



HAL
open science

Utilisation d'objets connectés pour le suivi en course des chevaux d'endurance : étude exploratoire

Nicolas Rallet

► To cite this version:

Nicolas Rallet. Utilisation d'objets connectés pour le suivi en course des chevaux d'endurance : étude exploratoire. Médecine vétérinaire et santé animale. 2023. dumas-04303626

HAL Id: dumas-04303626

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04303626v1>

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Année 2023

UTILISATION D'OBJETS CONNECTÉS POUR LE SUIVI EN COURSE DES CHEVAUX D'ENDURANCE : ÉTUDE EXPLORATOIRE

THÈSE

pour obtenir le diplôme d'État de

DOCTEUR VÉTÉRINAIRE

présentée et soutenue publiquement devant

la Faculté de Médecine de Créteil (UPEC)

le 30 Octobre 2023

par

Nicolas, Aymeric, Marie RALLET

sous la direction de

Céline ROBERT

JURY

Présidente du jury :	Mme Fanny PILOT-STORCK	Professeur à VetAgroSup
Directrice de thèse :	Mme Céline ROBERT	Professeur à l'EnvA
Examinatrice :	Mme Lélia BERTONI	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	Ponter	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	Benchekroun	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	Guélin-Poirier	Valentine	Maître de conférences	DPASP
Mme	Jacquet	Sandrine	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
M	Kurtz	Maxime	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
Mme	Lagréé	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	Bérandère	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 Pr. Fanny STORCK, Professeur à VetAgroSup,

Qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence de ce jury de thèse, Hommage respectueux.

Au Pr. Céline ROBERT, Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort,

Qui m'a proposé et accompagné dans ce sujet,

Qui m'a encadré et motivé pour réaliser de nombreuses manipulations.

Merci de m'avoir permis de découvrir le monde de l'endurance équestre de l'intérieur et pour votre patience, votre implication et votre disponibilité.

Au Dr. BERTONI Lélia, Maître de conférences à l'Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort,

Qui m'a fait l'honneur de bien vouloir être examinateur de thèse,

Sincères remerciements.

Au Dr Claire LELEU,

Pour avoir participé au projet et nous avoir permis de travailler avec des trotteurs.

Merci pour cette nouvelle expérience vécue.

Remerciements

A ma famille,

Mes parents, pour leur soutien et leur bienveillance durant toutes ces années.
Mes grands-parents, pour votre présence et votre amour. Merci de m'avoir permis d'écrire cette thèse dans les meilleures conditions possibles.
Mon frère et ma sœur, toujours là pour me soutenir et me motiver à atteindre mes objectifs.

A mes amis,

Ceux du collège à l'école vétérinaire en passant par ceux du cheval. Merci pour tous ces bons moments passés ensemble et ceux encore à venir. Mention spéciale pour la team BTP, merci d'avoir été toujours là pour moi dans les moments difficiles.

A mes chevaux partis trop tôt, Ukinella et Tzatziki,

Merci pour toutes ces années ensemble et de m'avoir transmis tant de choses. Je ne vous oublierai jamais.

A mes autres bêtes à poils, Peach et Lilou, Rodéo, Jipsy et Viveka,

Toujours présents pour redonner le sourire ou le temps d'un câlin.

Table des matières

Liste des figures.....	3
Liste des tableaux.....	5
Liste des abréviations.....	7
Introduction.....	9
Première partie : bibliographie.....	11
1. Présentation de l'endurance équestre.....	11
A. Définition et généralités.....	11
B. Historique de la discipline.....	11
C. Déroulé d'une course.....	12
2. Défis locomoteurs et métaboliques liés à l'effort de longue durée.....	13
A. Défis locomoteurs du cheval d'endurance.....	13
a. Adaptation de l'appareil locomoteur aux efforts de longue durée.....	13
b. Lésions de l'appareil locomoteur chez les chevaux d'endurance.....	14
B. Défis métaboliques.....	15
a. Rappel sur la physiologie de l'effort d'endurance.....	15
b. Métabolisme énergétique au cours de l'effort.....	16
c. Biomarqueurs associés à la condition physique en course.....	17
C. Identification des facteurs de risques associés aux causes d'élimination.....	18
a. Facteurs de risque associés aux boiteries.....	18
b. Facteurs de risque associés aux troubles métaboliques.....	19
c. Facteurs de risque généraux.....	19
d. Interprétation des facteurs de risque.....	19
3. Outils disponibles pour le suivi des chevaux en course.....	19
A. Suivi des paramètres biologiques lors des contrôles vétérinaires.....	19
B. Suivi par le cavalier en course.....	20
C. Limites du suivi en course.....	20
4. Le développement des objets connectés.....	21
A. Suivi de locomotion.....	21
B. Suivi cardiaque.....	23
C. Thermohip.....	24
D. Capteur de glycémie.....	26
Deuxième partie : étude expérimentale.....	29
1. Utilisation de différents objets connectés en conditions standardisées chez des chevaux d'endurance.....	29
A. Matériels et méthodes.....	30
a. Animaux.....	30
b. Etapes préliminaires.....	30
c. Protocole expérimental.....	30
Résultats.....	32
a. Vitesse.....	32
b. Fréquence cardiaque.....	33
c. Température corporelle.....	35
d. Lactatémie.....	37
e. Glycémie.....	39
f. Synthèse sur l'entraînement.....	41
C. Discussion.....	42
2. Suivi en course de température et glycémie.....	43
A. Matériels et méthodes.....	43
a. Animaux.....	43
b. Protocole expérimental.....	44
B. Résultats.....	45

a.	Données générales sur les conditions de courses	45
b.	Température : comparaison des valeurs de la température de la puce et de la température rectale.....	46
c.	Température : évolution de la température de la puce pendant une course d'endurance.....	51
d.	Température : influence de l'environnement sur la différence entre la température rectale et la température de la puce	52
e.	Evolution du glucose interstitiel pendant la course	53
f.	Difficultés liées à la mesure du glucose interstitiel pendant une course.....	55
C.	<i>Discussion</i>	56
3.	Effet de la méthode de refroidissement sur la température corporelle après un test d'effort standardisé	57
A.	<i>Matériels et méthodes</i>	57
a.	Animaux	57
b.	Protocole expérimental	57
B.	<i>Résultats</i>	59
a.	Conditions expérimentales.....	59
b.	Evolution de la température de la puce au cours de l'effort et selon la méthode de refroidissement.....	59
c.	Effet de la méthode de refroidissement sur la récupération	60
d.	Comparaison des valeurs des températures de la puce et rectale	62
C.	<i>Discussion</i>	64
4.	Discussion Générale	66
A.	<i>Originalité de l'étude</i>	66
B.	<i>Principaux résultats</i>	67
a.	Validation du protocole sur le terrain.....	67
b.	Validation de l'utilisation de la puce Biothermo ND à l'effort et limites	67
c.	Validation du capteur de glucose interstitiel et limites	68
C.	<i>Limites de l'étude</i>	70
a.	Effectifs	70
b.	Nombre de courses suivies.....	70
c.	Conditions climatiques	71
D.	<i>Perspectives d'évolution</i>	72
a.	Poursuite de l'étude	72
b.	Etude des différentes méthodes de refroidissement	72
c.	Etude des différents facteurs impactant la glycémie en course	73
	Conclusion	75
	Liste des références bibliographiques	77
	Annexe 1 : liste des publications issues de la thèse	85
	Annexe 2 : fonctionnement de la ThermoChip à technologie Biothermo ND (source : MSD Animal Health)	87
	Annexe 3 : exemple de données acquises en course d'endurance (étude n°2)	89
	Annexe 4 : Protocole de pose du capteur FreeStyle Libre 2 (Abbott). (C. Robert, Pratique vétérinaire équine 2023 n°216)	91

Liste des figures

Figure 1 - Les différentes voies métaboliques utilisées au cours de l'effort en fonction de la vitesse et de la distance parcourue.	15
Figure 2 – Exemple de fonctionnement d'un capteur connecté avec application sur téléphone. (Source : Equisense, 2023).	22
Figure 3 – Evolution de la fréquence cardiaque (BPM) en fonction de la vitesse (m/s) et détermination de la V200 d'un cheval de course. (Source : Arioneo, 2023).	23
Figure 4 - Transferts thermiques chez le cheval à l'effort.	25
Figure 5 - Évolution des vitesses moyennes (km/h) en fonction des paliers définis pour les lots de chevaux 1 et 2. Données acquises via Waook ND.	32
Figure 6 - Variation de la vitesse (km/h) au cours du test du cheval C. Données acquises via Movin'Smart ND.	32
Figure 7 - Fréquence cardiaque moyenne (bpm) du lot 1 de chevaux au cours du test.	33
Figure 8 - Fréquence cardiaque moyenne (bpm) du lot 2 de chevaux au cours du test.	34
Figure 9 - Fréquence cardiaque maximale (bpm) atteinte par les chevaux au cours de l'effort.	34
Figure 10 - Variation de la fréquence cardiaque (bpm) au cours du test du cheval C. Données acquises via Movin'Smart ND.	35
Figure 11 - Relation entre la température rectale (TR) et la température de la puce (TP) en fonction du moment de mesure. La droite noire pointillée correspondrait à $TP = TR$. La droite mauve est la régression linéaire sur les mesures.	36
Figure 12 - Graphique de Bland-Altman pour la comparaison entre température rectale (TR) et température de la puce (TP). Les pointillés rouges indiquent les limites d'agrément à 95%.	37
Figure 13 – Évolution de la lactatémie (mmol/L) au cours du test pour le lot 1.	37
Figure 14 - Évolution de la lactatémie (mmol/L) au cours du test pour le lot 2.	38
Figure 15 - Évolution de la température de la puce (TP) (°C) et de la lactatémie (mmol/L) en fonction des temps de mesure. Valeurs médianes, minimales et maximales sur les 5 chevaux.	38
Figure 16 - Évolution de la glycémie et du glucose interstitiel (mg/dL) en fonction des différents temps de l'expérimentation chez les différents lots de chevaux de l'étude.	40
Figure 17 - Synthèse des différents paramètres suivis au cours de l'entraînement chez les cinq chevaux. (FC : fréquence cardiaque ; TP : température de la puce).	41
Figure 18 – Capteur de glycémie FreeStyle Libre 2 ND en place au cours d'une épreuve.	44
Figure 19 - Évolution de la température de la puce (TP) en fonction de la température rectale (TR) chez le cheval A pour l'ensemble de ses courses.	47

Figure 20 - Évolution de la température de la puce (TP) en fonction de la température rectale (TR) chez le cheval BA pour l'ensemble de ses courses.	48
Figure 21 - Évolution de la température de la puce (TP) en fonction de la température rectale (TR) chez le cheval BE pour l'ensemble de ses courses	48
Figure 22 - Graphique de Bland-Altman comparant les valeurs de la température de la puce (TP) et de la température rectale (TR) du cheval A. <i>Les pointillés rouges indiquent les limites d'agrément à 95%</i>	49
Figure 23 - Graphique de Bland-Altman comparant les valeurs de la température de la puce (TP) et de la température rectale (TR) du cheval BA. <i>Les pointillés rouges indiquent les limites d'agrément à 95%</i>	49
Figure 24 - Graphique de Bland-Altman comparant les valeurs de la température de la puce (TP) et de la température rectale (TR) du cheval BE. <i>Les pointillés rouges indiquent les limites d'agrément à 95%</i>	50
Figure 25 - Graphique de Bland-Altman comparant les valeurs de la température de la puce (TP) et de la température rectale (TR) sur l'ensemble des données acquises. <i>Les pointillés rouges indiquent les limites d'agrément à 95%</i>	50
Figure 26 - Évolution de la température de la puce (°C) en fonction du temps de course (h) (<i>cheval BE, 160 km</i>). <i>B = phase d'effort (boucle) ; R = phase de récupération</i>	51
Figure 27 - Evolution du glucose interstitiel (mg/dL) en fonction du temps de course (h) (<i>cheval BA, 100 km</i>). <i>B = phase d'effort (boucle) ; R = phase de récupération</i>	53
Figure 28 - Variation du glucose interstitiel (mg/dL) après normalisation en fonction des étapes de course sur des distances de 100, 120 et 160 km respectivement pour les chevaux BA, A et BA...54	
Figure 29 - Évolution de la température de la puce (°C) au cours de l'effort et de la récupération selon la méthode de refroidissement. <i>Valeurs moyennes sur les quatre chevaux</i>	60
Figure 30 - Temps nécessaires pour un retour des températures de la puce (TP) et rectale (TR) à 38,5°C et de la fréquence cardiaque (FC) à 64 bpm en fonction du mode de refroidissement. <i>Valeurs moyennes et écart types sur les 4 chevaux</i>	61
Figure 31 - Évolution de la température de la puce (TP) en fonction de la température rectale (TR). <i>La droite représente la courbe de tendance et R² le coefficient de détermination</i>	62
Figure 32 - Graphique de Bland-Altman comparant les valeurs de la température rectale (TR) et de la température de la puce (TP). <i>Les pointillés rouges indiquent les limites d'agrément à 95%</i>	63

Liste des tableaux

Tableau 1 - Caractéristiques des chevaux de l'étude 1.....	30
Tableau 2 - Détails de l'expérimentation, des temps de mesure et de prélèvements sur les chevaux.	31
Tableau 3 - Synthèse des résultats obtenus pour la température.....	35
Tableau 4 – Moyennes des températures obtenues en fonction des temps de l'étude.	35
Tableau 5 - Moyennes, différences, écart-types, coefficient de corrélation obtenus pour la glycémie et le glucose interstitiel selon les temps de mesure. <i>Les cases grisées correspondent à des analyses non réalisables. S.d = écart-type.</i>	39
Tableau 6 - Caractéristiques des chevaux de l'étude 2.....	44
Tableau 7 - Résumé des courses suivies et des mesures effectuées. <i>TP : température de la puce ; TR : température rectale</i>	45
Tableau 8 - Comparaison des valeurs moyennes des températures de la puce (TP) et rectale (TR) selon les courses. <i>S.D = écart-type.</i>	46
Tableau 9 - Résumé des données de température obtenues en courses pour le cheval A, (<i>S.d = écart-type ; TP : température puce ; TR : température rectale</i>).....	46
Tableau 10 - Résumé des données de température obtenues en courses pour le cheval BA, (<i>S.d = écart-type ; TP : température puce ; TR : température rectale</i>).....	47
Tableau 11 - Résumé des données de température obtenues en courses pour le cheval BE, (<i>S.d = écart-type ; TP : température puce ; TR : température rectale</i>).....	47
Tableau 12 – Résumés des moyennes de différence entre la température rectale et celle de la puce (TR-TP) et des températures extérieures (Text) obtenues lors des différentes périodes de récupération en courses pour les trois chevaux.....	52
Tableau 13 – Nombre de courses effectuées avec un capteur de glucose interstitiel et données obtenues.	55
Tableau 14 – Répartition des différents protocoles de refroidissement reçu selon le jour de test et le cheval.....	58
Tableau 15 – Conditions environnementales et données d'effort moyennes selon les différents protocoles réalisés. <i>Moyennes sur les quatre chevaux et les quatre sessions de tests.</i>	59

Liste des abréviations

AAR : *Animal Activity Recognition* (AAR)

ASAT : Aspartate aminotransférase

BPM : Battements Par Minute

CEI : Concours de Raid d'endurance International (source : FEI)

CRI : *Cardiac Recovery Index*

CRT : *Cardiac Recovery Time* = Temps de Récupération Cardiaque (TRC)

CGM : *Continuous Glucose Monitoring*

ECG : Électrocardiogramme

FFE : Fédération Française d'Équitation

FC : Fréquence Cardiaque

FR : Fréquence Respiratoire

HAR : *Human Activity Recognition*

IMU : *Inertial Measurement Unit*

IRM : Imagerie par Résonance Magnétique

MARD : *Mean Absolute Relative Difference*

MDI : *Metabolic Disorder Index*

PPID : *Pituitary Pars Intermedia Dysfunction*

PTSM : *Percutaneous Thermal Sensing Microchip*

RFID : *Radio Frequency identification*

SME : Syndrome Métabolique Equin

TP : Température donnée par la Puce

TR : Température Rectale

TRC : Temps de Recoloration Capillaire

V4 : Vitesse à laquelle le cheval atteint une lactatémie de 4 mmol/L

V200 : Vitesse à laquelle le cheval atteint la fréquence de 200 battements par minute

VFC : Variabilité de la Fréquence Cardiaque

Introduction

L'endurance équestre est une discipline exigeante qui met à l'épreuve la résistance, la vitesse et la performance des chevaux sur des distances allant jusqu'à 160 kilomètres parcourus en une journée. Cela implique une compréhension approfondie de l'effort fourni par le cheval et de la manière dont il peut être optimisé pour aboutir à la meilleure performance possible dans le respect de l'équidé.

Cependant, l'effort d'endurance chez les chevaux soulève de nombreuses problématiques complexes. Ces athlètes équins doivent maintenir un rythme soutenu sur de longues distances, tout en gérant habilement leur consommation d'énergie, leur hydratation et leur récupération. Le suivi précis de ces paramètres est essentiel pour évaluer la performance des chevaux, détecter les signes de fatigue ou de stress, et prévenir les risques de blessures ou de surmenage. Les méthodes conventionnelles d'évaluation, telles que les examens vétérinaires, les observations visuelles ou les mesures manuelles, présentent des contraintes en termes de fiabilité, de précision et de capacité à fournir des informations en temps réel. Le suivi en course des chevaux d'endurance est donc actuellement limité d'un point de vue technique et pratique, ce qui peut nuire à sa vocation de prévention des blessures et accidents. Ainsi, à l'ère des nouvelles technologies, l'utilisation d'objets connectés a émergé comme une solution prometteuse pour le suivi en temps réel et l'analyse détaillée des paramètres physiologiques des chevaux pendant les courses d'endurance. Ceci est d'autant plus vrai que le bien-être animal devient un enjeu majeur dans le monde équestre

L'objectif de cette thèse est de constituer une étude exploratoire quant à l'utilisation d'objets connectés pour le suivi en course des chevaux d'endurance et aux défis qui y sont associés. Nous chercherons à comprendre comment ces technologies peuvent améliorer la collecte de données physiologiques, telles que la glycémie, la température corporelle, la fréquence cardiaque, la vitesse et des paramètres de mouvement. Nous examinerons également comment ces données peuvent être intégrées, traitées et analysées pour fournir des informations pertinentes aux cavaliers, aux vétérinaires et aux entraîneurs de chevaux, afin d'optimiser l'entraînement, la stratégie de course et les soins apportés aux équidés. Pour cela, une première partie bibliographique visera à présenter la discipline, les enjeux médicaux soulevés et la place des objets connectés. Une seconde partie expérimentale se composera des résultats de trois études faisant appel à l'utilisation de capteurs et d'objets connectés et portant respectivement sur la réalisation d'un test d'effort chez des chevaux d'endurance, le suivi de la température et de la glycémie en courses d'endurance, et l'effet de la méthode de refroidissement sur la température corporelle après effort. Une discussion générale viendra clôturer cette partie expérimentale.

En abordant ces questions, nous espérons contribuer à l'avancement des connaissances dans le domaine du suivi sportif des chevaux en particulier en course d'endurance et à l'amélioration du respect du bien-être équin au cours de ces compétitions. En outre, ces recherches pourraient ouvrir la voie à de nouvelles applications des objets connectés dans les sports équestres, ainsi que dans le domaine de la santé équine en général.

Première partie : bibliographie

1. Présentation de l'endurance équestre

A. Définition et généralités

L'endurance équestre est, d'après la Fédération Française d'équitation, 2022, « caractérisée par des épreuves d'extérieur courues à vitesse imposée ou libre sur un itinéraire balisé avec des examens vétérinaires validant la capacité du poney/cheval à parcourir de longues distances ». Il s'agit en effet de parcourir des distances allant de 20 km à 160 km en effectuant une succession de boucles et de passages à des contrôles vétérinaires. L'objectif est de réaliser le temps minimal pour couvrir la distance tout en s'assurant du maintien de la bonne santé de son cheval. En cas de boiterie, troubles métaboliques divers, liés à la déshydratation notamment, syndrome d'épuisement, etc., le cavalier et son cheval sont éliminés de la compétition.

