doi.org/10.1016/j.animal.2022.100620]

KANG, H., ZSOLDOS, R.R., SKINNER, J.E., *et al.* (2022a) The Use of Percutaneous Thermal Sensing Microchips to Measure Body Temperature in Horses during and after Exercise Using Three Different Cool-Down Methods. *Animals* vol. 12, n° 10, p. 1267. [https://doi.org/10.3390/ani12101267]

KESSEL, L., JOHNSON, L., ARVIDSSON, H., *et al.* (2010) The Relationship between Body and Ambient Temperature and Corneal Temperature. *Investigative Ophthalmology & Visual Science* vol. 51, n° 12, p. 6593. [https://doi.org/10.1167/iovs.10-5659]

KIM, Y.-M., JANG, M.-R., MOON, J.-R., *et al.* (2022) Clinical Accuracy of Non-Contact Forehead Infrared Thermometer Measurement in Children: An Observational Study. *Children* vol. 9, n° 9, p. 1389. [https://doi.org/10.3390/children9091389]

KLEIN, B.G. (2012) Thermoregulation. In *Cunningham's Textbook of Veterinary Physiology*, 5th Edition. St Louis, Saunders Elsevier, p. 482-494.

KOÇAK, I., ORGÜL, S., FLAMMER, J. (1999) Variability in the Measurement of Corneal Temperature Using a Noncontact Infrared Thermometer. *Ophthalmologica* vol. 213, n° 6, p. 345-349. [https://doi.org/10.1159/000027452]

KREISSL, H., NEIGER, R. (2015) Measurement of body temperature in 300 dogs with a novel noncontact infrared thermometer on the cornea in comparison to a standard rectal digital thermometer: Use of an Infrared thermometer in dogs. *Journal of Veterinary Emergency and Critical Care* vol. 25, n° 3, p. 372-378. [https://doi.org/10.1111/vec.12302]

LANGFORD, N., FERNER, R. (1999) Toxicity of mercury. *Journal of Human Hypertension* vol. 13, n° 10, p. 651-656. [https://doi.org/10.1038/sj.jhh.1000896]

LATMAN, N.S. (2003) Clinical thermometry: possible causes and potential solutions to electronic, digital thermometer inaccuracies. *Biomedical Instrumentation & Technology* vol. 37, n° 3, p. 190-196. [https://doi.org/10.2345/0899-8205(2003)37[190:CTPCAP]2.0.CO;2]

LIN, L., HEDAYAT, A.S., WU, W. (2007) A Unified Approach for Assessing Agreement for Continuous and Categorical Data. *Journal of Biopharmaceutical Statistics* vol. 17, n° 4, p. 629-652. [https://doi.org/10.1080/10543400701376498]

LIN, L.I.-K. (2000) Total deviation index for measuring individual agreement with applications in laboratory performance and bioequivalence. *Statistics in Medicine* vol. 19, n° 2, p. 255-270. [https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0258(20000130)19:2<255::AID-SIM293>3.0.CO;2-8]

LIN, L.I.-K. (1989) A Concordance Correlation Coefficient to Evaluate Reproducibility. *Biometrics* vol. 45, n° 1, p. 255. [https://doi.org/10.2307/2532051]

LUKKANAWARAPORN, Y., TIANGTAS, N., CHAIKORNKIJ, V., *et al.* (2022) Effects of environmental condition, size, coat type, and body condition score on rectal temperature prediction in dogs using infrared auricular and surface temperature. *Veterinary World* p. 1314-1322. [https://doi.org/10.14202/vetworld.2022.1314-1322]

- MAIR, T.S., TAYLOR, F.G.R., PINSENT, P.J.N. (1989) Fever of unknown origin in the horse : a review of 63 cases. *Equine Veterinary Journal* vol. 21, n° 4, p. 260-265. [<https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.1989.tb02163.x>]
- MAPSTONE, R. (1968a) Measurement of corneal temperature. *Experimental Eye Research* vol. 7, n° 2, p. 237-249. [[https://doi.org/10.1016/S0014-4835\(68\)80073-9](https://doi.org/10.1016/S0014-4835(68)80073-9)]
- MAPSTONE, R. (1968b) Determinants of corneal temperature. *British Journal of Ophthalmology* vol. 52, n° 10, p. 729-741. [<https://doi.org/10.1136/bjo.52.10.729>]
- MARI, I., POUCHOT, J., VINCENEUX, P. (1997) Mesure de la température corporelle en pratique quotidienne. *La Revue de Médecine Interne* vol. 18, n° 1, p. 30-36. [[https://doi.org/10.1016/S0248-8663\(97\)84391-3](https://doi.org/10.1016/S0248-8663(97)84391-3)]
- MATHIS, J.C., CAMPBELL, V.L. (2015) Comparison of axillary and rectal temperatures for healthy Beagles in a temperature- and humidity-controlled environment. *American Journal of Veterinary Research* vol. 76, n° 7, p. 632-636. [<https://doi.org/10.2460/ajvr.76.7.632>]
- MCKEEVER, K.H., EATON, T.L., GEISER, S., *et al.* (2010) Age related decreases in thermoregulation and cardiovascular function in horses. *Equine Veterinary Journal* n° 42, p. 220-227.
- MEAD, J., BONMARITO, C.L. (1949) Reliability of Rectal Temperatures as an Index of Internal Body Temperature. *Journal of Applied Physiology* vol. 2, n° 2, p. 97-109. [<https://doi.org/10.1152/jappl.1949.2.2.97>]
- MICHALSKI, L., ECKERSDORF, K., KUCHARSKI, J., *et al.* (2001) Temperature scales and classification of thermometers. In *Temperature measurement*, 2nd Edition. Chichester, Wiley-Blackwell. p. 1-19.
- MILLER, K.C., HUGHES, L.E., LONG, B.C., *et al.* (2017) Validity of Core Temperature Measurements at 3 Rectal Depths During Rest, Exercise, Cold-Water Immersion, and Recovery. *Journal of Athletic Training* vol. 52, n° 4, p. 332-338. [<https://doi.org/10.4085/1062-6050-52.2.10>]
- MINISTÈRE DU TRAVAIL ET DES AFFAIRES SOCIALES (1997) Circulaire DGS/DH n°97/305 du 22 avril 1997 relative à la gestion du risque mercuriel dans l'activité médicale. In *Bulletin officiel du Ministère du Travail et des Affaires Sociales*. [<https://www.cpias.fr/nosobase/Reglementation/1997/Circulaire/220497.pdf>] (consulté le 10/03/2023).
- MIYAHARA, T., KOUUDA, K., TSUBOI, H., *et al.* (1997) Does physical status influence the axillary temperature among junior high-school students? *Japanese Journal of Public Health* vol. 44, n° 7, p. 528-531.
- MOGENSEN, C.B., WITTENHOFF, L., FRUERHØJ, G., *et al.* (2018) Forehead or ear temperature measurement cannot replace rectal measurements, except for screening purposes. *BMC Pediatrics* vol. 18, n° 1, p. 15. [<https://doi.org/10.1186/s12887-018-0994-1>]
- MORAN, D.S., MENDAL, L. (2002) Core Temperature Measurement: Methods and Current Insights. *Sports Medicine* vol. 32, n° 14, p. 879-885. [<https://doi.org/10.2165/00007256-200232140-00001>]
- MORGAN, P.B., SOH, M.P., EFRON, N. (1999) Corneal surface temperature decreases with age. *Contact Lens and Anterior Eye* vol. 22, n° 1, p. 11-13. [[https://doi.org/10.1016/S1367-0484\(99\)80025-3](https://doi.org/10.1016/S1367-0484(99)80025-3)]
- MORRISON, S.F. (2016) Central control of body temperature. *F1000Research* vol. 5, p. 880. [<https://doi.org/10.12688/f1000research.7958.1>]
- MUHAMMED, M.U., MUSA, M.A., ABDULLAHI, G.A. (2019) Comparison between rectal and body surface temperatures obtained by digital and non-contact infrared thermometer in some large animal species. *International Journal of Research - Granthaalayah* vol. 7, n° 8, p. 62-68. [<https://doi.org/10.29121/granthaalayah.v7.i8.2019.639>]
- NAYLOR, J.M., STREETER, R.M., TORGERSON, P. (2012) Factors affecting rectal temperature measurement using commonly available digital thermometers. *Research in Veterinary Science* vol. 92, n° 1, p. 121-123. [<https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2010.10.027>]
- PECORARO, V., PETRI, D., COSTANTINO, G., *et al.* (2021) The diagnostic accuracy of digital, infrared and mercury-in-glass thermometers in measuring body temperature: a systematic review and network meta-analysis. *Internal and Emergency Medicine* vol. 16, n° 4, p. 1071-1083. [<https://doi.org/10.1007/s11739-020-02556-0>]
- RABINOWITZ, R.P., COOKSON, S.T., WASSERMAN, S.S., *et al.* (1996) Effects of anatomic site, oral stimulation, and body position on estimates of body temperature. *Archives of Internal Medicine*

vol. 156, n° 7, p. 777-780.