L'endurance fait partie des disciplines équestres agréées par la fédération équestre internationale et était présente lors des éditions des jeux équestres mondiaux depuis leur création en 1990.

B. Historique de la discipline

L'endurance équestre a une histoire riche et variée qui remonte à plusieurs siècles. Ses origines se confondent avec les cultures nomades et les traditions de cavaliers qui parcouraient de vastes territoires, de l'Arabie à l'Europe, en passant par l'Australie ou l'Amérique. L'hypothèse la plus célèbre concernant les origines de l'endurance est sans doute celle du *Pony express*, où les services postaux employèrent le relais de nombreux cavaliers pour couvrir la liaison entre St. Joseph, Missouri et San Francisco, dans les années 1860 (POPE, 1992). A cela s'ajoute l'organisation de premières compétitions, comme par exemple le raid militaire international de 1902 entre Bruxelles et Ostende (Smits, 1903). Cependant, la formalisation de cette pratique en tant que sport compétitif moderne est plus récente.

Ce n'est que dans les années 1970 que l'endurance à cheval commence réellement à voir le jour, notamment en Espagne. Pour ce qui est de la France, il faut attendre 1975 pour voir apparaître les premières compétitions officielles avec les « 130 km de Florac » puis les « 100 km de Rodez ».

La discipline continue son développement dans les années 1990 – 2000 et devient une discipline de plus en plus pratiquée avec une multiplication des compétitions nationales et internationales. Au niveau national, la France possède un réseau dense de compétitions d'endurance équestre. En 2022, on a recensé la tenue de près de 324 compétitions d'endurance en France de tout niveau (Fédération Française d'équitation, 2023). A l'échelle internationale, on ne comptait pas moins de 228 événements internationaux cette même année, aussi bien en Europe (France, Espagne, Italie), que dans les pays du Golfe (Bahreïn, Qatar, Emirats arabes unis) ou encore en Amérique du nord et du sud, en Australie...(Fédération équestre internationale, 2023a). Le nombre de compétitions internationales diminue depuis quelques années, après un pic à près de 300 compétitions dans les années 2010.

Ainsi, l'endurance équestre en France s'est développée au fil des décennies, passant d'une discipline émergente à une discipline reconnue et appréciée tant au niveau national qu'international. Toutefois, plusieurs controverses récentes, notamment autour du bien-être des chevaux, du dopage et de l'utilisation abusive de certaines substances et médicaments, tendent à ternir l'image de la discipline. Il apparaît dès lors essentiel de promouvoir une culture de l'endurance plus éthique, en mettant l'accent sur le bien-être des chevaux, la préservation de l'environnement et l'intégrité de la compétition.

C. Déroulé d'une course

Les raids d'endurance se déroulent le plus souvent sur une seule journée et les concurrents doivent parcourir une certaine distance relative au niveau d'épreuve courue. Au niveau international, les Concours de Raids d'Endurance Internationaux (CEI) comprennent trois niveaux d'épreuve (Fédération équestre internationale, 2023b) :

- 1* : course de 100 à 119 km en un jour.
- 2* : course de 120 à 139 km en un jour, ou de 70 à 89 km par jour sur deux jours.
- 3* : course de 140 à 160 km en un jour, ou de 90 à 100 km par jour sur deux, ou de 70 à 80 km sur trois jours ou plus.

Les tracés des épreuves sont découpés en différentes boucles de distance variable, souvent de 20 à 30 km, avec un nombre minimum de boucles imposé selon le niveau (de trois boucles pour 1* à cinq pour 3*). A ce niveau d'épreuve, les concurrents évoluent à vitesse libre, c'est-à-dire que chacun effectue la distance à la vitesse qu'il souhaite, dans la limite du temps maximal autorisé pour la course et correspondant souvent à une vitesse moyenne de 12 km/h. Ce temps peut être adapté en fonction des conditions de la course : type de sol, dénivelé, conditions climatiques... Aujourd'hui, la majorité des courses se gagnent à des vitesses moyennes supérieures à 20 km/h.

Les couples cavalier – cheval sont seuls durant la course, à l'exception des passages aux points d'assistance prévus par l'organisateur. Il est alors possible pour le cavalier de bénéficier de l'aide d'une à deux personnes pour prendre soin de son cheval et pouvoir ainsi l'abreuver, le rafraîchir. C'est également un moment pour vérifier l'état du matériel et intervenir si besoin. A l'arrivée de chaque boucle, le cavalier est à nouveau aidé de son équipe d'assistance pour refroidir, desseller, marcher et faire récupérer son cheval le plus rapidement possible avant de le présenter au contrôle vétérinaire. En effet, chaque fin de boucle est suivie d'un passage au *Vet Gate* où des vétérinaires examinent chaque cheval et vérifient sa fréquence cardiaque, qui ne doit pas excéder 64 battements par minute (bpm) dans les 15 minutes suivant l'arrivée, son statut métabolique (coloration des muqueuses, temps de recoloration capillaire, hydratation, bruits digestifs) ainsi que la régularité de ses allures. La fréquence cardiaque est reprise à l'issue de l'aller-retour au trot lors du contrôle des allures pour déterminer le *Cardiac Recovery Index* (CRI), qui est la différence de fréquence entre la première mesure et la seconde « post trot ». En cas d'anomalie au contrôle vétérinaire, le couple peut être éliminé de la compétition.

2. Défis locomoteurs et métaboliques liés à l'effort de longue durée

A. Défis locomoteurs du cheval d'endurance

Les raids d'endurance représentent un réel défi pour l'appareil locomoteur des chevaux athlètes. En effet, la course sur de longues distances sollicite intensément les muscles, les tendons, les os et les articulations. Les chevaux doivent maintenir un rythme de course soutenu sur des terrains variés, ce qui exige des adaptations de l'appareil locomoteur sur le long terme en réponse aux changements du sol et de l'environnement. De telles contraintes peuvent également entraîner l'apparition de lésions plus ou moins graves. Pour ces raisons, il a été montré (Nagy *et al.*, 2014) que les boiteries constituaient le motif d'élimination le plus fréquent en course en étant responsable de l'élimination de près de 30 % des concurrents ayant participé à des compétitions d'endurance FEI entre 100 et 160 km sur la période 2008 – 2011 dans 47 pays.

a. Adaptation de l'appareil locomoteur aux efforts de longue durée

L'appareil locomoteur étant particulièrement sollicité lors des raids d'endurance, des adaptations de ce dernier ont lieu, aussi bien d'un point de vue structural que biomécanique. En effet, une étude (Wickler *et al.*, 2006) a comparé la foulée de chevaux d'endurance sur un tapis roulant et sur une course de 80 km. Il apparaît que sur le tapis roulant, où la vitesse est définie, la fréquence des foulées a diminué et la longueur des foulées a augmenté avec la fatigue. Tandis qu'au cours d'une course d'endurance, la fréquence des foulées restait identique mais la vitesse, et donc l'amplitude de la foulée, réduisait avec la fatigue. Une autre étude (Metayer *et al.*, 2004) a montré que des chevaux d'endurance, versus des chevaux non entraînés, avaient tendance à avoir des foulées plus courtes et plus rapides. Ainsi, la locomotion des chevaux d'endurance semble s'être adaptée à l'effort demandé. La gestion de la vitesse de course est également un paramètre important (Marlin et Williams, 2018). Les chevaux ayant une vitesse plus réduite, en particulier sur la première boucle, ont davantage de chance de finir la course que ceux ayant une vitesse plus élevée. De plus, cette étude a montré qu'un cheval avait plus de risque de ne pas terminer sa course si sa vitesse moyenne décroissait sur les boucles précédant l'élimination.

Au-delà de l'aspect biomécanique, des contraintes s'exercent sur les os des chevaux d'endurance. L'étude de Rajão *et al.*, (2019), a montré que chez des chevaux entraînés pour l'endurance, la corticale osseuse des os longs avait tendance à présenter une augmentation de densité et d'épaisseur en comparaison à un groupe de chevaux non entraînés. L'adaptation de l'os cortical chez les chevaux entraînés est un facteur important dans l'augmentation de la résistance osseuse à l'exercice. Ces modifications structurelles sont liées à une réponse du tissu osseux dans son ensemble.

Les muscles s'adaptent également à l'effort demandé. Il a été observé (Leisson *et al.*, 2008) que l'entraînement engendrait une augmentation du pourcentage de fibres musculaires de type I, à contraction lente et adaptée à un effort de longue durée, au détriment des fibres musculaires de type II, à contraction plus rapide. De plus, l'entraînement d'endurance entraîne une augmentation de la densité mitochondriale, de l'apport capillaire, des changements au niveau de certaines enzymes métaboliques clés et une augmentation de l'absorption maximale d'oxygène.

L'apport de l'imagerie par Résonance Magnétique (IRM) a permis d'explorer l'effet de l'entraînement et de la compétition sur la région de l'insertion du ligament suspenseur du boulet chez

des chevaux d'endurance novices et expérimentés (Likon *et al.*, 2023). Il en ressort que l'exercice aurait un effet sur le long terme en provoquant un épaississement de la corticale du métacarpe au niveau de l'insertion proximale du suspenseur. Cette étude préliminaire peut constituer une première approche des lésions se développant avec les efforts demandés aux chevaux d'endurance.

b. Lésions de l'appareil locomoteur chez les chevaux d'endurance

L'appareil locomoteur des chevaux d'endurance, bien que s'adaptant aux contraintes de la discipline avec l'entraînement, reste néanmoins sujet au développement d'un certain nombre de troubles locomoteurs. Une grande partie des chevaux d'endurance développeront une pathologie locomotrice au cours de leur carrière, que ce soit en compétition ou à l'entraînement.

L'étude menée par Paris *et al.*, (2021) a identifié le boulet, la portion proximale du métacarpe et le pied comme les régions les plus atteintes, avec une prédominance d'atteintes de l'insertion du suspenseur, d'arthropathie métacarpo-phalangienne ou métatarso-phalangienne et des douleurs de la sole. L'étude de Hollenbach *et al.*, 2022, confirme cela en identifiant des signes d'arthrose métacarpo-phalangienne (28 % des chevaux de la cohorte) et interphalangiennes, ainsi qu'une ossification fréquente des cartilages unguulaires (69%). Une autre lésion commune chez les chevaux d'endurance est la fasciite plantaire, qui concerne les tissus mous péri-tendineux et péri-ligamentaires du tarse (Paris *et al.*, 2021b). Les douleurs musculaires ne sont pas à négliger et seraient responsables d'un certain nombre d'éliminations bien qu'il soit difficile de les étudier sur le terrain (Nagy *et al.*, 2012).

Les sollicitations répétées sur les os provoquent des microlésions, normalement réparées physiologiquement, qui peuvent engendrer des fractures de stress ou complètes. Selon les données recueillies par Misheff *et al.*, (2010), les fractures rencontrées en endurance concernent principalement l'os métacarpien III, souvent au niveau du condyle latéral, et la phalange proximale, avec des fractures complètes. La prise en charge dépend du type de fracture et va du repos strict avec attelle à la chirurgie ou à l'euthanasie dans les cas les plus graves, notamment pour les fractures déplacées, comminutives, ouvertes... D'autres localisations de fractures sont possibles mais plus anecdotiques comme le radius, l'humérus, la scapula, ou encore le fémur. Le pronostic sportif est variable avec environ 40 % des chevaux ayant recouru dans l'étude.

Des douleurs dorsales sont également couramment observées lors des compétitions d'endurance et peuvent constituer un motif d'élimination dans les cas les plus sévères. Il est possible que ces douleurs soient occasionnées par une selle mal ajustée / adaptée ou bien un cavalier trop lourd (Nagy *et al.*, 2012). Néanmoins, ces douleurs restent mal documentées et étudiées en endurance, étant communément considérées comme uniquement des douleurs musculaires primaires.

Le type de sol est également un facteur à prendre en compte. Les conditions de courses sont différentes selon les pays. Par exemple, les terrains rencontrés en Europe ne sont pas comparables à ceux des pays du Golfe, ce qui peut avoir un impact sur la vitesse de course mais aussi sur le risque de blessure. Les courses et les entraînements sur du sable profond, comme cela est le cas dans le désert, semblent notamment favoriser les fractures de stress ou de fatigue de l'ilium (Puccetti *et al.*, 2022).

B. Défis métaboliques

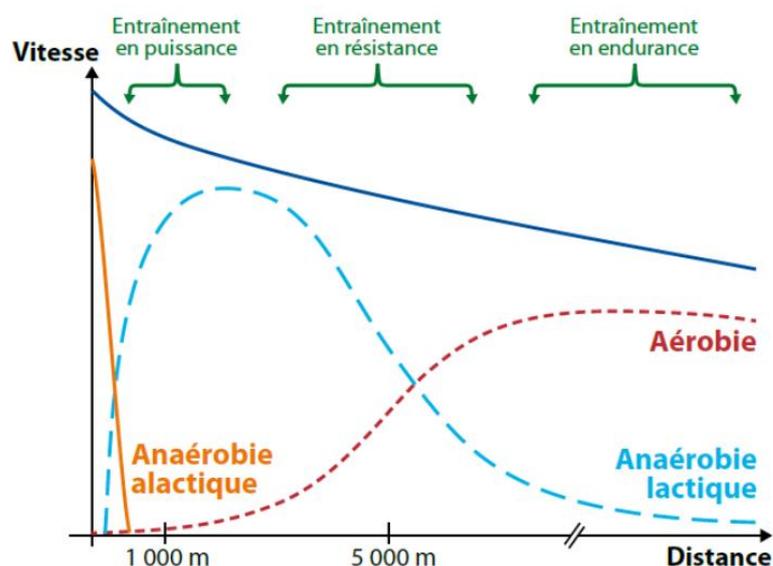
Les problèmes métaboliques constituent le second motif d'élimination le plus couramment rencontré en endurance après les boiteries. En endurance, ces troubles sont principalement les conséquences de la déshydratation liée à l'effort, de déséquilibres électrolytiques et acido-basiques, de l'accumulation de chaleur et de l'épuisement des substrats énergétiques (Foreman, 1998). Dans les cas les plus extrêmes où les capacités physiologiques du cheval sont dépassées, cela peut conduire au syndrome d'épuisement, qui constitue une réelle urgence.

a. Rappel sur la physiologie de l'effort d'endurance

Les raids d'endurance impliquent la réalisation d'un effort de longue durée, d'intensité moyenne et à vitesse modérée. L'énergie nécessaire à la réalisation d'un tel effort est issue principalement du métabolisme aérobie des acides gras et du glycogène dans les fibres musculaires à contraction lente (type I) et intermédiaire (type IIa). La figure 1 montre les différentes voies métaboliques utilisées au cours de l'effort en fonction de la vitesse et de la distance parcourue.

L'objectif de l'entraînement en endurance va être de favoriser la transition de l'anaérobie vers l'aérobie afin de retarder le plus possible l'atteinte du seuil d'accumulation du lactate et donc de la fatigue. L'entraînement va également avoir pour conséquence d'optimiser la fonction cardiaque, d'augmenter le volume plasmatique, d'améliorer la perfusion tissulaire et les capacités de thermorégulation et de digestion (Robert, 2019).

Figure 1 - Les différentes voies métaboliques utilisées au cours de l'effort en fonction de la vitesse et de la distance parcourue. (Robert, 2019).



Lorsque la vitesse de course dépasse un certain seuil, variant selon les chevaux et leur niveau d'entraînement (entre 18 et 36 km/h), le seuil du métabolisme aérobie est dépassé. À ce stade, le métabolisme anaérobie du glycogène, dans les fibres musculaires à contraction rapide (type II), entraîne une accumulation d'acide lactique et de protons H⁺, entraînant une baisse du pH et une diminution des capacités enzymatiques. Cela conduit rapidement à la fatigue et à l'incapacité de poursuivre l'effort (Langlois et Robert, 2008).

Les complications liées à l'accumulation d'acide lactique sont rares en endurance. La plus grande partie de l'acide lactique produit pendant les courtes phases d'anaérobiose est métabolisé lors des phases d'aérobiose. Néanmoins, la voie aérobie a pour inconvénient de produire une quantité considérable de chaleur puisque seule 20 à 30 % de l'énergie est convertie en travail musculaire tandis que le reste est dissipé sous forme de chaleur grâce à divers mécanismes de thermorégulation, conduisant à une élévation de la température corporelle de 3 à 4 °C. Dans un premier temps, la vasodilatation évacue la chaleur des muscles vers la peau et les muqueuses. La peau est refroidie par convection (courant d'air), radiation et surtout par évaporation. L'évaporation est assurée principalement par la sueur (65 %) puis par la respiration (25 %). On estime qu'un cheval d'endurance peut produire de 10 à 15 L de sueur par heure de course, soit 5 à 6 % de son poids ; cette valeur peut être doublée par temps chaud et humide. L'effort de longue durée est également responsable de pertes d'ions, notamment en chlore, calcium, magnésium, sodium et potassium. Ces pertes en eau et en ions importantes, associées à la chaleur produite, expliquent en partie les déséquilibres électrolytiques et acido-basiques pouvant conduire à des troubles métaboliques majeurs chez le cheval d'endurance (Flaminio *et al.*, 1996). Un état d'alcalose respiratoire peut apparaître avec la polypnée et la sudation, qui se mettent en place avec la thermorégulation.

Les troubles métaboliques peuvent avoir de graves conséquences en provoquant un coup de chaleur, une rhabdomyolyse, des coliques, une insuffisance rénale et hépatique, une fourbure ou encore une coagulation intravasculaire disséminée, comme le rappellent Muñoz *et al.*, (2017).

Un syndrome d'épuisement peut apparaître dans les cas les plus sévères, cela peut se manifester par une augmentation de la température corporelle et des fréquences cardiaque et respiratoire, une dépression, une perte d'appétit, une réticence à continuer l'exercice, une déshydratation, une faiblesse, une raideur, un choc hypovolémique, une myopathie d'effort, un flutter diaphragmatique, une fibrillation atriale, des diarrhées, des coliques ou une fourbure. Le traitement consiste généralement à arrêter l'exercice, à refroidir rapidement l'animal, à administrer de grands volumes de fluides par voie intraveineuse ou orale, et des anti-inflammatoires non stéroïdiens (Foreman, 1998).

L'entraînement joue un rôle important dans la prévention des troubles métaboliques, tout comme le bon état de santé du cheval au moment de la course. D'autres éléments sont également à prendre en compte, comme le temps de transport et d'acclimatation avant l'épreuve, surtout en cas de conditions météorologiques chaudes et humides (Marichal *et al.*, 2023), mais aussi la monte et l'expérience du cavalier (Muñoz *et al.*, 2017).

b. Métabolisme énergétique au cours de l'effort

Lors d'une course d'endurance, le cheval est soumis à un effort prolongé et modéré, nécessitant un apport énergétique important (Barrey, 1993) pour maintenir son rythme de course. Pour répondre à cette demande énergétique, le métabolisme du cheval s'adapte pour mobiliser les réserves énergétiques disponibles en utilisant la voie aérobie préférentiellement. Durant les premières phases de l'effort, les glucides stockés sous forme de glycogène dans les muscles et le foie sont sollicités. Cependant, ces réserves limitées peuvent s'épuiser rapidement et la synthèse de glycogène est deux à trois fois plus lente chez le cheval que chez l'homme et le rat (Waller et Lindinger, 2010), forçant le cheval à basculer vers une utilisation accrue des réserves lipidiques corporelles, notamment des acides gras saturés.

Il apparaît néanmoins que le lactate, issu de la dégradation du glucose pour former de l'ATP au cours de la voie anaérobie, est un des métabolites le plus corrélé à la performance en endurance. Le Moyec *et al.*, (2014), indiquent que cela serait lié au fait que les chevaux les plus performants possèdent les ressources nécessaires pour terminer la course en augmentant leur vitesse moyenne et le plus souvent par un sprint final, ce qui utiliserait la voie anaérobie et donc une concentration supérieure en lactate post-effort par rapport aux chevaux moins performants.