RADOSTITS, O.M., GAY, C.C., HINCHCLIFF, K.W., *et al.* (2007) Hypothermia, hyperthermia, fever. *In Veterinary medicine : A textbook of diseases of cattle, sheep goats, pigs and horses.*, 10th Edition. Philadelphia, Elsevier Saunders, p. 39-51.

RAMEY, D., BACHMANN, K., LEE, M.L. (2011) A comparative study of non-contact infrared and digital rectal thermometer measurements of body temperature in the Horse. *Journal of Equine Veterinary Science* vol. 31, n° 4, p. 191-193. [<https://doi.org/10.1016/j.jevs.2011.02.009>]

RESPE (2021) Épisode de rhinopneumonie – Les mesures sanitaires de prévention. *In Respe - Réseau d'Epidémiologie-Surveillance en Pathologie Équine.* [<https://respe.net/foyers-dherpesvirose-type-1-hve1-rhinopneumonie-mesures-sanitaires-de-prevention-03-03-2021/>] (consulté le 05/01/2023).

RING, E.F. (1998) Progress in the Measurement of Human Body Temperature. *IEEE Engineering in Medicine and Biology* p. 19-24.

ROBINSON, T.R., HUSSEY, S.B., HILL, A.E., *et al.* (2008) Comparison of temperature readings from a percutaneous thermal sensing microchip with temperature readings from a digital rectal thermometer in equids. *Journal of the American Veterinary Medical Association* vol. 233, n° 4, p. 613-617. [<https://doi.org/10.2460/javma.233.4.613>]

ROSENBERG, H., DAVIS, M., JAMES, D., *et al.* (2007) Malignant hyperthermia. *Orphanet Journal of Rare Diseases* vol. 2, n° 1, p. 21. [<https://doi.org/10.1186/1750-1172-2-21>]

RYSÄ, P., SARVARANTA, J. (2009) Corneal temperature in man and rabbit : Observations made using an infra-red camera and a cold chamber. *Acta Ophthalmologica* vol. 52, n° 6, p. 810-816. [<https://doi.org/10.1111/j.1755-3768.1974.tb01117.x>]

SCHAEFER, A.L., COOK, N.J., CHURCH, J.S., *et al.* (2007) The use of infrared thermography as an early indicator of bovine respiratory disease complex in calves. *Research in Veterinary Science* vol. 83, n° 3, p. 376-384. [<https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2007.01.008>]

SECRETARIAT D'ETAT À LA SANTÉ ET À LA PROTECTION SOCIALE, SECRETARIAT D'ETAT AU BUDGET, SECRETARIAT D'ETAT AUX PETITES ET MOYENNES ENTREPRISES, AU COMMERCE ET À L'ARTISANAT (1998) Arrêté du 24 décembre 1998 relatif à l'interdiction de mettre sur le marché des thermomètres médicaux à mercure destinés à mesurer la température interne de l'homme. *In Légifrance.* [<https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000209598>] (consulté le 10/03/2023).

SERMET-GAUDELUS, I., CHADELAT, I., LENOIR, G. (2005) La mesure de la température en pratique pédiatrique quotidienne. *Archives de Pédiatrie* vol. 12, n° 8, p. 1292-1300. [<https://doi.org/10.1016/j.arcped.2005.01.034>]

SHERWOOD, L., KLANDORF, H., YANCEY, P. (2016) *Physiologie animale.* Louvain-La-Neuve, De Boeck Sup.

SHF, FFE (2021) Reprise des compétitions nationales FFE et SHF : protocole sanitaire Rhinopneumonie. *In Fédération Française d'Équitation.* [https://docs.google.com/document/u/1/d/e/2PACX-1vSoP5qr8qY098_zgcfstplUW5NqGDQ2SM8iF8CRr9_oES7LaDWv5dJFPB_qBOr8c6Em64aRnTySCZdB/pub?urp=gmail_link&gxids=7628] (consulté le 10/03/2023).

SMITH, J. (1998) Are electronic thermometry techniques suitable alternatives to traditional mercury in glass thermometry techniques in the paediatric setting? *Journal of Advanced Nursing* vol. 28, n° 5, p. 1030-1039. [<https://doi.org/10.1046/j.1365-2648.1998.00745.x>]

SMITH, V.A., LAMB, V., MCBREARTY, A.R. (2015) Comparison of axillary, tympanic membrane and rectal temperature measurement in cats. *Journal of Feline Medicine and Surgery* vol. 17, n° 12, p. 1028-1034. [<https://doi.org/10.1177/1098612X14567550>]

SOUTHWARD, E.S., MANN, F.A., DODAM, J., *et al.* (2006) A comparison of auricular, rectal and pulmonary artery thermometry in dogs with anesthesia-induced hypothermia. *Journal of Veterinary Emergency and Critical Care* vol. 16, n° 3, p. 172-175. [<https://doi.org/10.1111/j.1476-4431.2005.00158.x>]

SULLIVAN, S.J.L., RINALDI, J.E., HARIHARAN, P., *et al.* (2021) Clinical evaluation of non-contact infrared thermometers. *Scientific Reports* vol. 11, n° 1, p. 22079. [<https://doi.org/10.1038/s41598-021-99300-1>]

SUND-LEVANDER, M., GRODZINSKY, E. (2013) Assessment of body temperature measurement

options. *British Journal of Nursing* vol. 22, n° 16, p. 942-950. [<https://doi.org/10.12968/bjon.2013.22.16.942>]

TAKAHASHI, Y., OHMURA, H., MUKAI, K., *et al.* (2020) A Comparison of Five Cooling Methods in Hot and Humid Environments in Thoroughbred Horses. *Journal of Equine Veterinary Science* vol. 91, p. 103130. [<https://doi.org/10.1016/j.jevs.2020.103130>]

TANDBERG, D., SKLAR, D. (1983) Effect of Tachypnea on the Estimation of Body Temperature by an Oral Thermometer. *New England Journal of Medicine* vol. 308, n° 16, p. 945-946. [<https://doi.org/10.1056/NEJM198304213081607>]

VALERA, M., BARTOLOMÉ, E., SÁNCHEZ, M.J., *et al.* (2012) Changes in Eye Temperature and Stress Assessment in Horses During Show Jumping Competitions. *Journal of Equine Veterinary Science* vol. 32, n° 12, p. 827-830. [<https://doi.org/10.1016/j.jevs.2012.03.005>]

VAN STAAIJ, B.K., ROVERS, M.M., SCHILDER, A.G., *et al.* (2003) Accuracy and feasibility of daily infrared tympanic membrane temperature measurements in the identification of fever in children. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology* vol. 67, n° 10, p. 1091-1097. [[https://doi.org/10.1016/S0165-5876\(03\)00198-8](https://doi.org/10.1016/S0165-5876(03)00198-8)]

WALTER, S.D., ELIASZIW, M., DONNER, A. (1998) Sample size and optimal designs for reliability studies. *Statistics in Medicine* vol. 17, n° 1, p. 101-110. [[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0258\(19980115\)17:1<101::AID-SIM727>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0258(19980115)17:1<101::AID-SIM727>3.0.CO;2-E)]

WHITE, S. (2014) Alterations in Body Temperature. In Smith B.P., *Large Animal Internal Medicine*, 5th Edition. St Louis, Elsevier, p. 31-39.

YANMAZ, L.E., DOĞAN, E., OKUMUŞ, Z., *et al.* (2015) Comparison of Rectal, Eye and Ear Temperatures in Kangal Breed Dogs. *Kafkas Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*. [<https://doi.org/10.9775/kvfd.2015.13037>]

ZAKARI, F.O., OMONTESE, B.O. (2023) Comparison of axillary and inguinal temperature with rectal temperature in dogs at a veterinary teaching hospital. *Journal of Small Animal Practice* vol. 64, n° 5, p. 330-336. [<https://doi.org/10.1111/jsap.13589>]

Annexes

Annexe 1 : Protocole sanitaire rhinopneumonie FFE et SHF



Reprise des compétitions nationales FFE et SHF Protocole sanitaire rhinopneumonie

FICHE DE TEMPERATURE Équidés hébergés en boxe sur le site

Concours : _____ N° de boxe : _____

Nom de l'équidé : _____ N° SIRE : _____

Je soussigné(e) Mme/M. _____, Personne Responsable de cet équidé, m'engage à respecter les conditions de reprise des compétitions nationales FFE et SHF, en signant ce formulaire et en le complétant quotidiennement.

Date d'arrivée : ____ / ____ Signature : _____

Température avant transport : __ , __ ° . Température Maximale autorisée : 38,5°

Prises de température sur le terrain de concours <i>Par la personne responsable de chaque équidé, à heures fixes</i>		
Date	Température matin	Température soir
___ / ___	___ , ___ °	___ , ___ °
___ / ___	___ , ___ °	___ , ___ °
___ / ___	___ , ___ °	___ , ___ °
___ / ___	___ , ___ °	___ , ___ °
___ / ___	___ , ___ °	___ , ___ °
___ / ___	___ , ___ °	___ , ___ °
___ / ___	___ , ___ °	___ , ___ °

La personne responsable signale immédiatement à l'organisateur toute température >38,5°.