L'alimentation joue un rôle important dans le métabolisme énergétique du cheval d'endurance. Un lien entre consommation de lipides, métabolisme glucidique et production de lactate a pu être montré par Treiber *et al.*, (2006), en utilisant un régime riche en matières grasses. Les chevaux avec ce régime semblaient présenter un métabolisme plus adapté à l'effort énergétique demandé que ceux ayant eu un régime riche en sucres. De plus, Luck *et al.*, (2015), ont montré que les chevaux expérimentés, donc plus entraînés, maintenaient leur glycémie avec une concentration en lactate plus élevée et une baisse des lipides plasmatiques post-courses. Ce qui montre une certaine adaptation du métabolisme à l'effort avec l'âge et l'entraînement en utilisant davantage le métabolisme lipidique (Li *et al.*, 2012). Le système aérobie mature également avec les années d'entraînement.

L'endurance fait également appel au catabolisme protéique (Essén-Gustavsson et Jensen-Waern, 2002 ; Le Moyec *et al.*, 2014, 2019), en particulier en fin d'effort (Henriksson, 1991), avec une consommation d'acides aminés pendant les efforts longs. A nouveau, cette voie énergétique semble davantage disponible chez les sujets entraînés.

En outre, l'effort d'endurance entraîne également une importante production de chaleur, qui peut entraîner une élévation de la température corporelle et augmenter le risque de déshydratation. Ainsi, les défis métaboliques de l'effort d'endurance nécessitent une gestion minutieuse de la nutrition et de l'hydratation pour maintenir la santé et les performances du cheval pendant la course.

c. Biomarqueurs associés à la condition physique en course

Les raids d'endurance sollicitent considérablement l'organisme des chevaux. Ainsi, pouvoir détecter en amont les chevaux potentiellement performants, et les différencier des chevaux épuisés, constitue un défi allant dans le sens du bien-être équin. Cette thématique devient un enjeu particulièrement important dans le monde hippique, mais aussi pour le grand public.

Des biomarqueurs ont pu être identifiés pour mettre en évidence les chevaux fatigués durant un raid. L'étude de Muñoz *et al.*, (2010), met en avant une activité augmentée du système rénine – angiotensine II – aldostérone – vasopressine chez les chevaux déshydratés et fatigués.

Des paramètres sanguins, tels que le taux protéique, les concentrations en urée, créatinine, sodium, se retrouvent également affectés par l'entraînement et la compétition (Robert *et al.*, 2010). L'étude de Schott *et al.*, (2006), présente des résultats comparables avec une diminution des concentrations en sodium, chlore et potassium, et une augmentation de l'hématocrite, après l'effort. Il est difficile d'établir une différence au vu de ces paramètres entre les chevaux terminant la course et ceux éliminés car la plupart des chevaux développent des altérations métaboliques sans pour autant que celles-ci soient sévères. Trigo *et al.*, (2010), ont pu définir des valeurs seuils au-delà desquelles les chevaux étaient plus à risque de développer des troubles métaboliques. Cela concerne l'hématocrite (> 52 %), les protéines plasmatiques (> 82 g/L), la créatinine (30 mg/L / 100 km), l'acide urique (> 72 mg/l), la créatine kinase (> 12,6 UI/l km) et les ASAT (> 6,2 UI/L / km).

D'autres marqueurs biologiques sont étudiés et varient avec l'effort, comme la calprotectine, l'albumine et l'haptoglobine, témoins d'une réponse inflammatoire aiguë suite à la course (Mihelić *et al.*, 2022). L'étude de Halama *et al.*, (2021), a identifié six métabolites (propionate d'imidazole, pipécolate, éthylmalonate, 2R-3R-dihydroxybutyrate, β -hydroxy-isovalérate et X-25455) comme de potentiels indicateurs de performance. Cela pourrait permettre d'améliorer le suivi des chevaux et d'identifier précocement les chevaux susceptibles de ne pas terminer la compétition.

Un indice de troubles métabolique, ou *metabolic disorder index* (MDI), a pu être établi par Izzati *et al.*, (2018), afin de prédire l'élimination pour cause métabolique en course d'endurance. Il s'agit de combiner cinq paramètres obtenus la veille de l'épreuve : l'hématocrite, les concentrations en chlore, interleukine-6, créatine kinase et glutathion réductase. L'indice obtenu présentait une spécificité et une sensibilité de l'ordre de 80 % pour des distances allant de 40 à 120 km. Une étude de plus grande envergure serait intéressante pour valider un usage en compétition ou à l'entraînement.

C. Identification des facteurs de risques associés aux causes d'élimination

Les boiteries et les troubles métaboliques constituent les deux principaux motifs d'élimination lors des raids d'endurance. De nombreuses études (Bennet et Parkin, 2018 ; Bloom *et al.*, 2023 ; Fielding *et al.*, 2017 ; Nagy *et al.*, 2014 ; Paris *et al.*, 2021a) se sont penchées sur la question et ont cherché à identifier des facteurs de risque associés à ces deux motifs d'élimination. De manière synthétique, on peut identifier les causes suivantes :

a. Facteurs de risque associés aux boiteries

Dans la littérature, les différents facteurs suivants ont été associés au risque de boiterie :

- **Les courses ayant lieu en Europe et dans les pays du Golfe** (Nagy *et al.*, 2014 ; Bennet et Parkin, 2018) ;
- **Une longue distance à parcourir (> 130 km)** (Nagy *et al.*, 2014 ; Di Battista *et al.*, 2019) ;
- **Un nombre important de chevaux au départ** (Nagy *et al.*, 2014 ; Bennet et Parkin, 2018 ; Di Battista *et al.*, 2019) ;
- **L'historique du cheval** (nombre important de courses réalisées précédemment et temps de repos inférieur à 90 jours après la dernière course) (Nagy *et al.*, 2013 ; Bloom *et al.*, 2023) ;
- **L'âge du cheval (> 9 ans)** (Bennet et Parkin, 2018 ; Di Battista *et al.*, 2019 ; Paris *et al.*, 2021a) ;
- **De mauvais aplombs** (Paris *et al.*, 2021a) ;
- **Le statut amateur du cavalier** (Paris *et al.*, 2021a) ;
- **Un cavalier de sexe masculin** (Bennet et Parkin, 2018) ;
- **Les conditions météorologiques** (température basse) (Di Battista *et al.*, 2019).

b. Facteurs de risque associés aux troubles métaboliques

Dans la littérature, les différents facteurs suivants ont été associés au risque métabolique :

- **Un nombre important de partants** (Nagy *et al.*, 2013, 2014 ; Di Battista *et al.*, 2019) ;
- **Les conditions de course** : pays du Golfe, terrain profond (Nagy *et al.*, 2013, 2014) ;
- **Une longue distance à parcourir (> 130 km)** (Fielding *et al.*, 2017 ; Di Battista *et al.*, 2019) ;
- **Les conditions météorologiques** (température minimum) (Di Battista *et al.*, 2019).

c. Facteurs de risque généraux

D'un point de vue général sur les éliminations en course d'endurance, ces différents facteurs ressortent :

- **Les compétitions rapprochées** (Zuffa *et al.*, 2022) ;
- **Une vitesse élevée** (Zuffa *et al.*, 2022) ;
- **Le passage à une catégorie supérieure** (Zuffa *et al.*, 2022) ;
- **Une augmentation de 1 % d'hématocrite** (Bollinger *et al.*, 2023).

d. Interprétation des facteurs de risque

Un lien est supposé entre les problèmes orthopédiques et métaboliques mais il n'existe encore aucune étude permettant d'étayer cette hypothèse. Cependant, il est raisonnable de penser qu'un cheval présentant une boiterie peu visible pourrait se fatiguer plus rapidement, ce qui entraînerait des troubles métaboliques avant qu'une boiterie ne devienne éliminatoire lors du contrôle vétérinaire. Il est également possible qu'un cheval ayant des problèmes métaboliques soit plus susceptible de subir des lésions de l'appareil locomoteur en raison de la fatigue musculaire, entraînant une diminution du soutien des articulations, des tendons et des ligaments (Nagy *et al.*, 2012). La recherche de marqueurs biologiques est en pleine expansion et l'étude de Bollinger *et al.*, (2023), a établi une association entre une concentration élevée en superoxyde dismutase, enzyme antioxydante, avant course et une élimination pour cause de boiterie. Ces premiers résultats sont prometteurs mais nécessitent d'être confirmés sur un plus grand échantillon.

3. Outils disponibles pour le suivi des chevaux en course

A. Suivi des paramètres biologiques lors des contrôles vétérinaires

Les chevaux sont soumis à des contrôles vétérinaires tout au long des courses auxquelles ils participent. A l'arrivée des chevaux sur le site de compétition, un premier examen permet de vérifier l'identité de l'animal, son statut vaccinal vis-à-vis de la grippe équine, son état de santé notamment sa température corporelle et l'identification d'éventuelles anomalies pouvant compromettre la suite de la compétition.

Une fois en compétition, les chevaux sont soumis à des contrôles à la fin de chaque boucle effectuée. Ces *Vet gates* permettent de vérifier la bonne tolérance à l'effort et d'identifier les chevaux susceptibles de ne pas terminer la course dans de bonnes conditions. Plusieurs paramètres sont évalués, à la fois pour évaluer le statut métabolique (FC, CRI, FR, TRC, aspect des muqueuses, bruits digestifs, attitude) et la locomotion (régularité des allures, palpation des muscles et du dos). Une anomalie observée sur un des critères évalués peut conduire à l'élimination.

La fréquence cardiaque est un des paramètres les plus importants du suivi en course car elle est révélatrice de la récupération et de l'aptitude à poursuivre l'effort. L'étude de Younes *et al.*, (2015), a permis d'établir un lien entre le temps de récupération cardiaque (CRT), la vitesse et l'élimination à la boucle suivante lors d'une course. En combinant ces critères, il apparaît que 64,8% à 86,6% de toutes les éliminations constatées en cours de compétition étaient prévisibles en se basant sur les valeurs obtenues à la boucle précédant l'élimination.

Les éventuelles blessures peuvent également conduire au retrait de la compétition si le jury estime qu'elles mettent en danger le cheval.

B. Suivi par le cavalier en course

L'endurance a la particularité d'autoriser l'usage du téléphone en compétition. En effet, les cavaliers ont le droit de se servir de leur téléphone, pour communiquer par exemple avec leur équipe d'assistance et également d'utiliser des outils GPS. Il est donc possible pour les cavaliers d'utiliser des outils connectés et de suivre en direct la fréquence cardiaque ou leur vitesse par exemple.

À l'arrivée de chaque boucle, il est également fréquent d'avoir recours à des cardio-fréquencesmètres sous forme de poignée à appliquer au niveau du cœur à gauche du cheval. Cela permet au cavalier de suivre la récupération cardiaque avant de présenter le cheval au contrôle vétérinaire.

C. Limites du suivi en course

L'endurance équestre implique une certaine autonomie des cavaliers qui effectuent une grande partie du parcours sans surveillance par les membres du jury. Il est donc difficile d'avoir un réel suivi de la santé des chevaux en dehors des contrôles vétérinaires obligatoires. Le développement d'objets connectés pourrait permettre de répondre à cette problématique et d'identifier en amont les chevaux susceptibles de ne pas terminer la course pour des causes métaboliques notamment.

4. Le développement des objets connectés

Les progrès technologiques de ces dernières années ont non seulement transformé notre quotidien mais également le monde équestre. Il existe différents outils pour les chevaux, ce qui présente un intérêt évident pour les cavaliers, les entraîneurs et les vétérinaires. Aujourd'hui, il est possible de trouver nombre d'objets connectés dans le commerce permettant de mesurer certains paramètres physiologiques du cheval au cours de l'entraînement et de détecter d'éventuelles anomalies. Ces objets offrent la possibilité d'effectuer un suivi régulier et objectif.

A. Suivi de locomotion

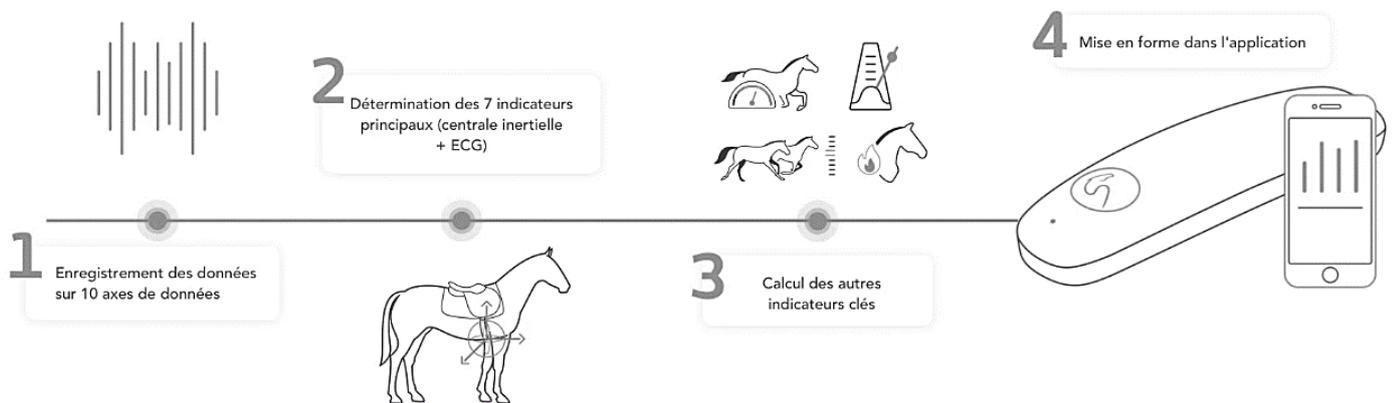
La locomotion est un facteur mécanique clé de la performance du cheval, ce qui explique le développement d'outils pour en effectuer le suivi aussi bien pour le cavalier que pour aider le vétérinaire dans son diagnostic.

Les outils actuels se basent sur l'utilisation d'accéléromètres qui permettent de définir la cadence, le rebond ou encore la symétrie des allures. Si cette technologie existe depuis une trentaine d'années, les solutions commerciales sont plus récentes avec la miniaturisation des centrales inertielle. Les données ainsi récoltées sont couplées à des applications permettant leur exploitation et l'obtention d'informations synthétiques.

L'étude de Casella *et al.*, (2020), montre qu'il est possible de développer un outil de reconnaissance des allures du cheval en utilisant des technologies déjà existantes chez l'Homme, avec un smartphone et une montre connectée. Il explique ainsi qu'il est possible d'utiliser des outils utilisés pour l'*Human Activity Recognition* (HAR) et de les appliquer à l'*Animal Activity Recognition* (AAR). Les téléphones mobiles disposent ainsi d'accéléromètres qui peuvent reconnaître les allures. Il est même possible d'identifier les cinq allures du cheval islandais avec un téléphone dans la poche du cavalier (Davíðsson *et al.*, 2023).

Des capteurs, appelés *IMU* pour *Inertial Measurement Unit*, ont été développés pour étudier plus finement la locomotion du cheval en utilisant des accéléromètres sur différents axes. Par exemple, le *Motion sport ND* par *Equisense* couple un GPS et une centrale inertielle sur dix axes, ainsi qu'une électrode d'électrocardiogramme (ECG). Les données récoltées sont ensuite interprétées par l'algorithme intégré à l'application et mises en forme pour en faciliter l'interprétation. La figure 2 résume le fonctionnement du capteur connecté. Une thèse avait permis d'établir ses capacités à quantifier des paramètres temporels et cinématiques au trot (Alberda, 2018). Ces objets connectés ne font pas toujours l'objet de publications scientifiques accessibles, ce qui peut les discréditer pour un usage appliqué au suivi médico-sportif du cheval athlète.

Figure 2 – Exemple de fonctionnement d'un capteur connecté avec application sur téléphone. (Source : Equisense, 2023).



On peut citer d'autres objets connectés, comme par exemple le *Ceefit ND* de *Seaver*. De plus, des outils ont été développés pour un usage davantage vétérinaire afin d'objectiver les boiteries notamment. On retrouve deux principaux produits : les *Tendiboots ND* d'*Ekico* et *Equisym ND* d'*Arioneo*. Ces technologies font l'objet de davantage de recherches et de publications scientifiques.

Outre les allures, les sauts peuvent également être analysés. L'IMU de *Seaver* par exemple a été utilisé par Becker et Lewczuk, (2022), qui ont pu comparer les techniques de saut de chevaux expérimentés, versus de jeunes chevaux, identifiant notamment des différences de hauteur ou d'impulsion avant le saut.

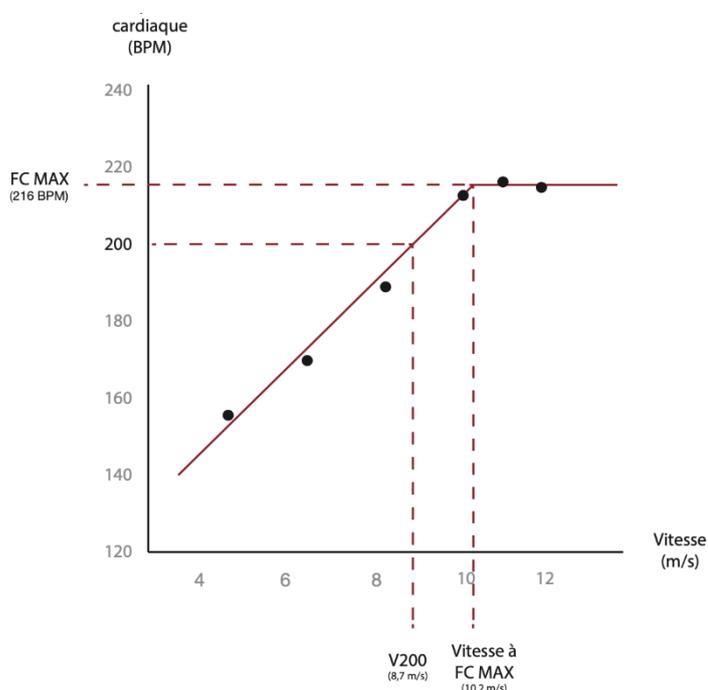
Il existe également depuis quelques années des selles connectées, qui intègrent un IMU au niveau du troussequin.

Le couplage cheval – cavalier fait l'objet d'études du fait de son implication sur la locomotion du cheval. Une asymétrie de posture du cavalier peut ainsi avoir des conséquences sur la cinématique de la colonne vertébrale du cheval (MacKechnie-Guire *et al.*, 2020). L'étude de Viry *et al.*, (2013), a permis de définir une première approche du concept de coordination dynamique et de compréhension du couplage cheval – cavalier, notamment en endurance, discipline où cela semble avoir le plus d'impact. L'expérience du cavalier peut aussi jouer sur ce couplage et sur le choix des allures à adopter pendant la course (Viry *et al.*, 2015). La qualité du couplage pourrait ainsi jouer sur la fatigue ressentie. Le galop permettrait la meilleure coordination entre le cheval et son cavalier d'après Wolframm *et al.*, (2013).

B. Suivi cardiaque

La mesure de la fréquence cardiaque constitue l'un des piliers du suivi médico-sportif. Elle permet de faire une évaluation précise, quantifiée et objective de l'intensité de l'entraînement en direct. En effet, il est possible de déterminer la vitesse à laquelle le cheval atteint la fréquence de 200 battements par minute (V200), ce qui témoigne de la capacité métabolique de l'animal. Les meilleurs chevaux ont une V200 plus élevée que les autres chevaux. Ce paramètre permet donc de comparer les chevaux entre eux, mais aussi de faire le suivi d'un même individu dans le temps et d'évaluer ses progrès dans le temps. Il est également possible de déterminer la fréquence cardiaque maximale (FCmax) durant un test à l'effort et d'en déduire le volume maximum d'oxygène utilisé par le cheval au cours de l'effort ; FCmax représente ainsi un bon indicateur du niveau de performance. La figure 3 illustre le tracé pouvant être obtenu lors un test d'effort avec détermination de la V200 et de la FCmax.