L'organisateur affiche ce formulaire sur la porte de chaque boxe en amont des premières arrivées sur site, le fait contrôler quotidiennement par une personne désignée, le récupère sur les portes de boxes à l'issue du concours et le conserve.

Annexe 2 : Notes de tolérance

N° <i>individu</i>	Note obtenue/4				
	Bout du nez	Canthus médial	Cornée	Axillaire	Rectale
1	1	2	2	2	1
2	2	1	1	1	1
3	2	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1
9	2	2	2	2	1
10	1	3	3	2	4
11	1	2	2	1	1
12	1	1	1	1	1
13	1	1	1	1	1
14	1	1	1	1	1
15	1	1	1	1	1
16	1	1	1	1	1
17	1	1	1	1	1
18	1	1	1	1	1
19	1	1	1	1	1
20	1	1	1	1	1
21	1	1	1	1	1
22	1	1	1	2	1
23	1	2	2	1	1
24	1	1	1	1	1
25	1	1	1	2	2
26	1	1	1	1	1
27	1	2	2	1	1
28	1	2	2	1	1
29	1	1	1	2	2
30	1	1	1	1	3
31	1	2	2	1	1
32	1	3	3	1	1
33	1	2	2	1	1
34	1	1	1	1	1
35	1	2	2	2	3
36	1	1	1	1	1
37	1	1	1	1	1
38	1	1	1	2	1
39	1	1	1	3	2

Annexes 3 : Relevé des températures

N° individu	TR		
	Série 1	Série 2	Série 3
1	37	37	37,2
2	37,7	37,8	37,7
3	37,9	37,7	37,7
4	37,3	37,4	37,4
5	37,7	37,4	37,6
6	37,5	37,7	37,7
7	37,5	37,7	37,7
8	37,3	37,4	37,2
9	37,3	37,1	37,4
10	37,6	37,7	37,5
11	37,7	37,7	37,7
12	37,6	37,5	37,4
13	39	39,1	38,9
14	38,8	38,8	
15	37,4	37,4	
16	37,5	37,7	
17	37,7	37,5	
18	38,1	38	
19	37,1	37,4	
20	37,7	37,7	
21	36,8	36,7	
22	37,6	37,6	
23	37,2	37,3	
24	37,8	37,8	
25	37,3	37,3	
26	37,9	38	
27	38,2	38,2	
28	38,9	38,9	
29	37,3	37,7	
30	37,7	37,7	
31	38	38	
32	37,6	37,5	
33	38,2	38,1	
34	37,8	37,8	
35	37,9	37,8	
36	37,2	37,1	
37	37,4	37,4	
38	37,5	37,6	
39	36,9	37,1	
40	39,3		
41	37,7		
42	37,9		
43	37,4		
44	37,7		
45	37,4		
46	37,3		
47	38,9		
48	37,5		
49	37,4		
50	37,5		
51	37,5		
52	37,3		

N° individu	TA			TR	TAc corrigée
	Série 1	Série 2	Série 3		
1	35,9	36	36	37	37,728
2	35,7	35,1	35,9	37,7	37,528
3	35,6	35,1	36,1	37,9	37,428
4	36,2	36,1	36	37,3	38,028
5	35,7	36	35,9	37,7	37,528
6	35,2	35,7	36	37,5	37,028
7	35,7	36	36,3	37,5	37,528
8	35,2	35,9	35,6	37,3	37,028
9	36,8	36,5	36,1	37,3	38,628
10	36,1	35,9	35,9	37,6	37,928
11	37,1	36,9	36,7	37,7	38,928
12	35,1	35,7	35,9	37,6	36,928
13	33,4	34,1	34	39	35,228
14	37,4	37,3		38,8	39,228
15	34,6	34,5		37,4	36,428
16	35,5	35,7		37,5	37,328
17	36,6	36,3		37,7	38,428
18	36,1	36,1		38,1	37,928
19	35,8	35,8		37,1	37,628
20	36,3	36,5		37,7	38,128
21	34,1	35		36,8	35,928
22	36,1	36,1		37,6	37,928
23	35,8	35,6		37,2	37,628
24	36	35,7		37,8	37,828
25	35,7	35,7		37,3	37,528
26	36,1	36,3		37,9	37,928
27	36,2	37		38,2	38,028
28	37,2	37,4		38,9	39,028
29	35,8	35,7		37,3	37,628
30	35,9	36,1		37,7	37,728
31	35	35,3		38	36,828
32	35,9	35,7		37,6	37,728
33	35,5	35,6		38,2	37,328
34	36,9	36,9		37,8	38,728
35	36,4	36,6		37,9	38,228
36	36,2	35,9		37,2	38,028
37	35,9	36,1		37,4	37,728
38	35,1	35,9		37,5	36,928
39	35,5	35,3		36,9	37,328
40	36,3			39,3	38,128
47	36,1			38,9	37,928

N° individu	TN1			TR	TN2	TN1corrigée
	Série 1	Série 2	Série 3			
1	36,4	36,4	36,5	37		37,788
2	36,1	36,1	36,2	37,7		37,488
3	36,5	37	36,8	37,9		37,888
4	36,6	36,7	36,2	37,3		37,988
5	36,3	36,1	36,2	37,7		37,688
6	36,9	36,7	36,7	37,5		38,288
7	36,7	36,9	37	37,5		38,088
8	36,6	36,6	36,7	37,3		37,988
9	36,3	36,3	36,4	37,3		37,688
10	36,1	35,9	36,1	37,6		37,488
11	36,6	36,4	36,3	37,7		37,988
12	36,3	36,2	36,3	37,6		37,688
13	34,8	34,1	34,5	39		36,188
14	35,9	35,5		38,8		37,288
15	36,1	36,3		37,4		37,488
16	36,1	36,2		37,5		37,488
17	36,2	36,3		37,7		37,588
18	36,1	36,3		38,1		37,488
19	36,2	36,4		37,1		37,588
20	36,1	36,3		37,7		37,488
21	36,3	36,2		36,8		37,688
22	35,2	35,8		37,6		36,588
23	36,2	36,2		37,2		37,588
24	36,5	36,6		37,8		37,888
25	36,3	36,3		37,3		37,688
26	36,9	36,8		37,9		38,288
27	36,5	36,5		38,2		37,888
28	36,6	36,6		38,9		37,988
29	36,2	36,3		37,3		37,588
30	36,1	35,9		37,7		37,488
31	36,4	36,3		38		37,788
32	36	36,3		37,6		37,388
33	36,1	36,2		38,2		37,488
34	37	36,9		37,8		38,388
35	36,4	36,6		37,9		37,788
36	36,5	36,4		37,2		37,888
37	36,7	36,7		37,4		38,088
38	36,6	36,6		37,5	36,4	37,988
39	36,8	36,8		36,9	36,8	38,188
40	37			39,3	36,9	38,388
41	36,7			37,7	36,5	
42	36,6			37,9	36,5	
43	36,6			37,4	36,3	
44	36,7			37,7	36,4	
45	36,8			37,4	36,7	
46	36,8			37,3	36,5	
47	36,7			38,9	36,7	38,088
48	36,5			37,5	36,3	
49	36,6			37,4	36,6	
50	36,8			37,5	36,9	
51	36,8			37,5	36,9	
52	36,6			37,3	36,6	

N° individu	TCa1			TR	TCa2	TCa1corrigée
	Série 1	Série 2	Série 3			
1	37	37	36,6	37		37,92
2	36,5	36,6	36,7	37,7		37,42
3	37	37,3	37	37,9		37,92
4	36,7	36,9	36,8	37,3		37,62
5	36,7	36,8	36,8	37,7		37,62
6	36,8	36,8	37	37,5		37,72
7	37,4	37,1	37	37,5		38,32
8	36,8	37	36,8	37,3		37,72
9	36,8	36,5	36,3	37,3		37,72
10	36,8	36,7	36,6	37,6		37,72
11	36,6	36,6	36,6	37,7		37,52
12	36,7	36,7	36,6	37,6		37,62
13	36,5	36,4	36,5	39		37,42
14	36,8	36,7		38,8		37,72
15	36,3	36,4		37,4		37,22
16	36,6	36,6		37,5		37,52
17	36,7	36,7		37,7		37,62
18	36,8	36,7		38,1		37,72
19	36,7	36,6		37,1		37,62
20	37,8	37,6		37,7		38,72
21	36,5	36,7		36,8		37,42
22	36,6	36,6		37,6		37,52
23	36,4	36,4		37,2		37,32
24	36,8	36,9		37,8		37,72
25	36,7	36,5		37,3		37,62
26	37	36,8		37,9		37,92
27	36,7	36,6		38,2		37,62
28	37,8	38		38,9		38,72
29	36,8	36,6		37,3		37,72
30	36,6	36,8		37,7		37,52
31	36,7	36,5		38		37,62
32	36,7	36,8		37,6		37,62
33	36,5	36,5		38,2		37,42
34	37	37		37,8		37,92
35	37	37		37,9		37,92
36	36,7	36,7		37,2		37,62
37	36,7	36,7		37,4		37,62
38	36,8	36,8		37,5	36,8	37,72
39	36,8	36,8		36,9	36,8	37,72
40	37,6			39,3	37,7	38,52
41	36,7			37,7	36,6	
42	36,7			37,9	36,7	
43	36,8			37,4	36,5	
44	37			37,7	36,6	
45	37,2			37,4	37,4	
46	37			37,3	36,9	
47	36,7			38,9	36,7	37,62
48	36,5			37,5	37,7	
49	36,8			37,4	37,2	
50	36,8			37,5	36,5	
51	36,8			37,5	36,8	
52	36,8			37,3	36,9	