Figure 3 – Evolution de la fréquence cardiaque (BPM) en fonction de la vitesse (m/s) et détermination de la V200 d'un cheval de course. (Source : Arioneo, 2023).



D'autres paramètres plus fins tels que la variabilité de la fréquence cardiaque (VFC) ou le tracé ECG sont utiles pour approfondir l'étude de la fonction cardiaque. Ces données sont importantes pour le suivi de l'entraînement car il est possible d'identifier de manière précoce des baisses de forme susceptibles de conduire à des contre-performances ou révélatrices d'une pathologie, notamment cardiaque ou respiratoire.

De manière générale, les outils disponibles se composent d'une sangle intégrant une ou deux électrodes et un émetteur, reliés à une application sur smartphone ou autre objet connecté. Il est ainsi possible pour le cavalier ou l'entraîneur d'avoir accès à la fréquence cardiaque, et parfois à d'autres paramètres tels que la vitesse, en temps réel pendant l'entraînement. Cela implique néanmoins une certaine proximité entre l'appareil récepteur et le capteur émetteur, bien qu'il soit possible de récupérer toutes les données à la fin de la séance. Les applications développées par les entreprises commercialisant les capteurs permettent une analyse plus fine à l'issue des

entraînements. Certains logiciels permettent de suivre plusieurs chevaux en même temps, par exemple *Waook ND*, ce qui s'adapte davantage à une utilisation par des professionnels, en particulier dans les courses. Il est alors possible de compléter le suivi médico-sportif en intégrant d'autres mesures comme la lactatémie.

Il existe de nombreux produits sur le marché, certains regroupant plusieurs fonctionnalités, comme les capteurs de *Seaver* et *Equisense*, qui enregistrent la locomotion et la fréquence cardiaque. D'autres sont néanmoins plus spécialisés et plus précis. Par exemple, l'*Equimetre ND* d'Arioneo a fait l'objet d'une validation scientifique par ter Woort *et al.*, (2021) et renseigne de manière fiable sur la fréquence et la variabilité cardiaque. L'un des leaders sur le marché des cardio-fréquencesmètres est Polar, qui produit des capteurs pour Homme et pour chevaux depuis de nombreuses années (Holopherne-Doran *et al.*, 1999). Cependant, si le système fonctionne bien au repos (Ille *et al.*, 2014), des études ont mis en évidence des imprécisions à l'effort malgré l'ajustement des données, (Parker *et al.*, 2010 ; Lenoir *et al.*, 2017).

Des nouvelles technologies se développent, par exemple, des tissus intelligents et connectés pouvant être intégrés à des sangles, à des tapis ou encore à des couvertures pour suivre certains paramètres biologiques tels que la fréquence cardiaque. L'étude de McCrae *et al.*, 2023, présente un textile prometteur permettant d'obtenir des valeurs de fréquence et de variabilité cardiaque aussi fiables que celles obtenues à l'aide d'un système télémétrique.

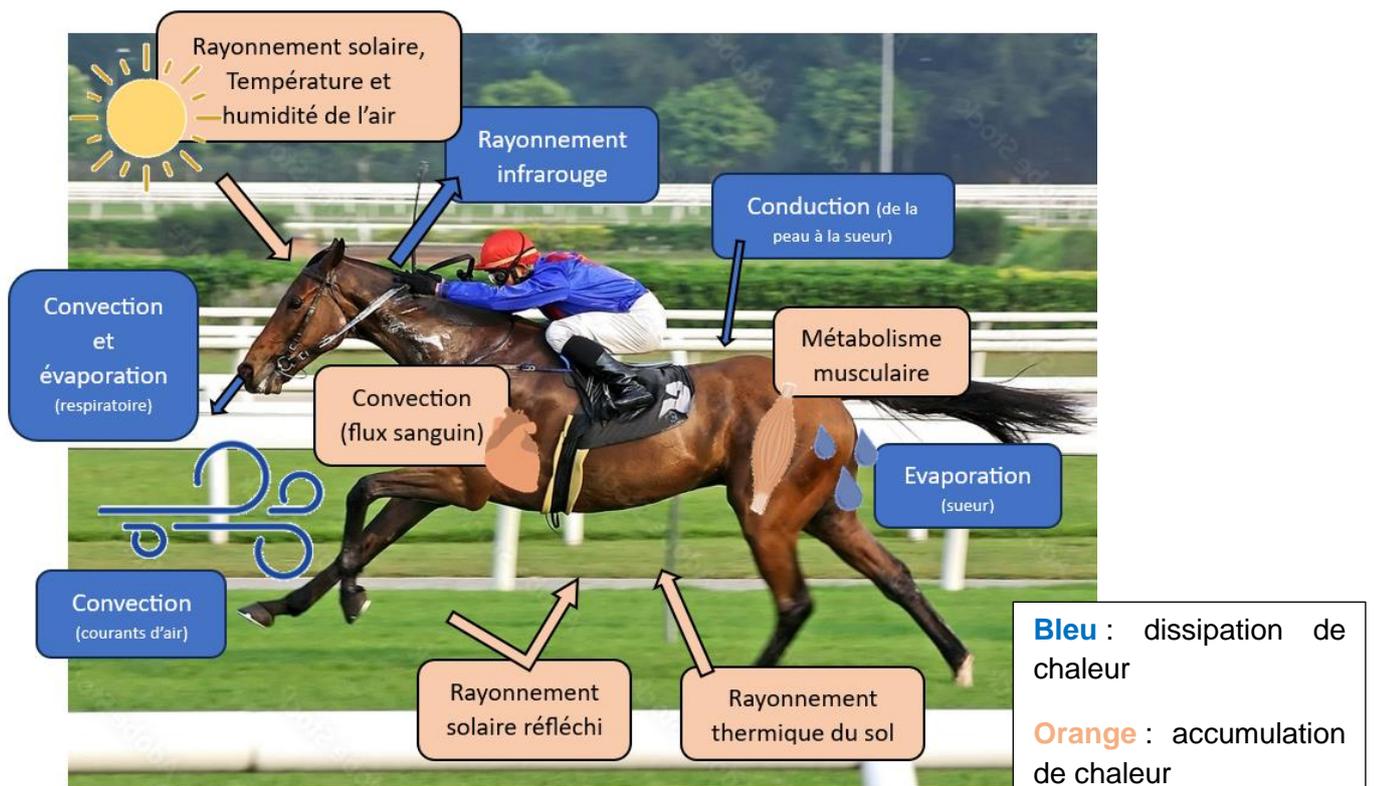
La fréquence cardiaque est un indicateur clé pour le suivi médical et sportif d'un animal et les objets connectés ont facilité son exploitation par le plus grand nombre. Cependant, l'un des risques associés à cette utilisation est de surinterpréter les données obtenues ou de se fier uniquement à celles-ci pour l'entraînement en omettant tous les autres paramètres participant à la performance (alimentation, qualité de vie, forme physique, hydratation ...).

C. Thermochip

La température corporelle d'un cheval varie aussi bien au repos qu'à l'effort. Au repos, elle oscille au cours d'un rythme circadien entre 37,5 et 38,5 °C pour des conditions environnementales entre 5 et 25 °C, d'après Morgan, (1998), et Mealey, (2019). Une valeur en dehors de ces normes peut témoigner d'une situation pathologique. A l'effort, la thermorégulation, notamment via la transpiration et la vasodilatation périphérique, permet de maintenir l'homéostasie thermique de l'animal. D'autres phénomènes de conduction et de convection entrent également en jeu comme le montre la figure 4. Le faible ratio surface de peau – masse corporelle représente une limite à l'évaporation chez le cheval en comparaison à d'autres espèces comme l'Homme (Hodgson *et al.*, 1993).

Figure 4 - Transferts thermiques chez le cheval à l'effort.

(Image libre de droit issu de « Adobe stock image » modifiée par N.Rallet selon H. Kang)



En cas d'effort intense ou de conditions climatiques extrêmes, chaudes et humides, les capacités de l'individu peuvent être dépassées et entraîner l'apparition de troubles métaboliques. Il est fréquent de parler de « coup de chaleur » pour qualifier ce stress thermique lorsque la température corporelle dépasse les 41 °C. Le cheval présente alors une dysfonction du système nerveux central et une défaillance multiviscérale, pouvant conduire à sa mort (Leon et Helwig, 2010).

Le suivi de la température en compétition a donc un double intérêt : identifier les chevaux en hyperthermie à l'arrivée sur le site, potentiellement porteurs d'une infection, et au cours de l'effort, identifier les animaux en stress thermique. Il s'agit ainsi d'un marqueur physiologique permettant d'anticiper de potentielles complications.

De manière pratique, la température se mesure à l'aide d'un thermomètre rectal, néanmoins cela implique un risque pour le manipulateur, un stress pour l'animal et nécessite un certain temps pour réaliser les mesures (Ramey *et al.*, 2011 ; Kang *et al.*, 2020). De plus, les valeurs peuvent être faussées en cas de pneumo-rectum ou de flaccidité rectale post-exercice par exemple (Brownlow *et al.*, 2016). Cette technique ne permet pas non plus la prise pendant l'effort, le cheval devant être à l'arrêt le temps de la mesure.

Le *gold standard* est la mesure de la température centrale à l'aide d'un thermocouple inséré dans l'artère carotide ou pulmonaire via un cathéter (Hodgson *et al.*, 1993 ; Kang *et al.*, 2020). Cependant, cela reste une procédure invasive et nécessitant une certaine préparation.

Il existe des méthodes alternatives comme la thermographie infrarouge pour mesurer la température de la peau, ce qui peut permettre d'identifier des zones particulièrement sollicitées

(Prochno *et al.*, 2020). Toutefois, les valeurs obtenues diffèrent de la température rectale et elles peuvent être influencées par les conditions environnementales ainsi que par la zone mesurée (Ramey *et al.*, 2011).

Une autre méthode est l'usage de micropuces percutanées RFID, ou *percutaneous thermal sensing microchips* (PTSM), intégrant un capteur passif de température. Il est alors possible de lire la température à l'aide d'un transpondeur. Cela permet d'obtenir la température de l'animal de manière rapide, plus sûre et plus hygiénique du point de vue de la biosécurité. Ces puces ont fait l'objet de plusieurs études en laboratoire sur différentes espèces (Kort *et al.*, 1998 ; Chen et White, 2006 ; Shelton Jr *et al.*, 2006) qui concluaient à une corrélation entre la température rectale et la température de la puce. L'étude de Robinson *et al.*, (2008), a démontré l'intérêt de ces puces chez les chevaux fébriles, à condition d'avoir une température extérieure supérieure à 15,6 °C. Ces puces fournissent des données fiables et répétables par rapport à une prise de température rectale chez des chevaux sains au boxe (Sciicluna, C., 2018). D'autres études plus récentes ont été réalisées à l'effort et ont également présenté des résultats concluants (Kang *et al.*, 2020). Ces puces offrent de nouvelles perspectives de par leur facilité d'utilisation, en particulier à l'effort mais aussi dans le cadre du suivi d'animaux fébriles, ou même pour identifier l'approche de la parturition chez la jument (Auclair-Ronzaud *et al.*, 2020b). Les *Thermochip ND* (MSD Animal Health) existaient déjà depuis quelques années pour les carnivores domestiques et elles sont disponibles pour les chevaux depuis 2022 en France. Cela ouvre de nouvelles perspectives sur leur utilisation à grande échelle et sur de potentielles applications pratiques lors des compétitions ou en clinique.

D. Capteur de glycémie

Les progrès de la médecine humaine ont permis le développement de capteurs de glycémie connectés permettant un suivi en continu ou flash du glucose interstitiel. Ces capteurs sont principalement commercialisés pour les personnes diabétiques. Les systèmes de mesure du glucose interstitiel en continu font appel à un capteur sous-cutané produisant un courant électrique dont l'intensité varie en fonction du taux de glucose interstitiel. La canule des capteurs contient une substance réactive, l'enzyme glucose oxydase, qui permet la transformation du signal « glucose » en signal électrique. Une calibration à l'aide de glycémies capillaires peut être nécessaire selon les capteurs utilisés afin d'étalonner le système.

Le suivi des concentrations de glucose sanguin est une procédure diagnostique courante chez les animaux de compagnie, avec les courbes de glycémie chez les chats et les chiens diabétiques, ainsi que les tests de tolérance au glucose pour les maladies de malabsorption ou métaboliques chez diverses espèces. Depuis quelques années, les capteurs de mesure du glucose ont été utilisés chez les animaux de compagnie pour effectuer ces suivis, limitant ainsi le stress impliqué par la réalisation de prélèvements sanguins réguliers. L'une des premières études réalisée chez les animaux démontrait une corrélation entre le glucose interstitiel et sanguin chez le chien, le chat et le cheval (Wiedmeyer *et al.*, 2003). Chez le cheval, de tels capteurs ont un intérêt clinique lors de jeûne prolongé, ou lors de pathologies telles que le syndrome métabolique équin (SME) ou encore le dysfonctionnement de la *Pars Intermedia* de la glande pituitaire (PPID).

L'un des systèmes les plus couramment utilisés est le FreeStyle Libre ND, qui a fait l'objet de plusieurs validations scientifiques en particulier chez le chat diabétique (Deiting et Mischke, 2021 ; Del Baldo *et al.*, 2021 ; Knies *et al.*, 2022). Ce système minimalement invasif peut fonctionner

jusqu'à 14 jours. De plus, il ne nécessite pas de calibration, ce qui simplifie son utilisation par les propriétaires. La baisse de coût de ces capteurs a permis leur utilisation plus large chez les animaux. Le FreeStyle Libre 2 ND est un système de monitoring du glucose flash tandis que la version plus récente, le FreeStyle Libre 3 ND, est un système de mesure en continu.

Chez les chevaux, l'étude de Cunneen *et al.*, (2020), a comparé le dispositif FreeStyle Libre avec le glucomètre AlphaTRAK dans une population de chevaux adultes en bonne santé. Les dispositifs ont été testés au cours d'un protocole en trois étapes, comprenant l'évaluation des concentrations de glucose au repos, l'hypoglycémie induite par l'insuline et l'hyperglycémie induite par le glucose. Dans l'ensemble, le FreeStyle Libre présentait une bonne concordance avec l'AlphaTRAK. Cependant, les auteurs ont signalé que la pertinence clinique était limitée par des retards dans la détection des changements de concentration de glucose et par la nécessité de remplacer le dispositif chez certains chevaux, puisque 15 capteurs ont dû être utilisés pour 10 chevaux. Une imprécision semblait survenir lors de l'hypoglycémie induite par l'insuline et de l'hyperglycémie induite par le glucose, ce qui pourrait entraîner une sous-estimation ou une surestimation des concentrations en glucose. Cette étude a également rapporté un décalage de temps entre les concentrations de glucose interstitiel et sanguin de 60 minutes au repos, de 10 minutes pour l'hypoglycémie induite par l'insuline et de 20 minutes pour l'hyperglycémie induite par le glucose, ce qui constitue une information utile pour l'application clinique de ces capteurs chez les chevaux. L'étude de Wong *et al.*, (2021), a démontré l'intérêt de ces capteurs de glucose chez les poulains nouveau-nés en soins intensifs, montrant qu'il s'agissait d'une méthode fiable, immédiate et pratique.

L'usage et l'accessibilité de ces appareils s'étant démocratisés de nouvelles perspectives s'ouvrent notamment sur une application en médecine sportive avec l'étude de la variation du glucose interstitiel au cours de l'effort.

Synthèse de la partie bibliographique :

L'endurance équestre est une discipline où les cavaliers et leurs chevaux parcourent des distances de 20 à 160 km, avec des contrôles vétérinaires pour assurer le bien-être des chevaux. Cette pratique a des origines anciennes, mais elle est devenue un sport moderne dans les années 1970. Elle a depuis connu une forte croissance, tant au niveau national qu'international, avec un réseau dense de compétitions. Les courses se déroulent le plus souvent sur une journée, avec une succession de boucles à parcourir. Les cavaliers sont seuls pendant la course, sauf aux points d'assistance où ils peuvent recevoir de l'aide pour prendre soin de leurs chevaux. Les contrôles vétérinaires à la fin de chaque boucle peuvent les éliminer en cas d'anomalies. Malgré sa popularité croissante, l'endurance équestre fait face à des détracteurs au sujet du bien-être des chevaux et du dopage, nécessitant une approche éthique pour assurer son avenir.

Les courses d'endurance équestre imposent d'énormes défis à l'appareil locomoteur des chevaux. Les muscles, tendons, os et articulations sont fortement sollicités par l'effort de longue durée. Les boiteries représentent la principale cause d'élimination, affectant près de 30% des concurrents lors de compétitions d'endurance sur 100 à 160 km. Les chevaux adaptent leur locomotion à l'effort, modifiant la fréquence et l'amplitude des foulées en fonction de la fatigue.

Les défis métaboliques en endurance équestre constituent le deuxième motif d'élimination après les boiteries. Ils sont principalement liés à la déshydratation, aux déséquilibres électrolytiques et acido-basiques, à la chaleur accumulée et à l'épuisement des substrats énergétiques. Le syndrome d'épuisement est une urgence potentielle résultant de la défaillance des capacités physiologiques du cheval.

En course d'endurance, le suivi des chevaux repose actuellement sur des contrôles vétérinaires, qui évaluent la santé et la condition physique des chevaux, en se basant notamment sur la fréquence cardiaque et un examen locomoteur. Les cavaliers peuvent utiliser des téléphones, des GPS ou encore des cardiofréquencemètres pour gérer leur course. Cependant, l'autonomie des cavaliers pendant la course limite la surveillance continue par les officiels de compétition, ce qui pourrait être amélioré grâce à des dispositifs connectés, notamment pour prévenir les problèmes métaboliques chez les chevaux.

Le développement des objets connectés transforme le suivi des chevaux. Ils peuvent contribuer à mesurer la locomotion, l'activité cardiaque, la température corporelle et même la glycémie. Leur utilisation aide à évaluer la performance et la santé des chevaux, en particulier pendant l'entraînement et en compétition. Cependant, il faut utiliser ces données avec précaution et ne pas les considérer comme l'unique indicateur de la performance équine.

Deuxième partie : étude expérimentale

La partie expérimentale comprend trois différentes études faisant partie d'un plus large projet sur le suivi médico-sportif du cheval à l'effort à l'aide d'outils connectés. Ces études se suivent selon un ordre chronologique de réalisation.

Ce projet a été évalué par le Comité d'éthique pour l'expérimentation animale n°16 et autorisé par le MESRI le 11/08/2020. La double identification par transpondeur des chevaux a été autorisée par la DGAL.

1. Utilisation de différents objets connectés en conditions standardisées chez des chevaux d'endurance

Chez les chevaux d'endurance, le suivi en course constitue un intérêt majeur pour une meilleure identification des chevaux susceptibles de déclarer une pathologie locomotrice ou des troubles métaboliques. A l'heure de la prise de conscience collective des enjeux de bien-être et santé animale, le suivi se doit d'être de plus en plus rapproché afin d'éviter les accidents et de limiter au maximum les situations pouvant mener à des blessures graves lors des compétitions. Les contrôles vétérinaires réguliers permettent une surveillance des chevaux et de leurs paramètres vitaux sur le moment. Néanmoins, les mécanismes métaboliques à l'œuvre pendant une course d'endurance sont encore méconnus. Les objets connectés pourraient être utilisés afin de mieux anticiper la survenue de blessure ou de désordres métaboliques au cours de l'effort.

Ce premier travail consistait à évaluer le fonctionnement concomitant de différents objets connectés et à observer les variations de plusieurs paramètres pertinents pour l'effort d'endurance (fréquence cardiaque, lactatémie, glycémie, température, vitesse, locomotion) au cours d'une séance d'entraînement de chevaux d'endurance. Les objets suivants ont été choisis :

- Capteurs de mesure de glucose interstitiel (freestyle Libre 2 ND – Abbott) ;
- Température corporelle mesurée par transpondeur (Biothermo ND – Allflex) en comparaison avec la température rectale ;
- Système Waook ND (fréquence cardiaque et vitesse) ;
- Système Movin'Smart ND (locomotion du cheval, couplage cavalier-cheval).