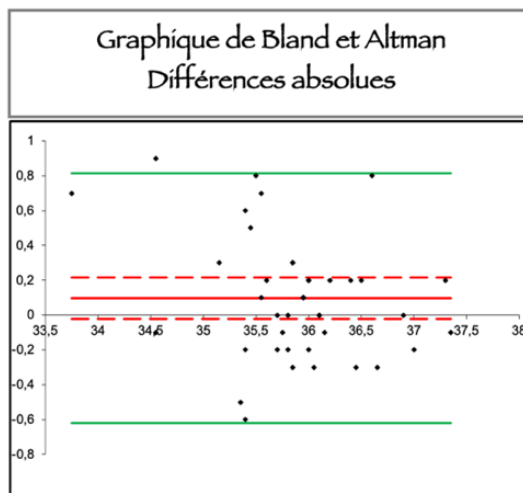
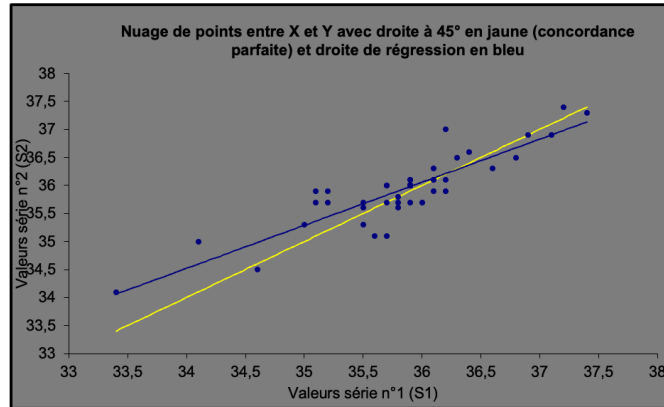
N° individu	TCo1			TR	TCo2	TCo1corrigée
	Série 1	Série 2	Série 3			
1	37,1	37	37	37		38,066
2	36,5	36,7	36,7	37,7		37,466
3	36,9	36,8	37	37,9		37,866
4	36,6	36,6	36,7	37,3		37,566
5	37	36,8	36,8	37,7		37,966
6	36,8	36,8	37	37,5		37,766
7	37,1	37,1	36,9	37,5		38,066
8	36,7	36,8	36,8	37,3		37,666
9	36,4	36,4	36,3	37,3		37,366
10	36,6	36,6	36,5	37,6		37,566
11	36,6	36,6	36,6	37,7		37,566
12	36,6	36,6	36,8	37,6		37,566
13	36,4	36,4	36,2	39		37,366
14	36,7	36,5		38,8		37,666
15	36,5	36,5		37,4		37,466
16	36,6	36,5		37,5		37,566
17	36,8	36,9		37,7		37,766
18	36,6	36,6		38,1		37,566
19	36,8	36,7		37,1		37,766
20	37	37,1		37,7		37,966
21	36,4	36,8		36,8		37,366
22	36,6	36,5		37,6		37,566
23	36,5	36,4		37,2		37,466
24	36,8	37		37,8		37,766
25	36,8	36,6		37,3		37,766
26	37	36,9		37,9		37,966
27	36,8	36,6		38,2		37,766
28	37,9	38		38,9		38,866
29	36,9	36,8		37,3		37,866
30	36,7	36,7		37,7		37,666
31	36,4	36,3		38		37,366
32	36,6	36,7		37,6		37,566
33	36,5	36,6		38,2		37,466
34	36,9	36,9		37,8		37,866
35	36,9	36,9		37,9		37,866
36	36,8	36,6		37,2		37,766
37	36,8	36,8		37,4		37,766
38	36,8	36,8		37,5	36,8	37,766
39	36,6	36,6		36,9	36,9	37,566
40	37,5			39,3	37,6	38,466
41	36,6			37,7	36,6	
42	36,7			37,9	36,7	
43	36,7			37,4	36,3	
44	36,9			37,7	36,4	
45	36,9			37,4	36,8	
46	36,9			37,3	36,6	
47	36,7			38,9	36,7	37,666
48	36,5			37,5	36,3	
49	36,6			37,4	36,8	
50	36,8			37,5	36,8	
51	36,9			37,5	36,5	
52	36,7			37,3	36,7	

Annexes 4 : Calculs du coefficient de concordance de Lin, méthodes de Bland et Altman et graphiques associés

➤ Évaluation de la méthode axillaire

○ Répétabilité

Coefficient de corrélation de Pearson	0,88
Valeur de Cb (Lin, 1989)	0,98
Coef de concordance de Lin (CCC)	0,87
Intervalle de confiance à 95% du CCC	[0,76 ; 0,93]
Part de mauvaise concordance expliquée par manque de précision	87%
Part de mauvaise concordance expliquée par manque d'exactitude	13%

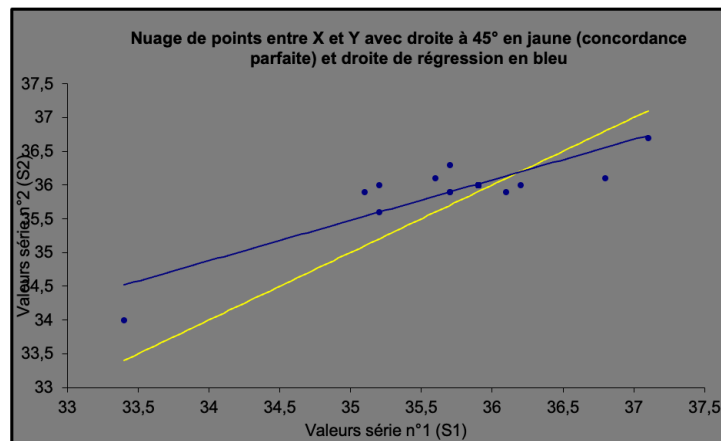


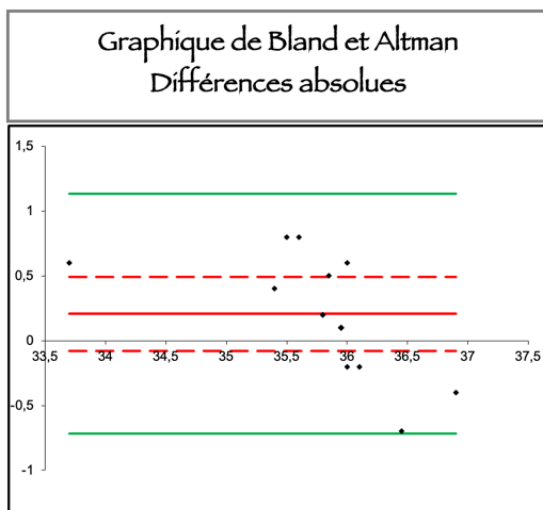
Arrondi à ... (nombre de chiffres)	3
Largeur Intervalle d'agrément (en %)	95
Biais [IC95%]	0,097 [-0,021 ; 0,216]
Valeur inf limite d'agrément [IC95%]	-0,62 [-0,829 ; -0,411]
Valeur sup limite d'agrément [IC95%]	0,815 [0,606 ; 1,024]
Coefficient de répétabilité	0,717

Méthode non paramétrique	
Biais médian	0
Valeur inf limite d'agrément	-0,6
Valeur sup limite d'agrément	0,9

○ Reproductibilité

Coefficient de corrélation de Pearson	0,87
Valeur de Cb (Lin, 1989)	0,90
Coef de concordance de Lin (CCC)	0,79
Intervalle de confiance à 95% du CCC	[0,46 ; 0,93]
Part de mauvaise concordance expliquée par manque de précision	57%
Part de mauvaise concordance expliquée par manque d'exactitude	43%