A. Matériels et méthodes

a. Animaux

Cinq chevaux d'endurance (trois juments et deux hongres ; trois de race Shagya et deux pur-sang arabes) âgés de 9 à 12 ans (moyenne de $10,4 \pm 1,1$ ans), pesant de 410 à 490 kg (moyenne de 444 ± 32 kg), qualifiés et entraînés pour courir sur des épreuves d'endurance de 90 à 160 km ont été utilisés pour l'étude. Ils provenaient d'une même écurie appartenant à un cavalier international français. Les chevaux ont été séparés en deux groupes et leurs caractéristiques sont résumées dans le tableau 1. Le premier groupe concernait des chevaux en reprise d'exercice suite à une course de 100 km huit jours avant l'expérimentation (cheval D) et à une intervention chirurgicale plusieurs mois auparavant (cheval C). Le second groupe incluait des chevaux en condition sub-optimale, préparant de futures échéances sur 120 ou 160 km. Ils étaient montés par leurs cavaliers habituels, professionnels ou amateurs de bon niveau.

Tableau 1 - Caractéristiques des chevaux de l'étude 1.

Lot	Lettre nominative	Sexe	Race	Age	Poids (kg)	Distance de qualification (km)	Total de km parcourus en course
1	D	F	AR	12	420	120	1952
	C	H	SHA	9	490	90	260
2	BE	F	AR	10	410	120	1152
	BA	F	SHA	10	440	160	1600
	A	H	SHA	11	460	160	1592

AR : cheval de race Arabe ; SHA : cheval de race Shagya

b. Etapes préliminaires

Les puces Biothermo ND d'Allflex permettant l'identification et la mesure de température ont été posées de manière conventionnelle le 01/04/2021 à mi-encolure à droite.

Un prélèvement sanguin pour numération et formule sanguine, ainsi qu'un bilan biochimique, ont été réalisés avant l'expérimentation pour vérifier l'état de santé des chevaux.

c. Protocole expérimental

Les capteurs de glycémie FreeStyle ND (Abbott) ont été posés sur peau rasée, nettoyée et séchée, et collés avec de la Super Glue sur l'encolure à gauche ou à droite. En accord avec les recommandations du fabricant, un temps d'attente de deux heures, entre la pose et le début des mesures à l'aide de ce capteur, a été respecté.

Pendant ce temps, les chevaux ont été échauffés pendant 30 minutes au pas sur tapis roulant avec une augmentation progressive de la pente jusqu'à 6 %. Ils ont ensuite été équipés avec un cardiofréquencemètre Polar ND associé au système Waook ND, puis embarqués dans un van et emmenés en forêt pour le test d'effort.

Le système d'enregistrement Waook ND a été démarré pendant le transport dans la dernière zone avec un réseau téléphonique correct.

Les cavaliers et leurs chevaux étaient également équipés du système Movin'Smart ND, qui renseigne sur la locomotion du cheval et le couplage cavalier-cheval. Plusieurs capteurs connectés à une application sur smartphone étaient installés sur le cheval et sur le cavalier.

Le test d'effort consistait en 40 minutes de pas et de trot en terrain varié, puis deux (lot 1) ou trois (lot 2) montées de 800 m au galop à vitesse croissante d'une montée à la suivante. Les montées (notées « palier ») étaient suivies d'une descente au pas en main (notée « récupération »). A la fin du test, les chevaux ont pu récupérer au pas et à l'arrêt pendant 30 minutes avant le retour à l'écurie en van.

Des mesures de glycémie interstitielle et de température, ainsi que les prélèvements sanguins pour mesurer la glycémie et la lactatémie ont été effectués régulièrement avant, pendant et après le test d'effort selon le protocole du tableau 2. Les mesures étaient effectuées à la fin de chaque période considérée.

Tableau 2 - Détails de l'expérimentation, des temps de mesure et de prélèvements sur les chevaux.

Evènement	Temps	Horaire	Glucose		Lacta- témie	Température		Waook
			Interstitiel	Sanguin		Rectale	Puce	
Début d'expérience	T0	0				X	X	
Marcheur 30' au pas Equilibrage capteur glycémie	T1	01:30		X		X	X	
Transport van 40'	T2	02:20	X	X	X	X	X	En continu
Trotting en forêt 40'		03:00		X	X			
Montée au galop 17 km/h	Palier 1	03:10	X	X	X		X	
Descente au pas	Récupération 1	03:15		X	X			
Montée au galop 19 km/h	Palier 2	03:20	X	X	X		X	
Descente au pas	Récupération 2	03:25		X	X			
Montée au galop 21 km/h	Palier 3	03:30	X	X	X		X	
Descente au pas	Récupération 3	03:35	X	X	X	X	X	
Récupération 30'	R30	04:05	X	X	X		X	
Retour écurie van 40'	R60	05:00	X	X	X	X	X	
Récupération écurie 30'	R90	05:30	X	X	X	X	X	

B. Résultats

a. Vitesse

La vitesse des chevaux a été mesurée au cours de l'étude via différents capteurs (Waook ND et Movin'Smart ND). L'évolution des vitesses moyennes obtenue pour les deux lots de chevaux est présentée dans la figure 5. Les chevaux du lot 1 ont eu tendance à aller plus vite que prévu sur la première montée et à avoir une vitesse moins élevée ou comparable sur la deuxième montée. Les chevaux du lot 2 ont respecté les paliers de vitesse définis au préalable. La figure 6 illustre les variations de vitesse au cours du test du cheval C (lot 1). Il a présenté une vitesse moyenne de $21,0 \pm 3,7$ km/h lors de la première montée (Palier 1) puis de $19,5 \pm 6,1$ km/h au cours de la seconde (Palier 2). Le cheval D, issu du même lot, a présenté une vitesse de $21,1 \pm 0,5$ km/h pour le palier 1 puis de $20,9 \pm 1,5$ km/h pour le palier 2.

Figure 5 - Évolution des vitesses moyennes (km/h) en fonction des paliers définis pour les lots de chevaux 1 et 2. Données acquises via Waook ND.

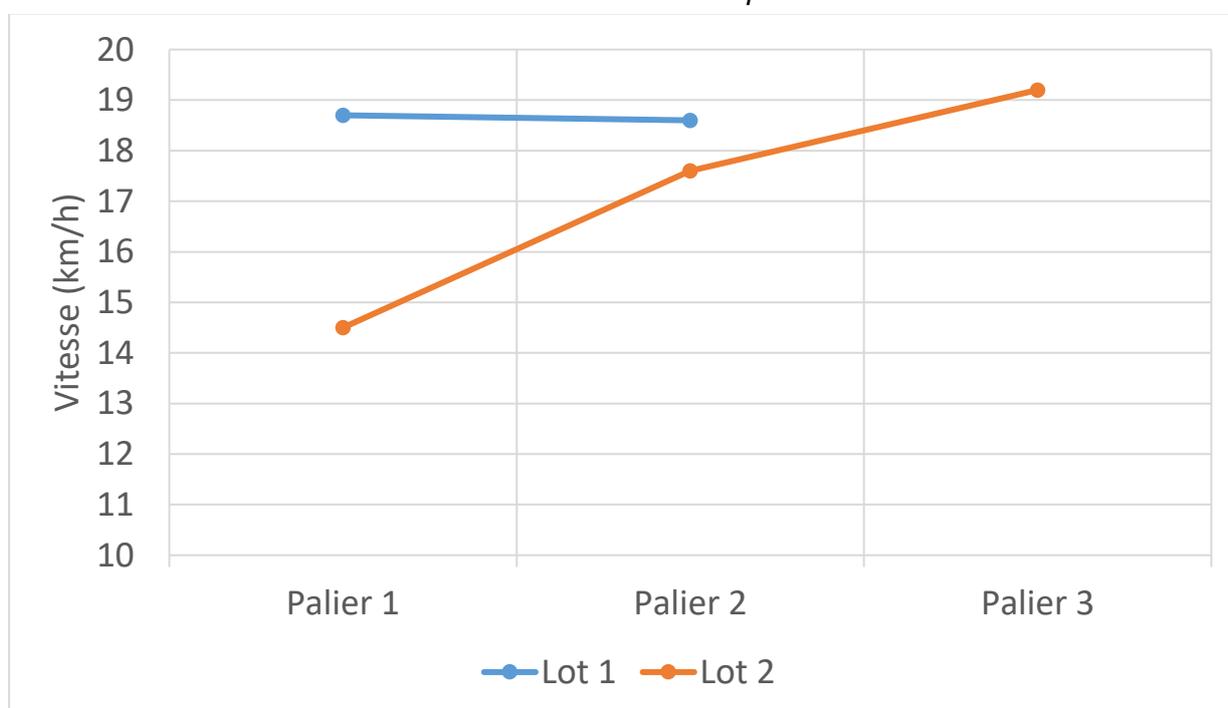
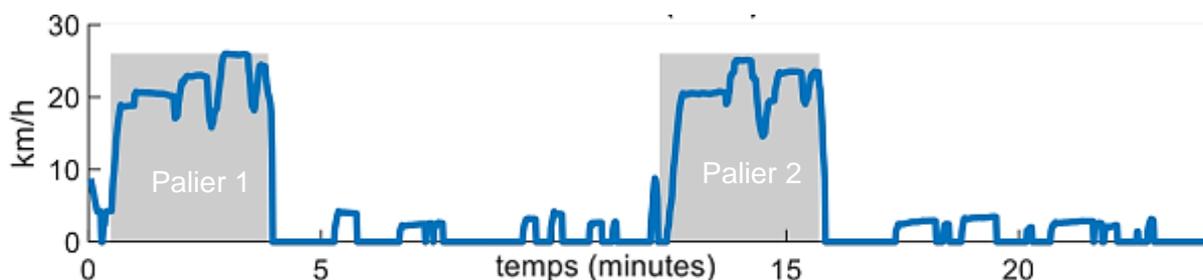


Figure 6 - Variation de la vitesse (km/h) au cours du test du cheval C. Données acquises via Movin'Smart ND.



b. Fréquence cardiaque

Les chevaux du lot 1 ont eu tendance à présenter une fréquence cardiaque plus faible en moyenne sur le palier 1 que sur le palier 2, comme le montre la figure 7, alors que la vitesse était plus élevée pour le palier 1. La figure 8 présente les fréquences cardiaques moyennes des chevaux du lot 2. Ceux-ci ont présenté une fréquence cardiaque croissante au fur et à mesure des paliers et de l'augmentation de vitesse. Pour les deux lots, la récupération fut rapide pour la plupart des chevaux avec des valeurs inférieures à 100 bpm après seulement quatre minutes de récupération. De même, les fréquences cardiaques maximales atteintes par le lot 2 suivaient l'augmentation de l'intensité de l'effort comme le montre la figure 9. Pour le lot 1, le cheval C a présenté une fréquence cardiaque maximale plus élevée sur le palier 1 que sur le palier 2 tandis que l'inverse est observé pour le cheval D.

La figure 10 illustre les variations de fréquence cardiaque au cours du test du cheval C. Il a présenté une fréquence cardiaque moyenne de 196 ± 24 bpm lors de la première montée, puis de 203 ± 26 bpm au cours de la seconde. Le cheval D, issu du même lot, a présenté une fréquence cardiaque moyenne de 153 ± 8 bpm pour le palier 1 puis de 156 ± 9 bpm pour le palier 2.

Figure 7 - Fréquence cardiaque moyenne (bpm) du lot 1 de chevaux au cours du test.

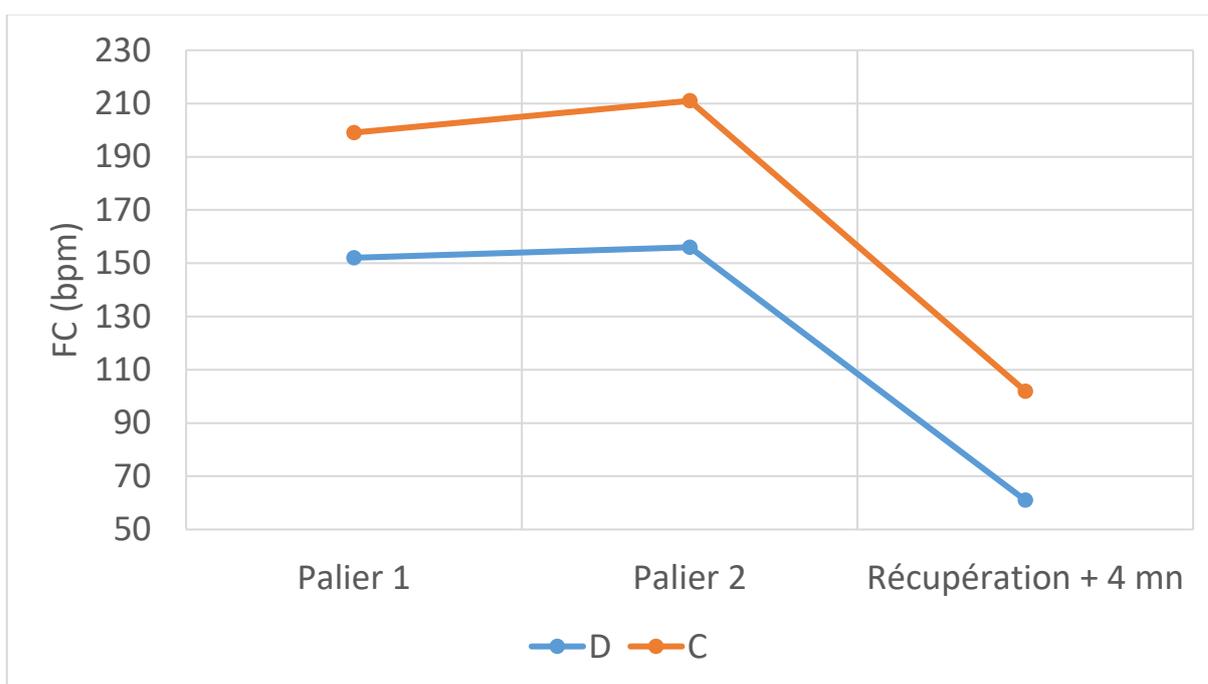


Figure 8 - Fréquence cardiaque moyenne (bpm) du lot 2 de chevaux au cours du test.

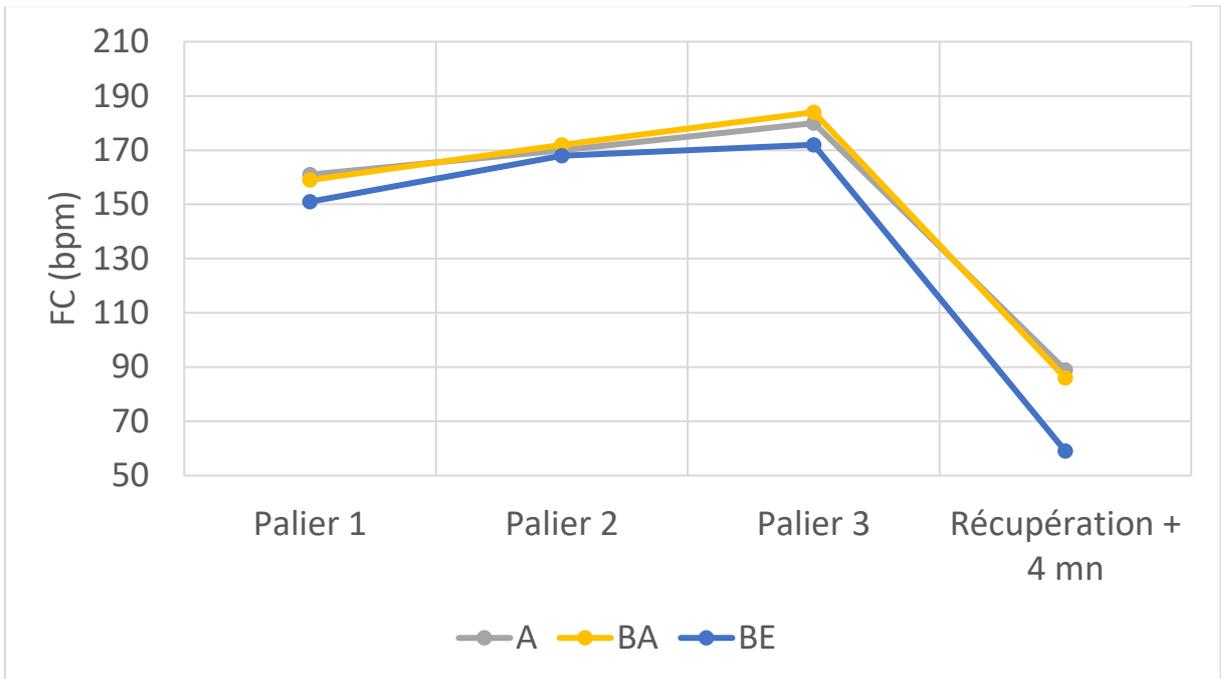


Figure 9 - Fréquence cardiaque maximale (bpm) atteinte par les chevaux au cours de l'effort.

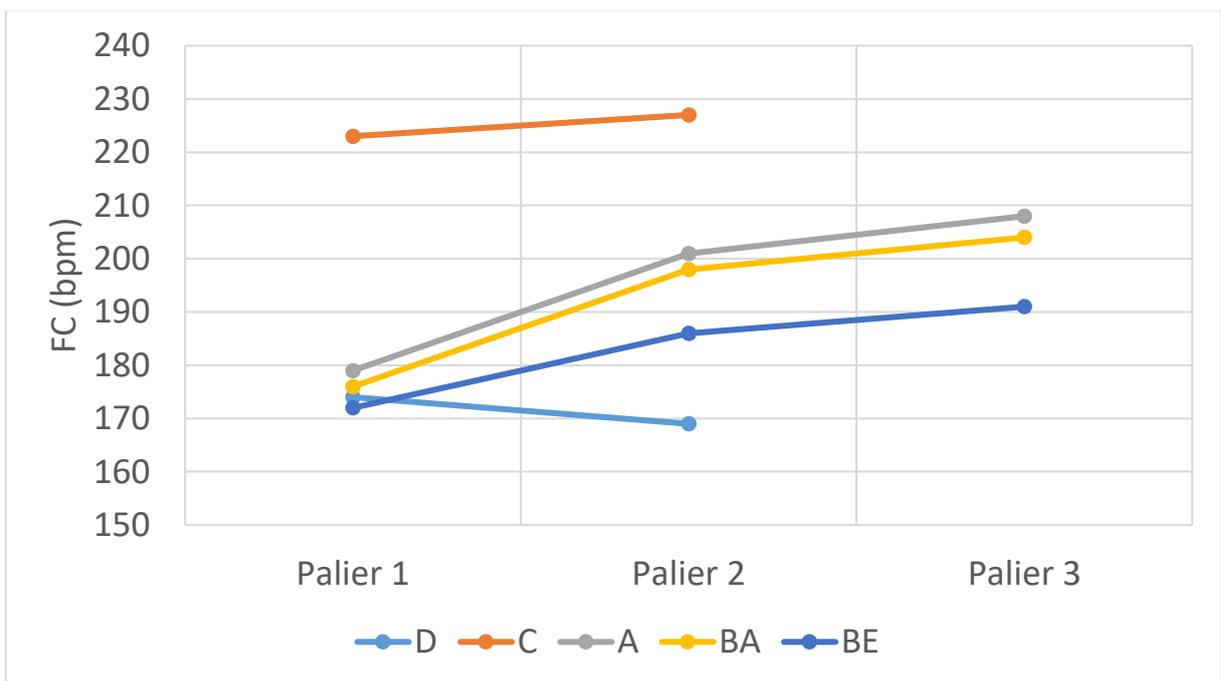
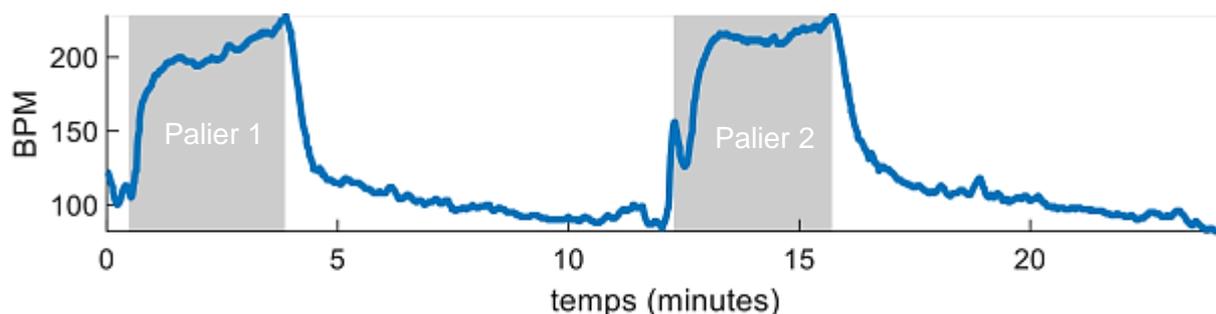


Figure 10 - Variation de la fréquence cardiaque (bpm) au cours du test du cheval C. Données acquises via Movin'Smart ND.



c. Température corporelle

Le test d'effort a induit une hyperthermie chez l'ensemble des sujets avec des valeurs maximales allant de 38,2 °C à 39,2 °C. Les moyennes des données obtenues ainsi que le coefficient de corrélation obtenu entre la température rectale (TR) et la température de la puce (TP) sont résumées dans le tableau 3.