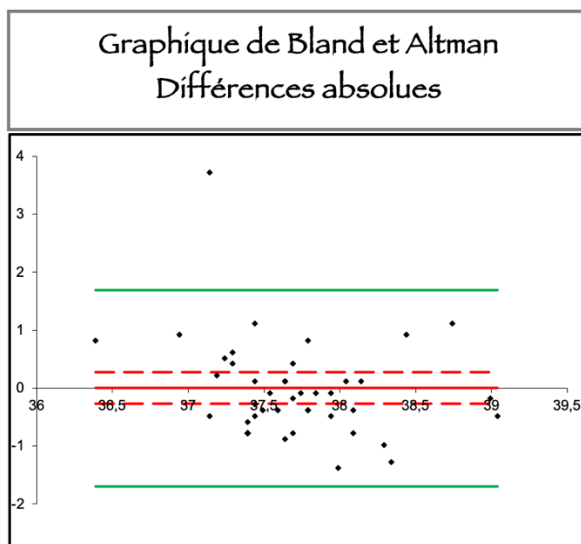
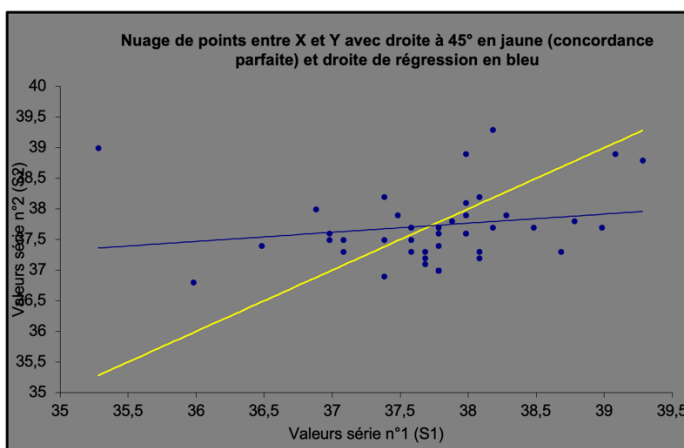


Arrondi à ... (nombre de chiffres)	3
Largeur intervalle d'agrément (en %)	95
Biais [IC95%]	0,208 [-0,077 ; 0,493]
Valeur inf limite d'agrément [IC95%]	-0,717 [-1,255 ; -0,178]
Valeur sup limite d'agrément [IC95%]	1,132 [0,593 ; 1,671]
Coefficient de répétabilité	0,924

Méthode non paramétrique	
Biais médian	0,2
Valeur inf limite d'agrément	-0,61
Valeur sup limite d'agrément	0,8

○ **Concordance avec la température rectale**

Coefficient de corrélation de Pearson	0,20
Valeur de Cb (Lin, 1989)	0,96
Coef de concordance de Lin (CCC)	0,19
Intervalle de confiance à 95% du CCC	[-0,12 ; 0,47]
Part de mauvaise concordance expliquée par manque de précision	97%
Part de mauvaise concordance expliquée par manque d'exactitude	3%



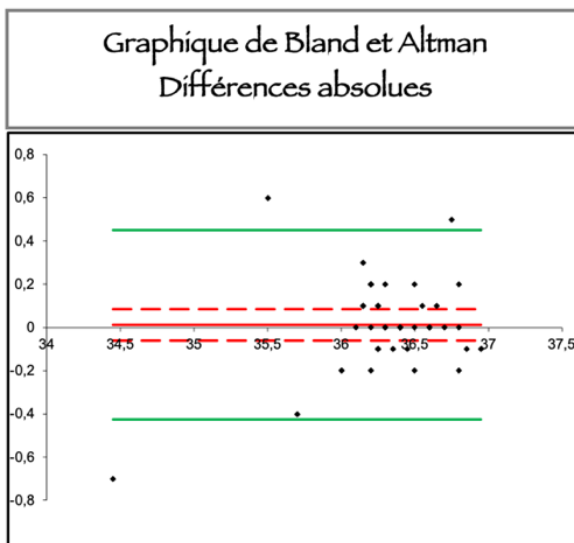
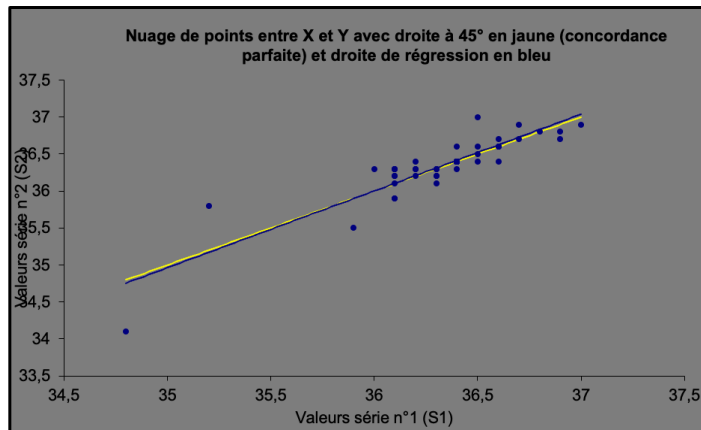
Arrondi à ... (nombre de chiffres)	3
Largeur intervalle d'agrément (en %)	95
Biais [IC95%]	0 [-0,272 ; 0,273]
Valeur inf limite d'agrément [IC95%]	-1,69 [-2,169 ; -1,211]
Valeur sup limite d'agrément [IC95%]	1,691 [1,212 ; 2,17]
Coefficient de répétabilité	1,691

Méthode non paramétrique	
Biais médian	-0,08
Valeur inf limite d'agrément	-1,375
Valeur sup limite d'agrément	3,59

➤ Évaluation de la méthode du bout du nez

○ Répétabilité

Coefficient de corrélation de Pearson	0,89
Valeur de Cb (Lin, 1989)	0,99
Coef de concordance de Lin (CCC)	0,88
Intervalle de confiance à 95% du CCC	[0,78 ; 0,93]
Part de mauvaise concordance expliquée par manque de précision	90%
Part de mauvaise concordance expliquée par manque d'exactitude	10%



Arrondi à ... (nombre de chiffres)	3
Largeur Intervalle d'agrément (en %)	95

Biais [IC95%]	0,013 [-0,06 ; 0,085]
Valeur inf limite d'agrément [IC95%]	-0,426 [-0,554 ; -0,298]
Valeur sup limite d'agrément [IC95%]	0,451 [0,324 ; 0,579]

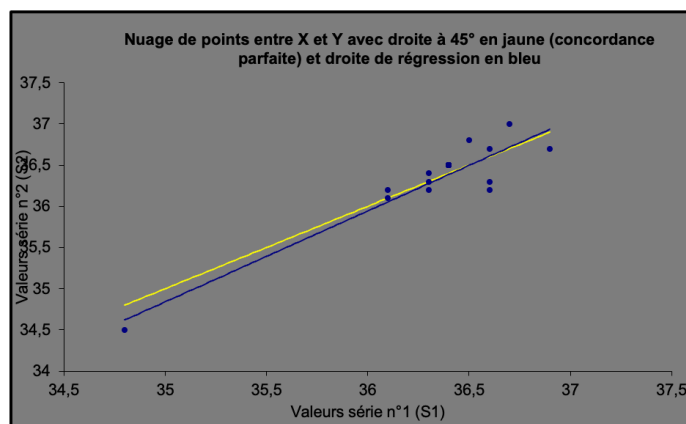
Coefficient de répétabilité	0,439
-----------------------------	-------

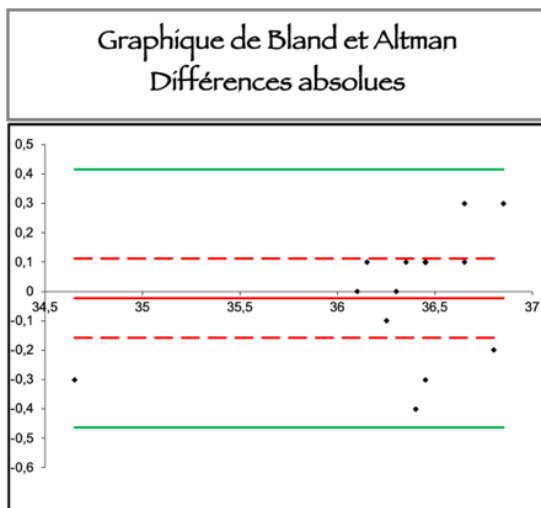
Méthode non paramétrique

Biais médian	0
Valeur inf limite d'agrément	-0,7
Valeur sup limite d'agrément	0,6

○ Reproductibilité

Coefficient de corrélation de Pearson	0,93
Valeur de Cb (Lin, 1989)	0,99
Coef de concordance de Lin (CCC)	0,92
Intervalle de confiance à 95% du CCC	[0,75 ; 0,98]
Part de mauvaise concordance expliquée par manque de précision	82%
Part de mauvaise concordance expliquée par manque d'exactitude	18%





Arrondi à ... (nombre de chiffres)	3
Largeur Intervalle d'agrément (en %)	95

Biais [IC95%]	-0,023 [-0,159 ; 0,112]
Valeur inf limite d'agrément [IC95%]	-0,462 [-0,718 ; -0,206]
Valeur sup limite d'agrément [IC95%]	0,416 [0,16 ; 0,672]