Tableau 3 - Synthèse des résultats obtenus pour la température.

	Moyenne	Ecart type
Température rectale TR (°C)	37,6	0,3
Température puce TP (°C)	37,4	0,6
Différence TR - TP (°C)	0,2	0,4
Coefficient de corrélation	0,57	
p value	0,002*	

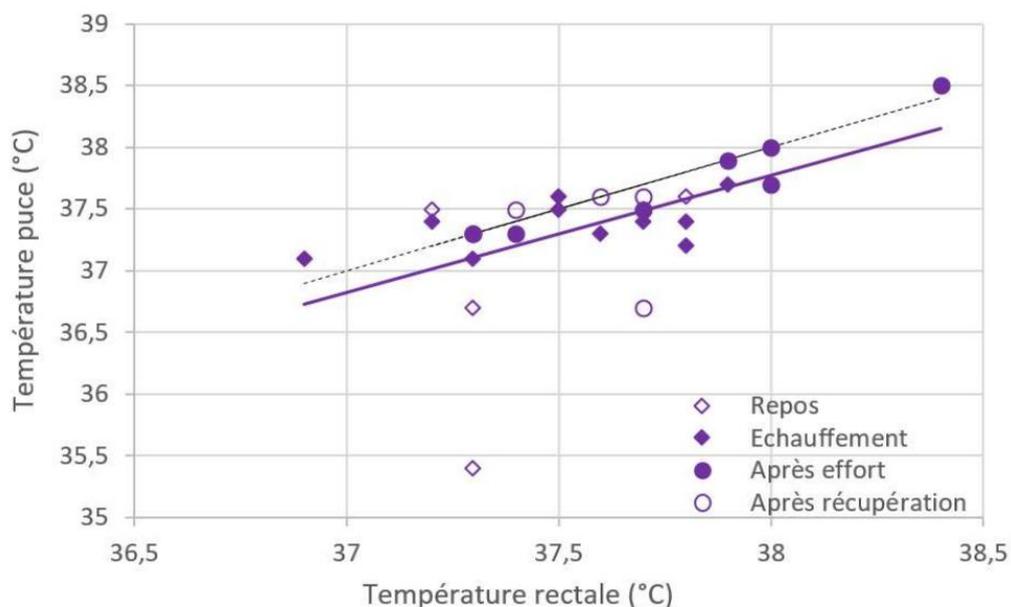
La température mesurée par la puce était en moyenne 0,2 °C ± 0,4 °C inférieure à la température rectale. Les plus grandes différences ont été observées lors des mesures à la sortie du pré le matin (T0) avec une différence moyenne de 0,5 °C ± 0,8 °C, comme le montre le tableau 4. Individuellement, certains chevaux ont présenté une température de puce jusqu'à 1,9 °C inférieure à la température rectale, en particulier à T0 et après la récupération (R90). Au cours de l'effort, les valeurs tendaient à s'harmoniser avec un écart de -0,2 °C ± 0,1 °C en fin d'effort (M3). Enfin, il apparaît que la température rectale et la température de la puce étaient bien corrélées (*p-value* < 0,01).

Tableau 4 – Moyennes des températures obtenues en fonction des temps de l'étude.

	T°C rectale (TR)	T°C puce (TP)	Différence TP-TR	Ecart type (TR)	Ecart type (TP)	Ecart type (diff)
T0	37,5	36,9	0,5	0,3	0,9	0,8
T1	37,6	37,4	0,2	0,3	0,2	0,3
T2	37,4	37,3	0,1	0,3	0,2	0,2
M3	38,0	38,2	-0,2	0,0	0,1	0,1
R30	38,2	38,2	-0,1	0,4	0,4	0,1
R60	37,5	37,4	0,1	0,2	0,1	0,1
R90	37,5	37,3	0,2	0,2	0,4	0,5

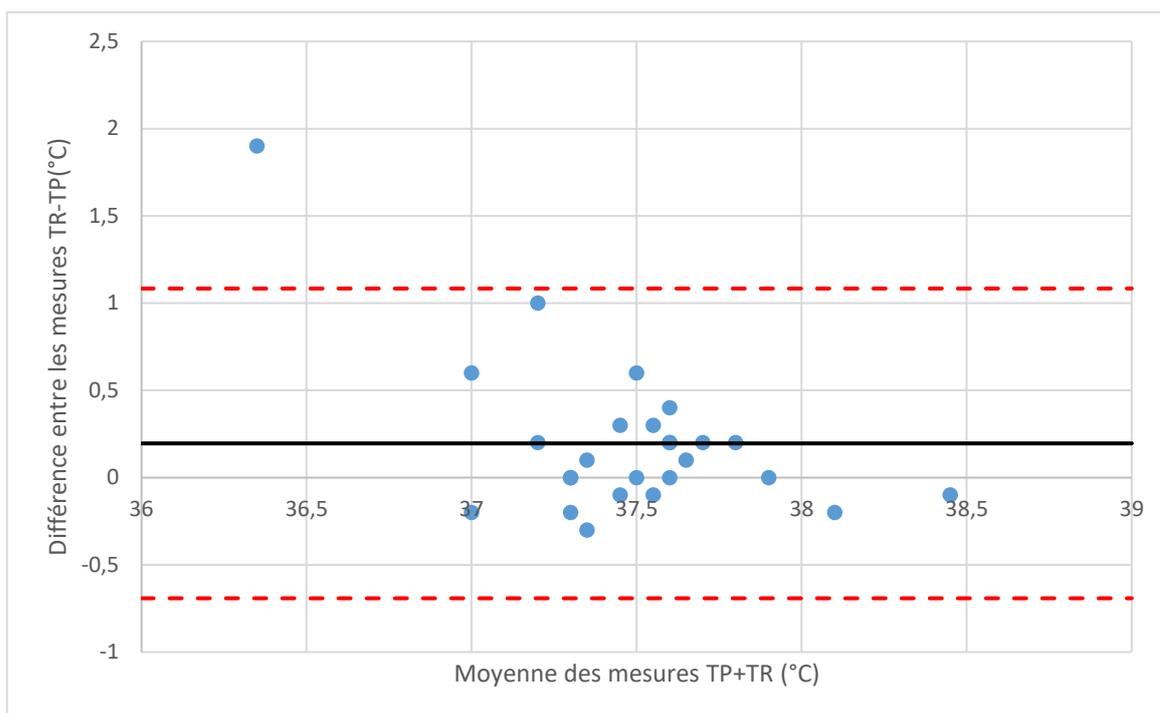
La figure 11 présente la régression linéaire entre la température rectale et la température de la puce selon les différents temps du test.

Figure 11 - Relation entre la température rectale (TR) et la température de la puce (TP) en fonction du moment de mesure. La droite noire pointillée correspondrait à $TP = TR$. La droite mauve est la régression linéaire sur les mesures.



La figure 12 représente le graphique de Bland-Altman obtenu pour les données de température rectale et de la puce. Les lignes pointillées rouges indiquent les limites haute et basse de l'intervalle à 95 %. La ligne noire en gras représente la moyenne. La différence entre les deux méthodes de mesure est faible et proche de la moyenne pour des valeurs autour de 37,5 °C et au-dessus. Les différences maximales sont observées pour les faibles températures.

Figure 12 - Graphique de Bland-Altman pour la comparaison entre température rectale (TR) et température de la puce (TP). Les pointillés rouges indiquent les limites d'agrément à 95%.



d. Lactatémie

Les figures 13 et 14 présentent l'évolution de la lactatémie pendant le test puis la récupération chez les chevaux des lots 1 et 2. Le lot 1 paraît hétérogène avec des courbes très différentes pour les deux chevaux ; le cheval C présente des valeurs élevées de lactatémie (≥ 12 mmol/L) tandis que le cheval D présente des valeurs plutôt basses avec peu de variations au cours du test (≤ 4 mmol/L). Le lot 2 paraît plus homogène avec des profils de courbes similaires, une augmentation de la lactatémie pendant l'effort puis une diminution durant la phase de récupération, et ce avec une élévation globale de la lactatémie au fur et à mesure de l'augmentation de l'intensité de l'effort. Le cheval BA a atteint un pic de lactatémie de 8,4 mmol/L sur le dernier palier tandis que le cheval BE était à 3,9 mmol/L et le cheval A à 5,4 mmol/L.

Figure 13 – Évolution de la lactatémie (mmol/L) au cours du test pour le lot 1.

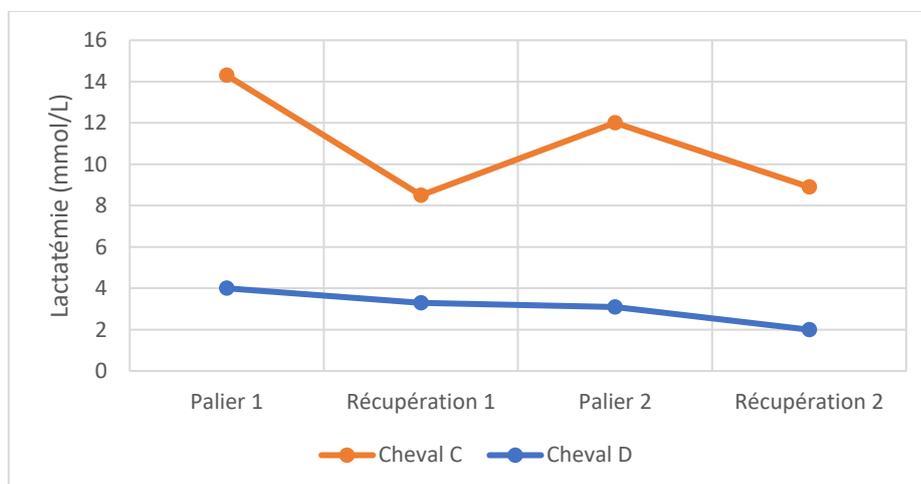
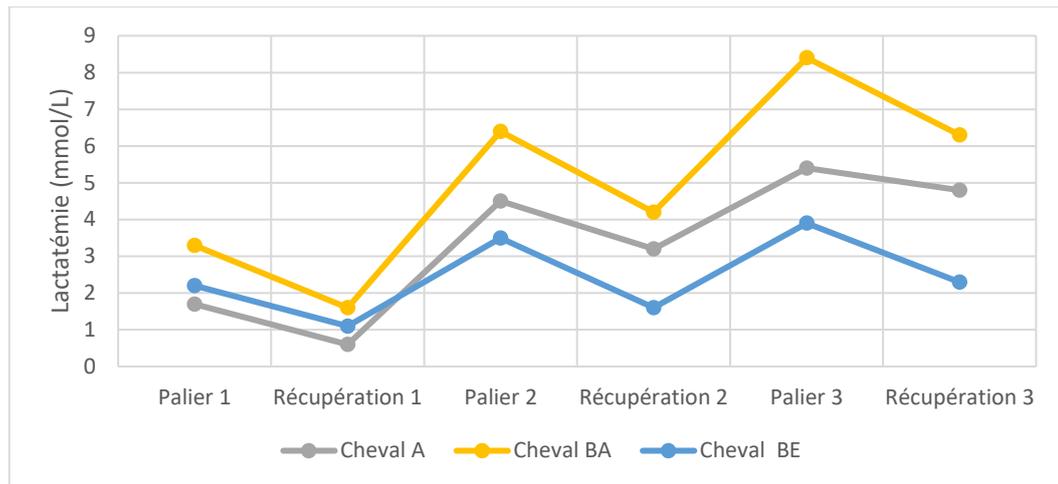
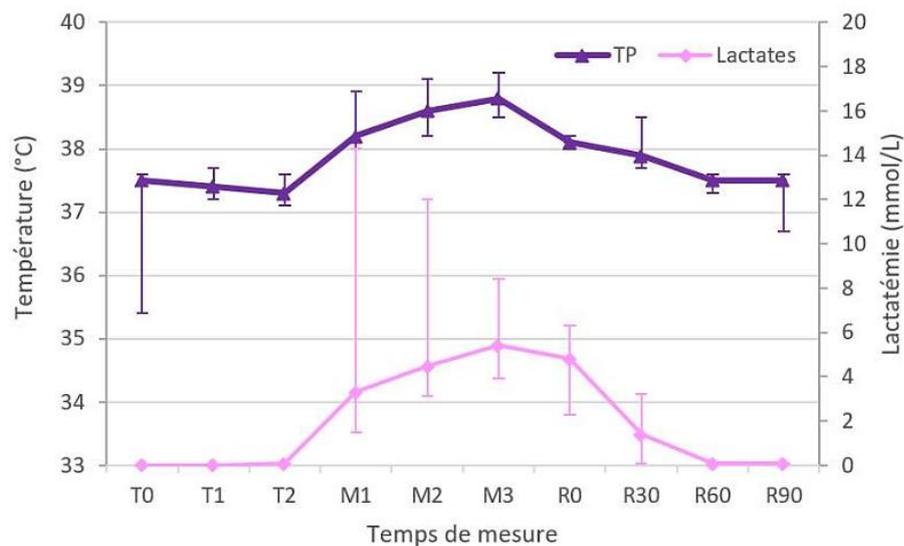


Figure 14 - Évolution de la lactatémie (mmol/L) au cours du test pour le lot 2.



La figure 15 présente l'évolution de la lactatémie et de la température de la puce au cours de l'effort. La température corporelle obtenue via la puce et la lactatémie présentent une évolution comparable avec une augmentation des valeurs au cours de l'effort puis une décroissance lors de la récupération pour retrouver les valeurs physiologiques observées avant l'effort.

Figure 15 - Évolution de la température de la puce (TP) (°C) et de la lactatémie (mmol/L) en fonction des temps de mesure. Valeurs médianes, minimales et maximales sur les 5 chevaux.



e. Glycémie

Cette manipulation constituait une étude préliminaire sur l'utilisation d'un capteur de mesure du glucose interstitiel à l'effort. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 5. Il s'agissait de suivre l'évolution du glucose interstitiel via un capteur FreeStyle d'Abbott et de comparer les données obtenues à des valeurs de glycémie mesurée au même moment pour observer la concordance entre les deux mesures.

La figure 16 présente l'évolution de la glycémie chez les différents chevaux de l'étude en fonction des lots et permet d'observer la différence à l'effort entre la glycémie et le glucose interstitiel. Il apparaît que la glycémie tendait à diminuer au pic de l'effort puis à remonter avec la récupération, tandis que le glucose interstitiel augmentait au cours de l'effort puis diminuait par la suite. Sur le lot 2, on observait des courbes de glycémie similaires chez les trois chevaux.

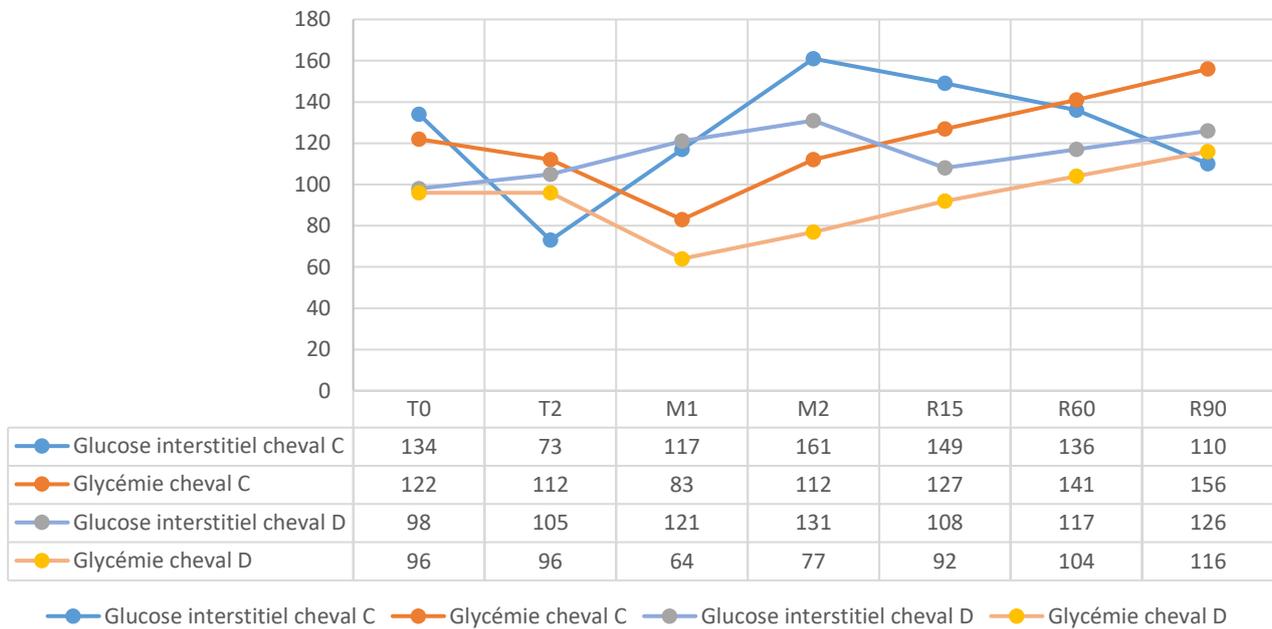
Le tableau 5 montre que les valeurs de glucose interstitiel et de glycémie différaient et n'étaient pas corrélées sauf après 60 minutes de repos. A R60, les valeurs étaient significativement corrélées avec un coefficient de corrélation de 0,9 (p -value < 0,05). Au palier 2, au pic de l'effort, une corrélation inverse tendait à être observée (coefficient de 0,86 et p -value de 0,06).

Tableau 5 - Moyennes, différences, écart-types, coefficient de corrélation obtenus pour la glycémie et le glucose interstitiel selon les temps de mesure. Les cases grisées correspondent à des analyses non réalisables. S.d = écart-type.

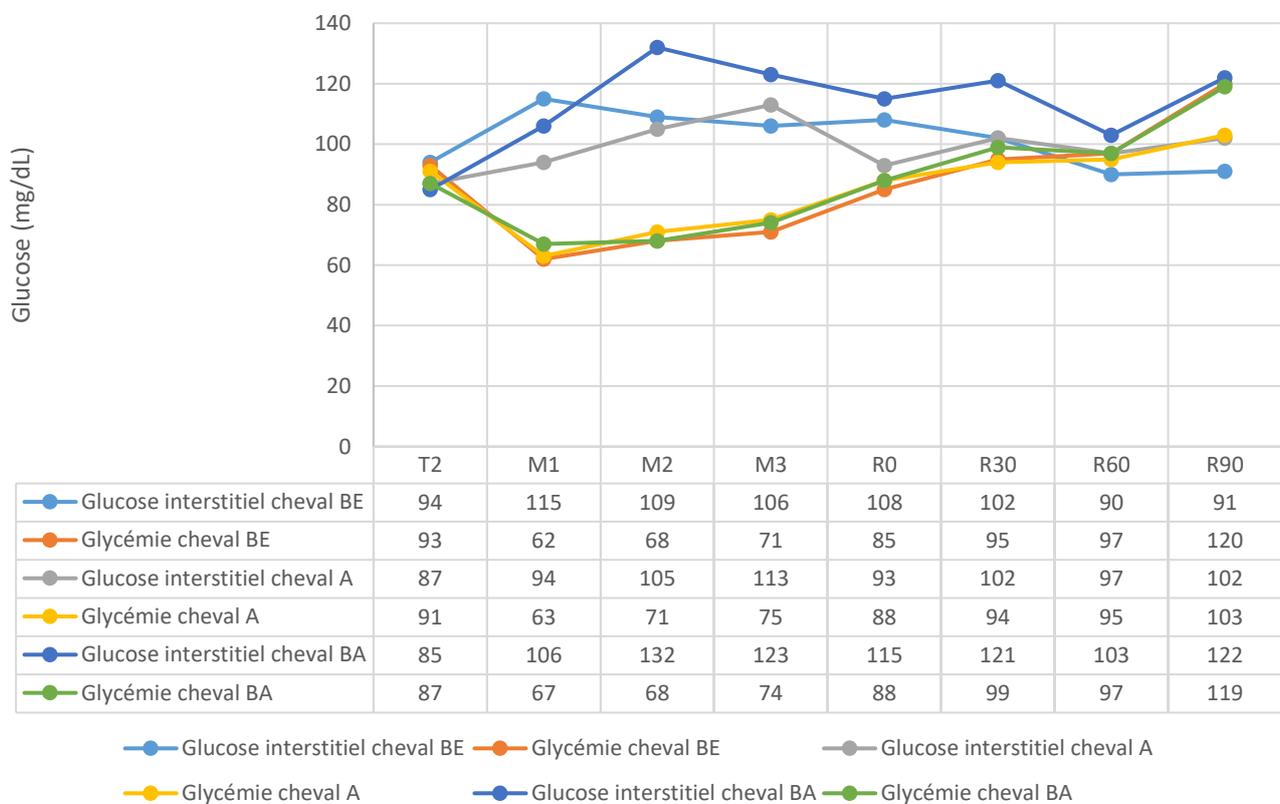
	Moyenne glucose interstitiel	Moyenne glycémie	Différence (Glu – Gly)	S.d glucose interstitiel	S.d glycémie	Coefficient de corrélation	P-value
T0	116	109	7	25,5	18,4		
T2	88,8	95,8	-7	11,8	9,6	-0,5	0,4
Palier1	110,6	67,8	42,8	10,8	8,7	0,3	0,6
Palier2	127,6	79,2	48,4	22,4	18,7	0,86	0,06
Palier3	114,0	73,3	40,7	8,5	2,08	0,65	0,55
R0	105,3	87,0	18,3	11,2	1,7	-0,2	0,87
R15	128,5	109,5	19,0	29,0	24,7		
R60	108,6	106,8	1,8	18,3	19,4	0,9	0,03*
R90	110,2	122,8	-12,6	14,4	19,8	0,05	0,93

Figure 16 - Évolution de la glycémie et du glucose interstitiel (mg/dL) en fonction des différents temps de l'expérimentation chez les différents lots de chevaux de l'étude.

Evolution du glucose (mg/dL) au cours de l'effort pour le lot 1



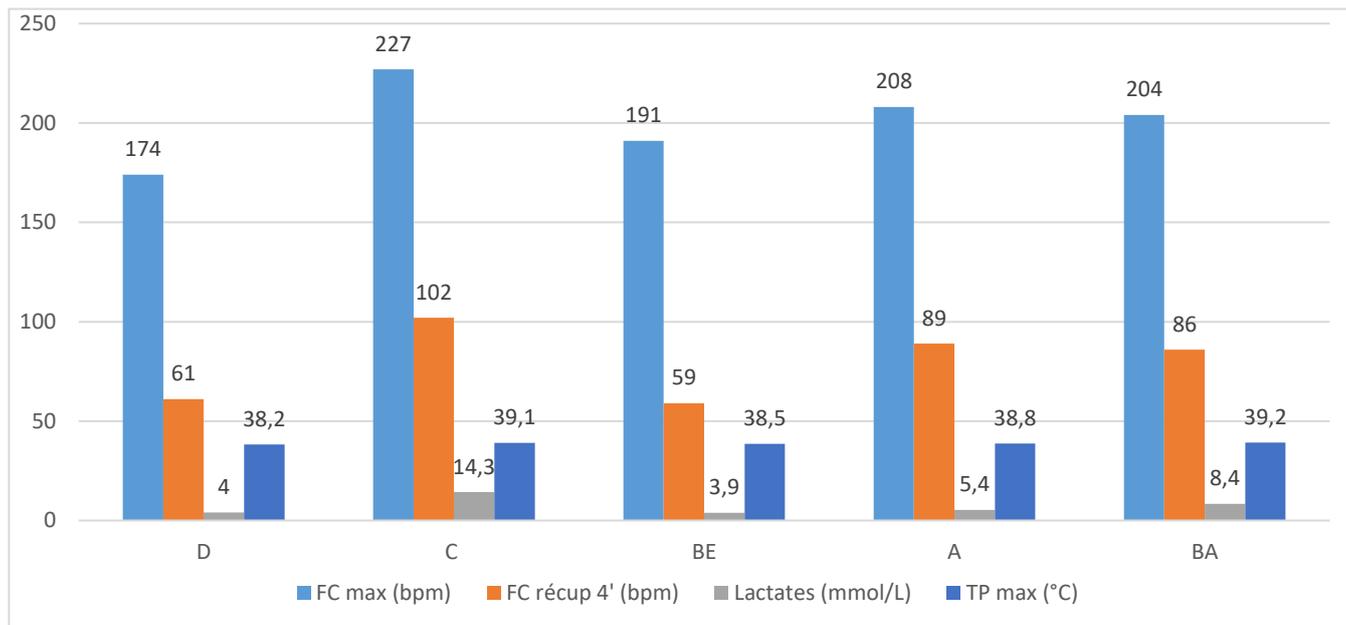
Evolution du glucose (mg/dL) au cours de l'effort pour le lot 2



f. Synthèse sur le test d'effort

Il est possible d'établir que les chevaux C, BA puis A ont été les chevaux les plus sollicités par le test d'effort. Ils présentaient une fréquence cardiaque et une lactatémie plus élevées, ainsi qu'une récupération plus lente. De plus, ils ont atteint des températures plus élevées en fin d'effort (38,8 à 39,2 °C) que les autres chevaux (38,2 à 38,5 °C). La figure 17 résume les différents paramètres suivis.

Figure 17 - Synthèse des différents paramètres suivis au cours de l'entrainement chez les cinq chevaux. (FC : fréquence cardiaque ; TP : température de la puce).



C. Discussion

L'étude a permis de répondre en partie aux objectifs fixés initialement. Le protocole a été réalisé en accord avec ce qui avait été défini, à l'exception des vitesses, compliquées à ajuster au cours de l'effort en montée.

La mesure de la température corporelle à l'aide d'un transpondeur s'est avérée bien plus rapide et aisée en condition d'effort que la prise de température rectale, en particulier lorsque les chevaux étaient excités et difficilement immobiles en fin de montée au galop. Une hyperthermie induite par l'effort a pu être bien objectivée à l'aide des mesures réalisées. Une corrélation significative ($p\text{-value} < 0,05$) entre les températures de la puce et rectale a été mise en évidence.

Les conditions de terrain étaient proches de celles des courses d'endurance avec des chevaux uniquement observables sur une portion d'un parcours escarpé et arboré. Il n'a pas été possible de suivre en direct la vitesse et la fréquence cardiaque des chevaux avec les systèmes Waook ND et Moovin'Smart ND, du fait de la faible couverture réseau et de la distance entre l'opérateur et les capteurs. Les données ont pu être récupérées ultérieurement. Les mouvements de terrain, la distance à parcourir pour avoir un effort suffisant et les vitesses difficiles à atteindre ou à maintenir contribuent à rendre difficile la standardisation des tests d'effort chez les chevaux d'endurance contrairement aux tests réalisés sur hippodrome.

Les mesures du glucose interstitiel constituaient une première en conditions d'effort chez le cheval. Chez l'Homme, le système FreeStyle d'Abbott apparaît comme le plus fiable à l'effort, avec une *mean absolute relative difference* (MARD) de 8,7 % en comparaison à d'autres systèmes de mesure du glucose interstitiel continue ou flash (Aberer *et al.*, 2017 ; Moser *et al.*, 2018). Sur notre étude, la MARD serait de 22 %. Les résultats diffèrent certes des valeurs de glycémie mais sont intéressants et motivent la poursuite de l'étude afin d'obtenir davantage de données.

Les résultats obtenus invitent à recentrer les paramètres suivis pour une application sur des courses officielles d'endurance. En effet, ce test a permis de mettre en évidence la difficulté de suivre la vitesse, la fréquence cardiaque et la locomotion en temps réel dans des conditions proches de celles rencontrées sur les courses d'endurance. L'étude se poursuit donc avec le suivi de la température via la puce à technologie Biothermo ND et de la glycémie via le capteur FreeStyle ND. Ces deux paramètres ont un intérêt physiologique. Le suivi de la température au cours de l'effort permettra de voir comment le cheval gère l'hyperthermie induite au cours de l'effort d'endurance. La température transmise par la puce pourrait être mesurée chez les chevaux aux contrôles vétérinaires lors du passage des *Vet Gates* pour le dépistage des individus dépassés d'un point de vue métabolique, en particulier lorsque la perte du tonus anal réduit la précision des mesures via un thermomètre rectal. Le suivi du glucose interstitiel sur de longues distances est également un paramètre clé puisque les chevaux doivent s'adapter et réguler leur glycémie tout du long de la journée avec relativement peu d'apport énergétique. Les chevaux compromis métaboliquement pourraient présenter une hypoglycémie identifiable grâce à ces capteurs.

2. Suivi en course de température et glycémie

Chez les chevaux d'endurance, les mécanismes de thermorégulation peuvent se retrouver dépassés pendant l'effort. L'hyperthermie induite par l'exercice n'est alors plus compensée et cela peut conduire à l'apparition de troubles métaboliques. Les puces d'identification à technologie Biothermo ND permettent d'assurer un suivi pratique et rapide de la température corporelle des chevaux à l'effort par scan de l'encolure à l'aide d'un transpondeur. Leur intérêt pour le suivi de la température du cheval a été établi au repos (Scicluna, C., 2018 ; Auclair-Ronzaud *et al.*, 2020a, 2020b) et lors d'efforts standardisés comme dans l'étude sur tapis d'exercice de Kang *et al.*, (2020), ou dans la première partie de cette étude. Un suivi systématique de la température pendant les courses, notamment à l'aide de ces puces, pourrait permettre de détecter plus précocement des situations à risque et de mettre en œuvre des méthodes de refroidissement adaptées.

Le suivi du glucose interstitiel s'inscrit dans la même optique. Son utilisation en course pourrait permettre d'identifier les chevaux susceptibles de déclarer un syndrome d'épuisement ou des désordres métaboliques. Si l'usage de capteurs, flash ou continu, tel que le FreeStyle Libre d'Abbott, ont été validés au repos et lors d'hospitalisation (Cunneen *et al.*, 2020 ; Wong *et al.*, 2021), leur utilisation et leur pertinence à l'effort reste à établir.

La première étude nous a permis de tester l'utilisation de la puce de température et du capteur de glucose interstitiel sur des chevaux d'endurance pendant un test d'effort. Cette deuxième étude s'inscrit dans la continuité de la première mais dans des conditions de compétitions officielles d'endurance. Il s'agit d'une étude préliminaire sur un nombre restreint de sujets.

Les objectifs de cette étude étaient :

- De tester la faisabilité du protocole de suivi à l'aide des capteurs de température et de glucose interstitiel au cours de compétitions officielles ;
- D'établir les variations de températures mesurées par la puce lors de compétitions d'endurance internationales et de les comparer à celles obtenues par mesure rectale ;
- D'effectuer une observation préliminaire de l'évolution du glucose interstitiel au cours de raids d'endurance à l'aide d'un système de mesure flash.

A. Matériels et méthodes

a. Animaux

Trois chevaux d'endurance (deux juments et un hongre ; deux de race Shagya et un pur-sang arabe), issus des cinq chevaux ayant participé à la première étude, ont été sélectionnés pour l'étude. Ils étaient âgés de 11 à 12 ans (moyenne de $11,3 \pm 0,6$ ans) et entraînés dans une même écurie. Les caractéristiques des chevaux de l'étude sont résumées dans le tableau 6. Dans le cadre de l'étude, ils ont participé à onze courses d'endurance internationales allant de 100 à 160 km avec différents cavaliers.

Tableau 6 - Caractéristiques des chevaux de l'étude 2.

Lettre nominative	Sexe	Race	Age	Distance maximale en course	Nombre de courses réalisées pendant l'étude
BE	F	AR	11 ans	160 km	4
BA	F	SHA	11 ans	120 km	3
A	H	SHA	12 ans	160 km	4

b. Protocole expérimental

Un capteur de glycémie FreeStyle ND (Abbott), version 1 ou version 2, a été posé à gauche ou à droite de l'encolure sur peau rasée, nettoyée et séchée, et collé avec de la Super Glue la veille ou le matin de chaque épreuve. Le premier scan du capteur impliquait une initialisation de 60 minutes. La figure 18 montre un capteur de glycémie en place.

Figure 18 – Capteur de glycémie FreeStyle Libre 2 ND en place au cours d'une épreuve.

(Photographie : N. Rallet)



La température de la puce et le glucose interstitiel ont été relevés à chaque point d'assistance et toutes les cinq minutes dans les phases de récupération lorsque cela était possible. La température rectale a été mesurée sur les phases de récupération uniquement lorsque le cheval était à l'arrêt et que cela ne présentait pas de risque pour l'opérateur.

Un lecteur Global Pocket Reader Plus™ a été utilisé pour la mesure de la température via la puce. Pour le glucose interstitiel, la lecture du capteur se faisait à l'aide du lecteur de glycémie FreeStyle Libre ND ou de l'application LibreLink ND pour smartphone. Des thermomètres rectaux de différentes marques, variant selon les opérateurs, ont été utilisés pour la mesure de la température rectale.

Le tableau 7 résume les caractéristiques des courses auxquelles les chevaux ont participé, ainsi que les différents paramètres qui ont pu être mesurés. Dix courses sur les onze ont été intégralement courues. Le cheval BE a été éliminé pour raison métabolique à l'issue de la première boucle d'une course de 160 km.

Les données ont été regroupées par course, par cheval et de manière globale pour l'ensemble des courses courues. Les températures de la puce et rectale ont été comparées par régression linéaire, limites d'agrément (graphique de Bland-Altman), et coefficient de corrélation. L'évolution de la température de la puce a été étudiée par des méthodes descriptives (moyenne et écart-type) en fonction des temps de mesures sur une course. La glycémie a fait uniquement l'objet d'observations et fera l'objet d'autres études plus approfondies.

Tableau 7 - Résumé des courses suivies et des mesures effectuées. *TP : température de la puce ; TR : température rectale.*

Cheval	Lieu	Date	Distance (km)	Capteur de glucose	Suivi TP	Suivi TR	Course achevée
A	Jullianges	31/07/2021	120	FL2	X	X	Oui
	Castelsagrat	26/05/2022	100		X	X	Oui
	Jullianges	29/07/2022	120	FL2	X	X	Oui
	Florac	19/09/2022	160	FL2	X	X	Oui
BA	Fontainebleau	25/03/2022	100	FL2	X	X	Oui
	Compiègne	23/04/2022	120	FL1	X	X	Oui
	Compiègne	26/06/2022	120	FL2	X	X	Oui
BE	Compiègne	23/04/2022	120	FL1	X	X	Oui
	Castelsagrat	27/05/2022	160		X	X	Non
	Monpazier	28/08/2022	120	FL2	X	X	Oui
	Fontainebleau	14/10/2022	160	FL2	X	X	Oui

FL1 = FreeStyle Libre 1; FL2 = FreeStyle Libre 2.

B. Résultats

a. Données générales sur les conditions de courses

Les onze courses se sont déroulées entre juillet 2021 et octobre 2022 en France. Les conditions climatiques étaient favorables dans l'ensemble, avec des températures extérieures minimales allant de 3 à 16 °C et maximales de 16 à 32 °C, pour une moyenne de 17,4 °C.

Les chevaux ont couru à une vitesse moyenne de 17,2 km/h, avec des vitesses moyennes en course allant de 15,3 km/h à 19,0 km/h. Les chevaux ont terminé leurs courses en bonne condition physique, à l'exception du cheval BE qui a été éliminé pour cause métabolique (récupération cardiaque anormalement longue) sur une course.

b. Température : comparaison des valeurs de la température de la puce et de la température rectale

- Comparaison des valeurs de températures de la puce et rectale par course :

Les données acquises en courses sont résumées dans le tableau 8. Les valeurs moyennes de la température de la puce variaient de $36,8 \pm 0,5$ °C à $38,2 \pm 0,2$ °C selon les courses avec des extrêmes allant de 35,5 °C à 38,8 °C. Les valeurs moyennes de la température rectale variaient de $37,6 \pm 0,3$ °C à $38,8 \pm 0,4$ °C et oscillaient entre 36,5 °C et 39,6 °C. En course, les valeurs de la température de la puce et de la température rectale étaient différentes (p -value < 0,05) mais apparaissaient néanmoins corrélées (p -value < 0,05).

Tableau 8 - Comparaison des valeurs moyennes des températures de la puce (TP) et rectale (TR) selon les courses. S.D = écart-type.

Cheval	Lieu	Moyenne TP (°C)	Moyenne TR (°C)	Moyenne Diff TR - TP (°C)	SD TP	SD TR	SD Diff	Min TP (°C)	Max TP (°C)	Min TR (°C)	Max TR (°C)	Coefficient de corrélation	Moyenne T ^{ext} (°C)	Vitesse Moyenne (km/h)
A	Jullianges	38,1	38,1	0,0	0,3	0,3	0,2	37,4	38,5	37,4	38,6	0,9*	14,1	18,5
	Castelsagrat	38,0	37,8	-0,1	0,2	0,3	0,2	37,4	38,3	37,2	38,3	0,6*	22,1	16,9
	Jullianges	37,9	37,9	-0,1	0,4	0,4	0,3	37,3	38,8	37,1	38,5	0,7*	20,1	17,5
	Florac	37,9	37,6	-0,4	0,3	0,3	0,3	37,4	38,3	36,8	38,0	0,5*	18,3	15,3
BA	Fontainebleau	36,8	38,2	1,3	0,5	0,5	0,4	35,5	37,5	37,5	39,4	0,6*	17,4	15,8
	Compiègne	36,8	38,0	1,2	0,5	0,2	0,5	36,0	37,4	37,7	38,3	0,3	14,7	16,9
	Compiègne	37,1	38,3	1,2	0,4	0,4	0,5	36,1	38,0	37,1	38,9	0,4	17,9	17,1
BE	Compiègne	38,1	38,3	0,2	0,1	0,2	0,2	37,9	38,2	37,8	38,7	0,2	14,7	16,9
	Castelsagrat	37,7	38,0	0,3	0,1	0,2	0,2	37,6	37,9	37,7	38,3	0,7*	12,4	RT
	Monpazier	37,9	38,0	0,1	0,2	0,7	0,7	37,5	38,2	36,5	39,4	0,0	25,0	18,3
	Fontainebleau	38,2	38,8	0,6	0,2	0,4	0,2	37,9	38,6	38,0	39,6	0,9*	15,3	19,0

* corrélation significative

- Comparaison des valeurs de températures de la puce et rectale par cheval :

Chez les chevaux A et BE, l'écart entre les températures de la puce et rectale était faible avec une différence de $-0,1 \pm 0,3$ °C pour le cheval A et de $0,3 \pm 0,3$ °C pour le cheval BE. Pour le cheval BA, l'écart moyen était plus élevé avec une température donnée par la puce en moyenne $1,3 \pm 0,4$ °C inférieure à la température rectale et ce sur toutes les courses auxquelles il a participé. Les tableaux 9, 10 et 11 résument les données obtenues en courses respectivement pour les chevaux A, BA et BE. Les régressions linéaires obtenues pour chaque cheval correspondent aux figures 19 à 21. Les coefficients de détermination (R^2) étaient compris entre 0,2 et 0,4. Les graphiques de Bland-Altman (figure 22 à 24) correspondent aux valeurs relevées pour chaque cheval. La dispersion des données est moindre chez les chevaux A et BE mais plus élevée chez le cheval BA. Pour les trois chevaux, les moyennes des valeurs des températures de la puce et rectale étaient différentes mais bien corrélées.