Coefficient de répétabilité	0,439
-----------------------------	-------

Méthode non paramétrique

Biais médian	0
Valeur inf limite d'agrément	-0,37
Valeur sup limite d'agrément	0,3

○ Concordance avec la température rectale

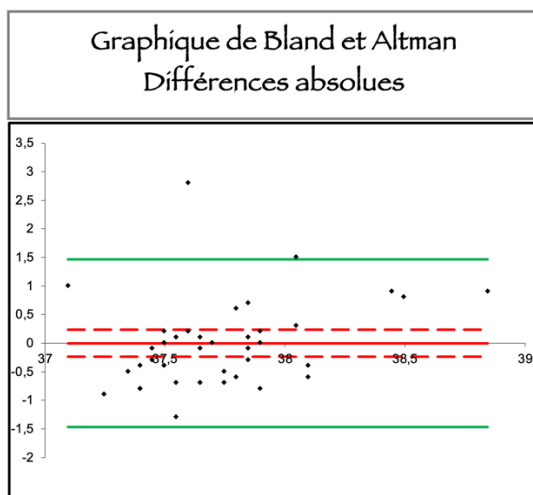
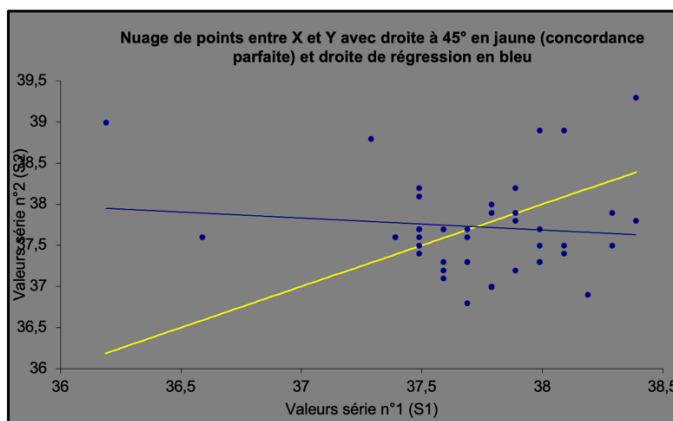
Coefficient de corrélation de Pearson	-0,11
----------------------------------------------	-------

Valeur de Cb (Lin, 1989)	0,95
---------------------------------	------

Coef de concordance de Lin (CCC)	-0,10
Intervalle de confiance à 95% du CCC	[-0,39 ; 0,2]

Part de mauvaise concordance expliquée par manque de précision	Non pertinent car coeff de Pearson <= 0
-----------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------

Part de mauvaise concordance expliquée par manque d'exactitude	Non pertinent car coeff de Pearson <= 0
-----------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------



Arrondi à ... (nombre de chiffres)	3
Largeur Intervalle d'agrément (en %)	95

Biais [IC95%]	0 [-0,236 ; 0,236]
Valeur inf limite d'agrément [IC95%]	-1,464 [-1,879 ; -1,05]
Valeur sup limite d'agrément [IC95%]	1,464 [1,049 ; 1,879]

Coefficient de répétabilité	1,464
-----------------------------	-------

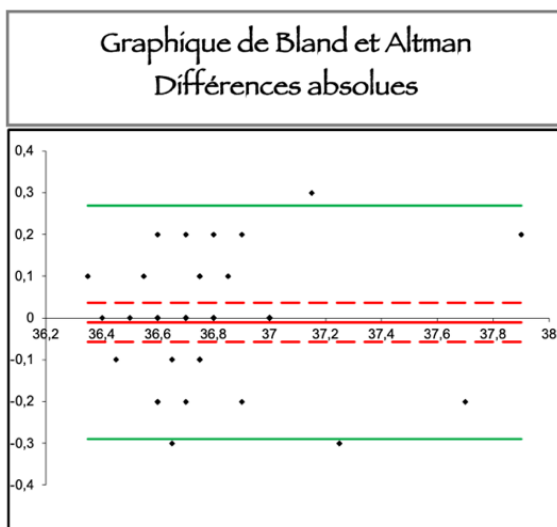
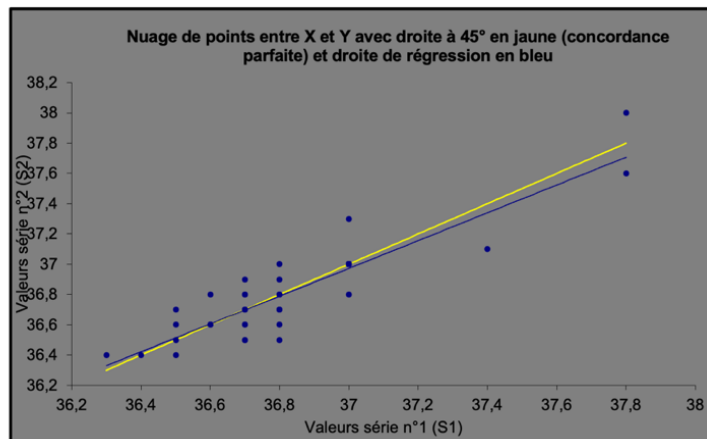
Méthode non paramétrique

Biais médian	-0,088
Valeur inf limite d'agrément	-1,268
Valeur sup limite d'agrément	2,747

➤ Évaluation de la méthode du canthus médial

○ Répétabilité

Coefficient de corrélation de Pearson	0,90
Valeur de Cb (Lin, 1989)	1,00
Coef de concordance de Lin (CCC)	0,89
Intervalle de confiance à 95% du CCC	[0,8 ; 0,94]
Part de mauvaise concordance expliquée par manque de précision	99%
Part de mauvaise concordance expliquée par manque d'exactitude	1%



Arrondi à ... (nombre de chiffres)	3
Largeur Intervalle d'agrément (en %)	95

Biais [IC95%]	-0,01 [-0,057 ; 0,036]
Valeur inf limite d'agrément [IC95%]	-0,29 [-0,372 ; -0,209]
Valeur sup limite d'agrément [IC95%]	0,27 [0,188 ; 0,351]

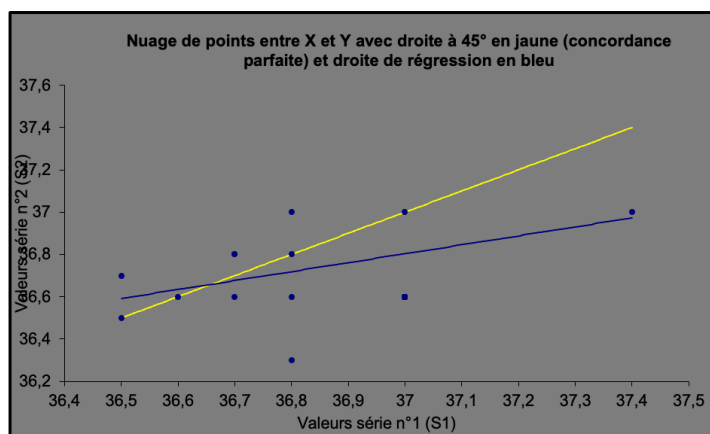
Coefficient de répétabilité	0,28
-----------------------------	------

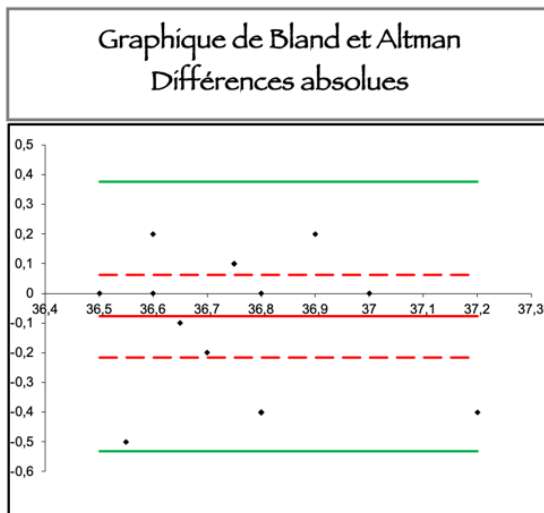
Méthode non paramétrique

Biais médian	0
Valeur inf limite d'agrément	-0,3
Valeur sup limite d'agrément	0,3

○ Reproductibilité

Coefficient de corrélation de Pearson	0,48
Valeur de Cb (Lin, 1989)	0,94
Coef de concordance de Lin (CCC)	0,45
Intervalle de confiance à 95% du CCC	[-0,15 ; 0,81]
Part de mauvaise concordance expliquée par manque de précision	92%
Part de mauvaise concordance expliquée par manque d'exactitude	8%

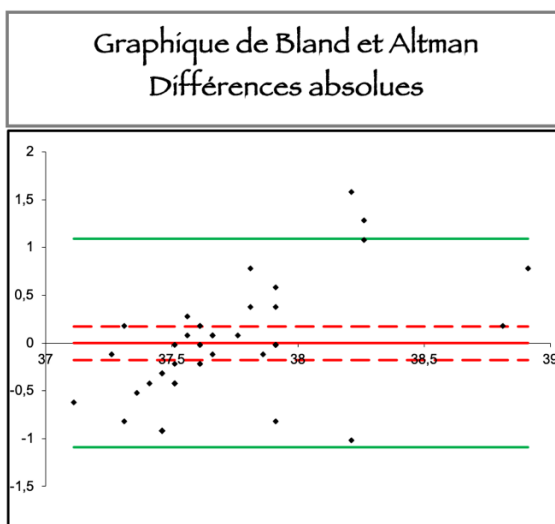




Arrondi à ... (nombre de chiffres)	3
Largeur Intervalle d'agrément (en %)	95
Biais [IC95%]	-0,077 [-0,217 ; 0,063]
Valeur inf limite d'agrément [IC95%]	-0,531 [-0,795 ; -0,266]
Valeur sup limite d'agrément [IC95%]	0,377 [0,112 ; 0,641]
Coefficient de répétabilité	0,454

Méthode non paramétrique	
Biais médian	0
Valeur inf limite d'agrément	-0,47
Valeur sup limite d'agrément	0,2

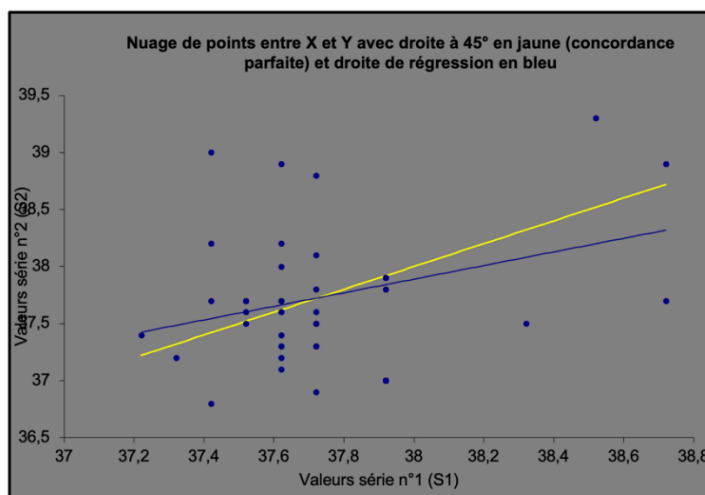
○ **Concordance avec la température rectale**



Arrondi à ... (nombre de chiffres)	3
Largeur Intervalle d'agrément (en %)	95
Biais [IC95%]	0 [-0,176 ; 0,175]
Valeur inf limite d'agrément [IC95%]	-1,09 [-1,399 ; -0,782]
Valeur sup limite d'agrément [IC95%]	1,089 [0,781 ; 1,398]
Coefficient de répétabilité	1,09

Méthode non paramétrique	
Biais médian	-0,02
Valeur inf limite d'agrément	-1,015
Valeur sup limite d'agrément	1,565

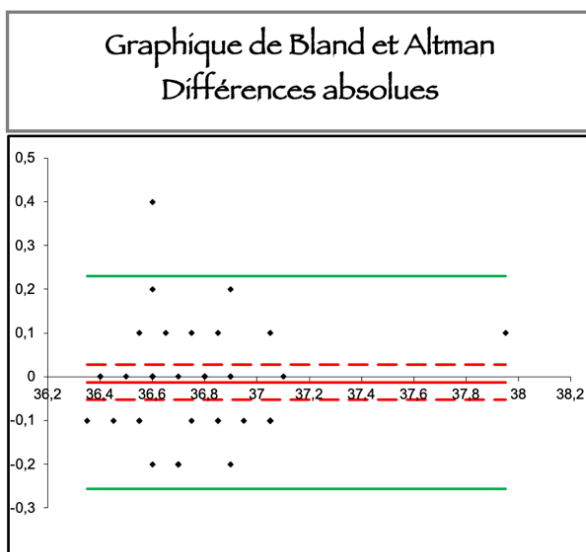
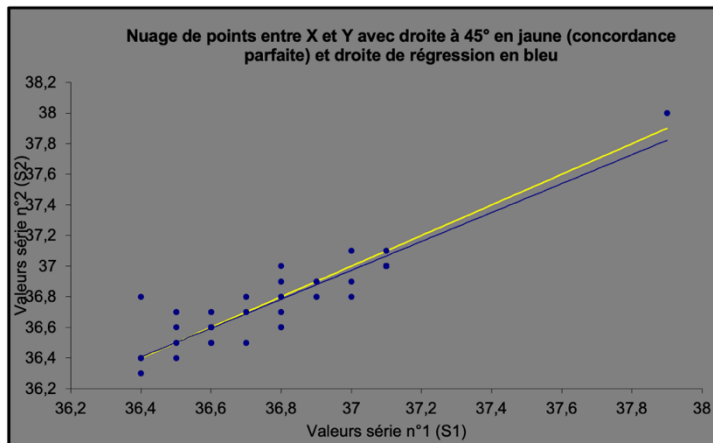
Coefficient de corrélation de Pearson	0,34
Valeur de Cb (Lin, 1989)	0,86
Coef de concordance de Lin (CCC)	0,29
Intervalle de confiance à 95% du CCC	[0,03 ; 0,52]
Part de mauvaise concordance expliquée par manque de précision	88%
Part de mauvaise concordance expliquée par manque d'exactitude	12%



➤ Évaluation de la méthode cornéenne

○ Répétabilité

Coefficient de corrélation de Pearson	0,90
Valeur de Cb (Lin, 1989)	1,00
Coef de concordance de Lin (CCC)	0,90
Intervalle de confiance à 95% du CCC	[0,81 ; 0,95]
Part de mauvaise concordance expliquée par manque de précision	98%
Part de mauvaise concordance expliquée par manque d'exactitude	2%



Arrondi à ... (nombre de chiffres)	3
Largeur intervalle d'agrément (en %)	95

Biais [IC95%]	-0,013 [-0,053 ; 0,027]
Valeur inf limite d'agrément [IC95%]	-0,256 [-0,326 ; -0,185]
Valeur sup limite d'agrément [IC95%]	0,23 [0,159 ; 0,301]

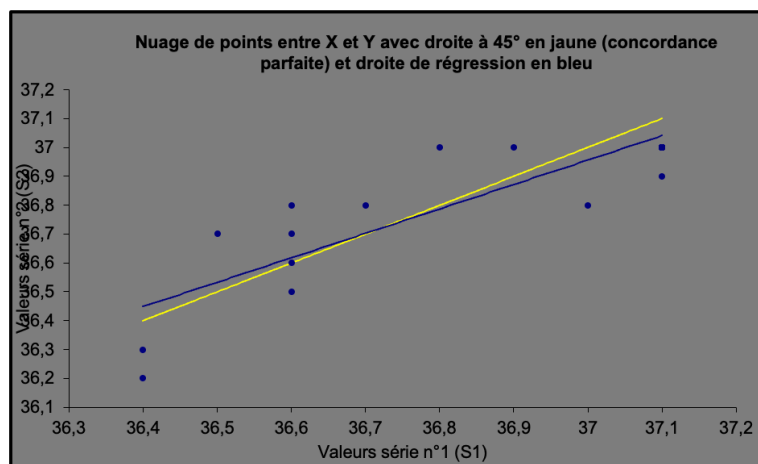
Coefficient de répétabilité	0,243
-----------------------------	-------

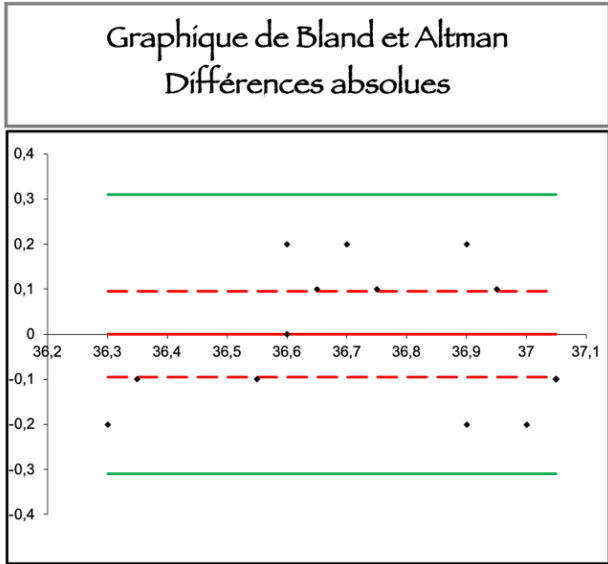
Méthode non paramétrique

Biais médian	0
Valeur inf limite d'agrément	-0,2
Valeur sup limite d'agrément	0,4

○ Reproductibilité

Coefficient de corrélation de Pearson	0,80
Valeur de Cb (Lin, 1989)	1,00
Coef de concordance de Lin (CCC)	0,80
Intervalle de confiance à 95% du CCC	[0,42 ; 0,94]
Part de mauvaise concordance expliquée par manque de précision	99%
Part de mauvaise concordance expliquée par manque d'exactitude	1%



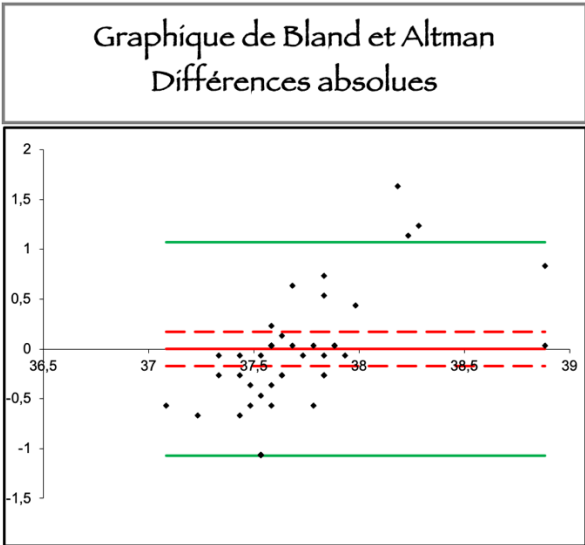
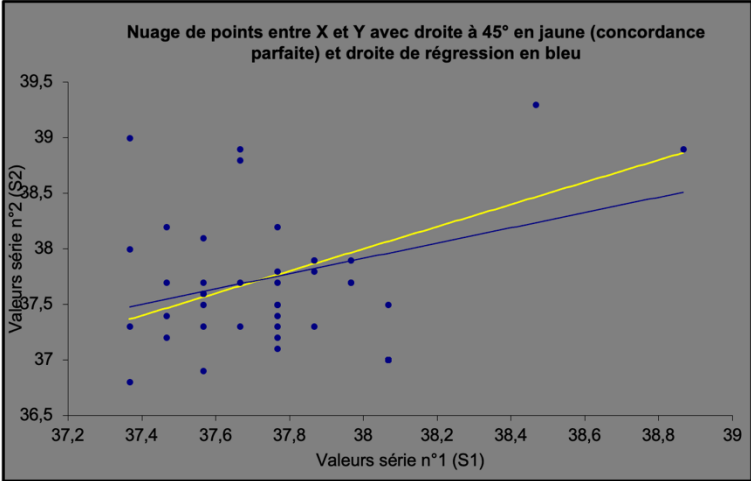


Arrondi à ... (nombre de chiffres)	3
Largeur intervalle d'agrément (en %)	95
Biais [IC95%]	0 [-0,096 ; 0,096]
Valeur inf limite d'agrément [IC95%]	-0,31 [-0,49 ; -0,129]
Valeur sup limite d'agrément [IC95%]	0,31 [0,129 ; 0,49]
Coefficient de répétabilité	0,31

Méthode non paramétrique	
Biais médian	0
Valeur inf limite d'agrément	-0,2
Valeur sup limite d'agrément	0,2

○ **Concordance avec la température rectale**

Coefficient de corrélation de Pearson	0,35
Valeur de Cb (Lin, 1989)	0,81
Coef de concordance de Lin (CCC)	0,28
Intervalle de confiance à 95% du CCC	[0,03 ; 0,5]
Part de mauvaise concordance expliquée par manque de précision	83%
Part de mauvaise concordance expliquée par manque d'exactitude	17%



Arrondi à ... (nombre de chiffres)	3
Largeur intervalle d'agrément (en %)	95
Biais [IC95%]	0 [-0,172 ; 0,172]
Valeur inf limite d'agrément [IC95%]	-1,07 [-1,373 ; -0,767]
Valeur sup limite d'agrément [IC95%]	1,069 [0,766 ; 1,372]
Coefficient de répétabilité	1,07

Méthode non paramétrique	
Biais médian	-0,066
Valeur inf limite d'agrément	-1,046
Valeur sup limite d'agrément	1,614

COMPARAISON DE DIFFÉRENTES MÉTHODES NON INVASIVES DE MESURE DE LA TEMPÉRATURE CORPORELLE CHEZ LE CHEVAL

AUTEUR : Léna LEGRAND

RÉSUMÉ :

La mesure de la température corporelle est un élément fondamental dans la prévention et le dépistage des maladies chez le cheval. La prise de température rectale au thermomètre électronique est, à ce jour, la méthode de référence. Cependant, cette technique impose plusieurs limites telles que la mise en danger de l'opérateur, la transmission de maladies nosocomiales, et la durée d'acquisition de la mesure. Ainsi, des méthodes de mesure alternatives ont été envisagées chez l'Homme et chez différentes espèces animales, mais très peu de données sont disponibles chez le Cheval. L'objectif de cette étude, était d'étudier la validité de quatre méthodes de mesure de la température corporelle que sont la mesure axillaire au thermomètre électronique, la mesure au bout du nez, la mesure de la cornée et la mesure au canthus médial de l'œil, toutes trois au thermomètre infrarouge sans-contact portable. Au total, 52 chevaux ont été inclus dans cette étude.

La tolérance des individus était bonne à excellente pour toutes les méthodes testées mais les méthodes infrarouges fournissaient le temps d'acquisition le plus rapide. La méthode cornéenne a montré les résultats les plus satisfaisants avec une très bonne répétabilité, une bonne reproductibilité inter-opérateurs et une concordance passable avec la température rectale. Elle présentait aussi d'excellentes spécificité et valeur prédictive positive pour le dépistage de l'hyperthermie. Cependant, sur un plan clinique, la méthode n'était pas assez sensible et précise pour se substituer à la méthode rectale et son utilisation pourrait conduire à de nombreux faux négatifs. La méthode au canthus médial de l'œil a révélé des résultats semblables. Les méthodes au bout du nez et axillaire ont fourni des résultats décevants. La localisation du box et la température extérieure ne montraient pas d'association statistique significative avec les valeurs de température mesurées quelle que soit la méthode, hormis pour le bout du nez. Enfin, la comparaison de deux thermomètres infrarouges sans contact a montré que les séries mesurées ne fournissaient pas exactement les mêmes valeurs de température, ne permettant pas de généraliser les résultats à tous les modèles de thermomètres infrarouge sans-contact portables.

Ce travail n'a pas permis d'identifier une méthode apte à remplacer la mesure rectale. Des études avec d'autres modèles de thermomètres et sur des effectifs plus larges pourraient fournir de meilleurs résultats.

MOTS CLÉS :

CHEVAL / TEMPÉRATURE / MESURE / MÉTHODE DE RÉFÉRENCE / THERMOMÈTRE ÉLECTRONIQUE / THERMOMÈTRE INFRAROUGE SANS CONTACT / TEMPÉRATURE RECTALE / TEMPÉRATURE OCULAIRE / TEMPÉRATURE AXILLAIRE

JURY :

Président : Pr Loïc DESQUILBET

Directrice de thèse : Pr Céline ROBERT

Examineur : Dr Ludovic TANQUEREL

COMPARISON OF DIFFERENT NON-INVASIVE METHODS FOR BODY TEMPERATURE MEASUREMENT IN HORSES

AUTHOR: Léna LEGRAND

SUMMARY:

Measurement of body temperature is a fundamental element in prevention and screening of diseases in horses. Rectal temperature measurement with an electronic thermometer is currently the gold standard. However, this technique imposes numerous limitations such as endangering the operator, transmission of nosocomial diseases, and duration of measurement acquisition. As a result, alternative measurement methods have been considered in humans and various animal species, but few data is available for horses. The objective of this study was to investigate four methods for measuring body temperature: axillary measurement with an electronic thermometer, measurement at the tip of the nose, corneal measurement, and measurement at the medial canthus of the eye, all three using a portable contactless infrared thermometer. In total, 52 horses were included in this study.

Individual tolerance was good to excellent for all tested methods, but the infrared methods provided the fastest acquisition time. The corneal method showed the most satisfactory results with very good repeatability, good inter-operator reproducibility, and fair agreement with rectal temperature. It also exhibited excellent specificity and positive predictive value for detecting hyperthermia. However, from a clinical perspective, the method was not sensitive and precise enough to replace the rectal method, and its use could lead to many false negatives. The medial canthus of the eye method revealed similar results. The methods at the tip of the nose and axillary provided disappointing results. Stable's location and outdoor temperature did not demonstrate any statistically significant association with the measured temperature values, irrespective of the method, except for the tip of the nose. Finally, comparison of two contactless infrared thermometers showed that measured series did not provide exactly same temperature values, preventing generalization of results to all models of portable contactless infrared thermometers.

This work did not identify a method that could replace rectal measurement. Studies using other models of thermometer and involving larger sample sizes could provide better results.

KEYWORDS:

HORSE / TEMPERATURE / MEASUREMENT / REFERENCE METHOD / EXPERIMENTAL STUDY / ELECTRONIC THERMOMETER / NON-CONTACT INFRARED THERMOMETER / RECTAL TEMPERATURE / EYE TEMPERATURE / AXILLARY TEMPERATURE

JURY:

Chairperson: Pr Loïc DESQUILBET

Thesis Director: Pr Céline ROBERT

Reviewer: Dr Ludovic TANQUEREL