Tableau 9 - Résumé des données de température obtenues en courses pour le cheval A, (S.d = écart-type ; TP : température puce ; TR : température rectale).

	TP	TR	Diff TR - TP
Moyenne	38,0 °C	37,8 °C	-0,2 °C
S.d	0,3 °C	0,4 °C	0,3 °C
Min	37,3 °C	36,8 °C	
Max	38,8 °C	38,6 °C	
Corrélation	0,63* (p<0,01)		
T test	p<0,05		

Tableau 10 - Résumé des données de température obtenues en courses pour le cheval BA,
(S.d = écart-type ; TP : température puce ; TR : température rectale).

	TP	TR	Diff TR - TP
Moyenne	36,9 °C	38,2 °C	1,3 °C
S.d	0,5 °C	0,4 °C	0,4 °C
Min	35,5 °C	37,1 °C	
Max	38,0 °C	39,4 °C	
Corrélation	0,48* (p<0,01)		
T test	p<0,05		

Tableau 11 - Résumé des données de température obtenues en courses pour le cheval BE,
(S.d = écart-type ; TP : température puce ; TR : température rectale).

	TP	TR	Diff TR - TP
Moyenne	38,0 °C	38,4 °C	0,4 °C
S.d	0,3 °C	0,6 °C	0,4 °C
Min	37,5 °C	36,5 °C	
Max	38,6 °C	39,6 °C	
Corrélation	0,66* (p<0,01)		
T test	p<0,05		

Figure 19 - Évolution de la température de la puce (TP) en fonction de la température rectale (TR) chez le cheval A pour l'ensemble de ses courses.

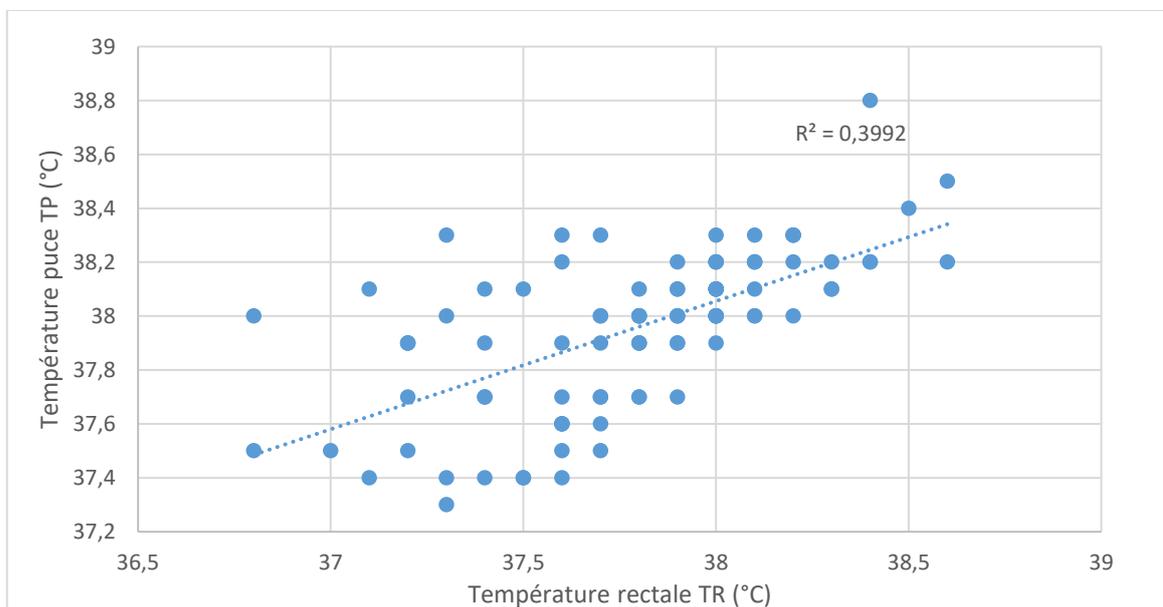


Figure 20 - Évolution de la température de la puce (TP) en fonction de la température rectale (TR) chez le cheval BA pour l'ensemble de ses courses.

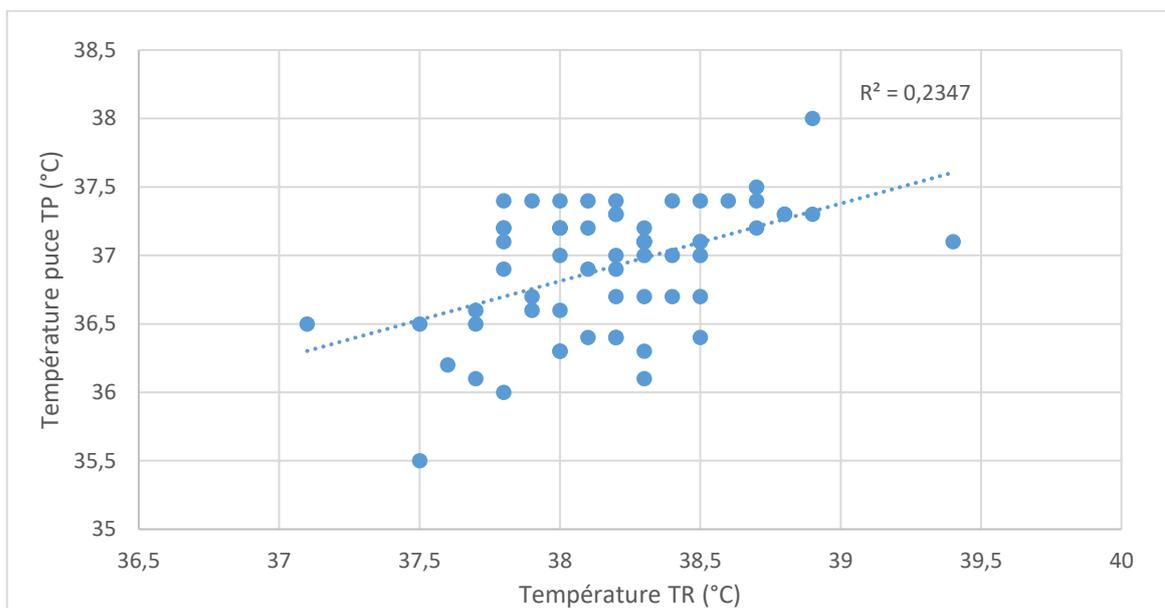


Figure 21 - Évolution de la température de la puce (TP) en fonction de la température rectale (TR) chez le cheval BE pour l'ensemble de ses courses

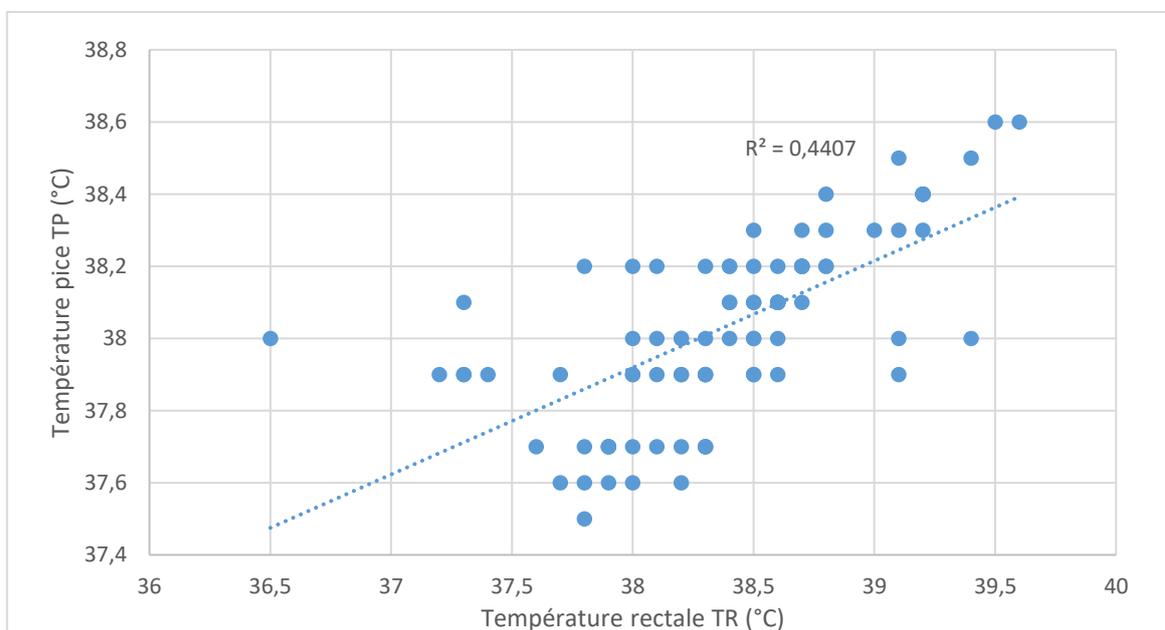


Figure 22 - Graphique de Bland-Altman comparant les valeurs de la température de la puce (TP) et de la température rectale (TR) du cheval A. Les pointillés rouges indiquent les limites d'agrément à 95%.

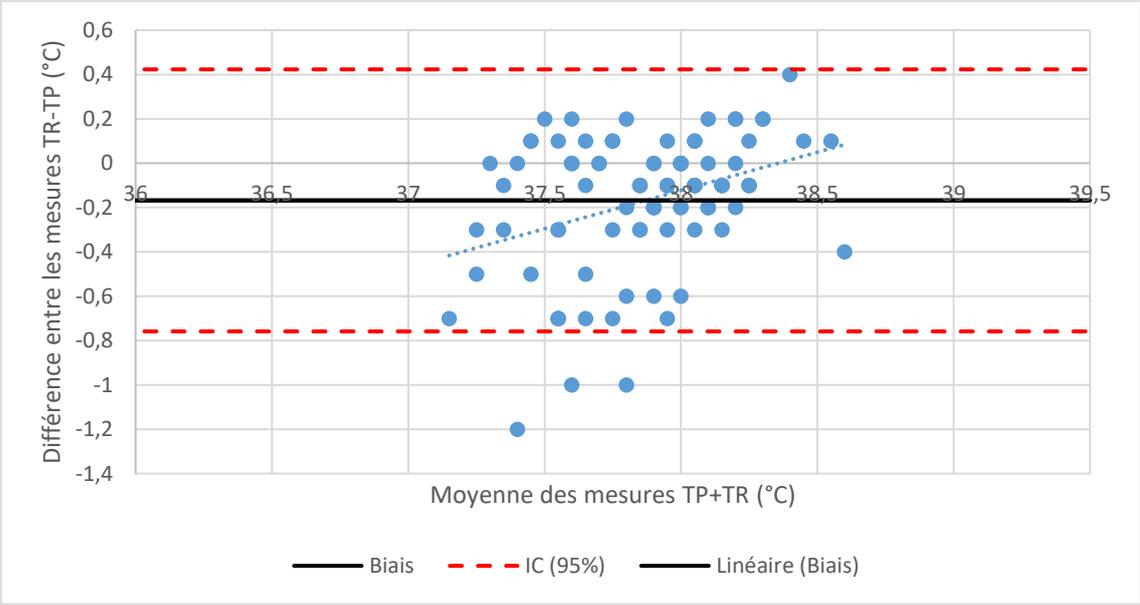


Figure 23 - Graphique de Bland-Altman comparant les valeurs de la température de la puce (TP) et de la température rectale (TR) du cheval BA. Les pointillés rouges indiquent les limites d'agrément à 95%.

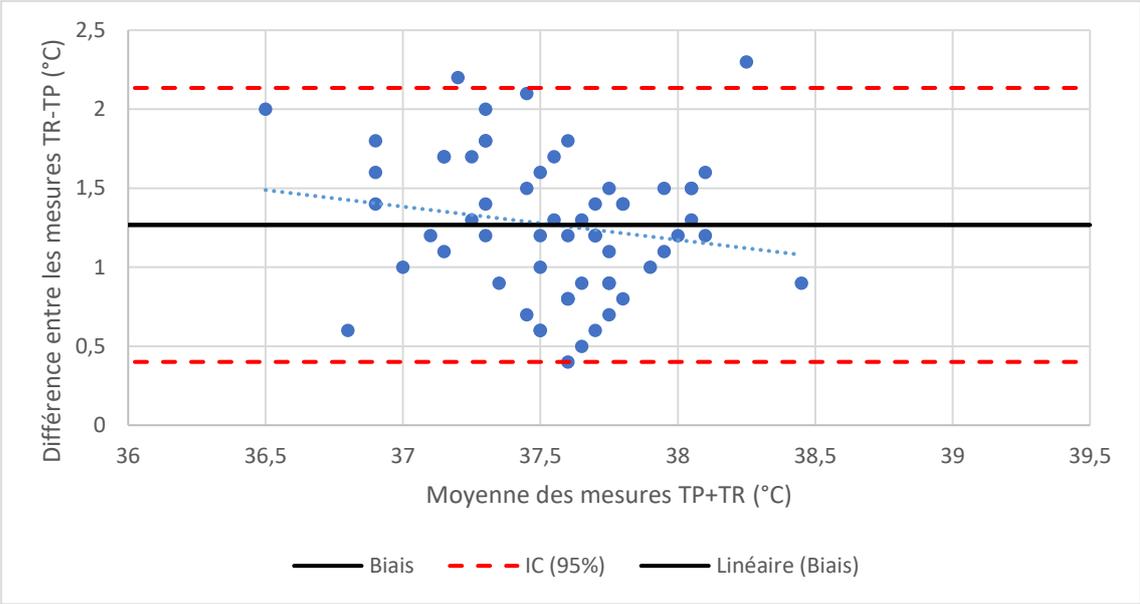
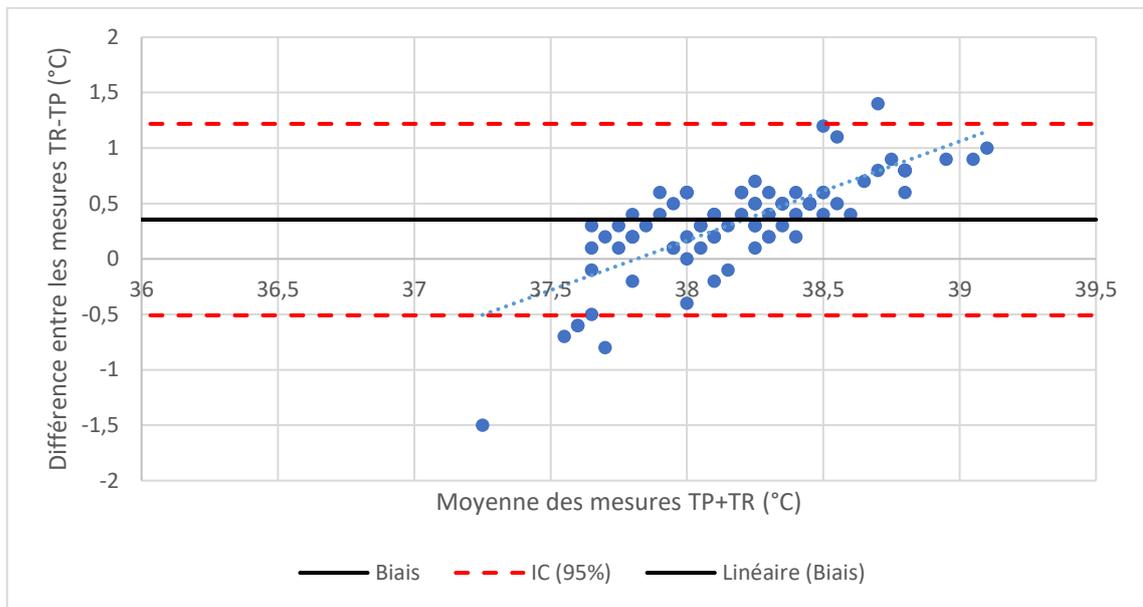


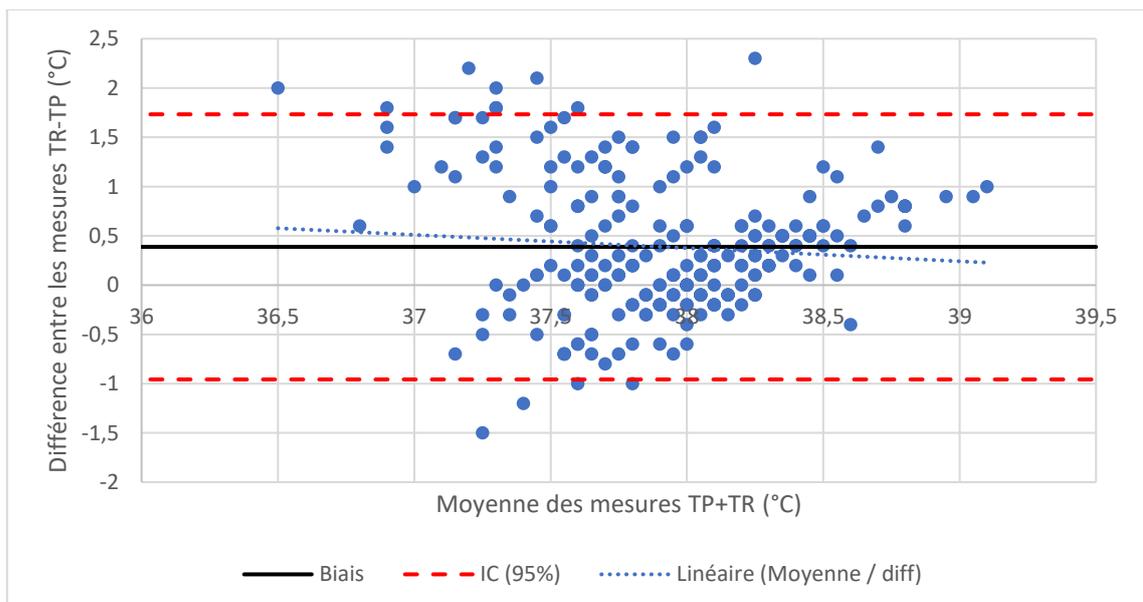
Figure 24 - Graphique de Bland-Altman comparant les valeurs de la température de la puce (TP) et de la température rectale (TR) du cheval BE. Les pointillés rouges indiquent les limites d'agrément à 95%.



- Comparaison des valeurs de températures de la puce et rectale sur l'ensemble des données acquises :

Sur l'ensemble des courses, la moyenne de la température de la puce était de $37,7 \pm 0,6$ °C et celle de la température rectale de $38,1 \pm 0,5$ °C. La température rectale était en moyenne $0,4 \pm 0,7$ °C supérieure à la température de la puce. La figure 25 est un graphique de Bland-Altman permettant d'observer une plus grande dispersion des valeurs pour des températures inférieures à 37,5 °C.

Figure 25 - Graphique de Bland-Altman comparant les valeurs de la température de la puce (TP) et de la température rectale (TR) sur l'ensemble des données acquises. Les pointillés rouges indiquent les limites d'agrément à 95%.

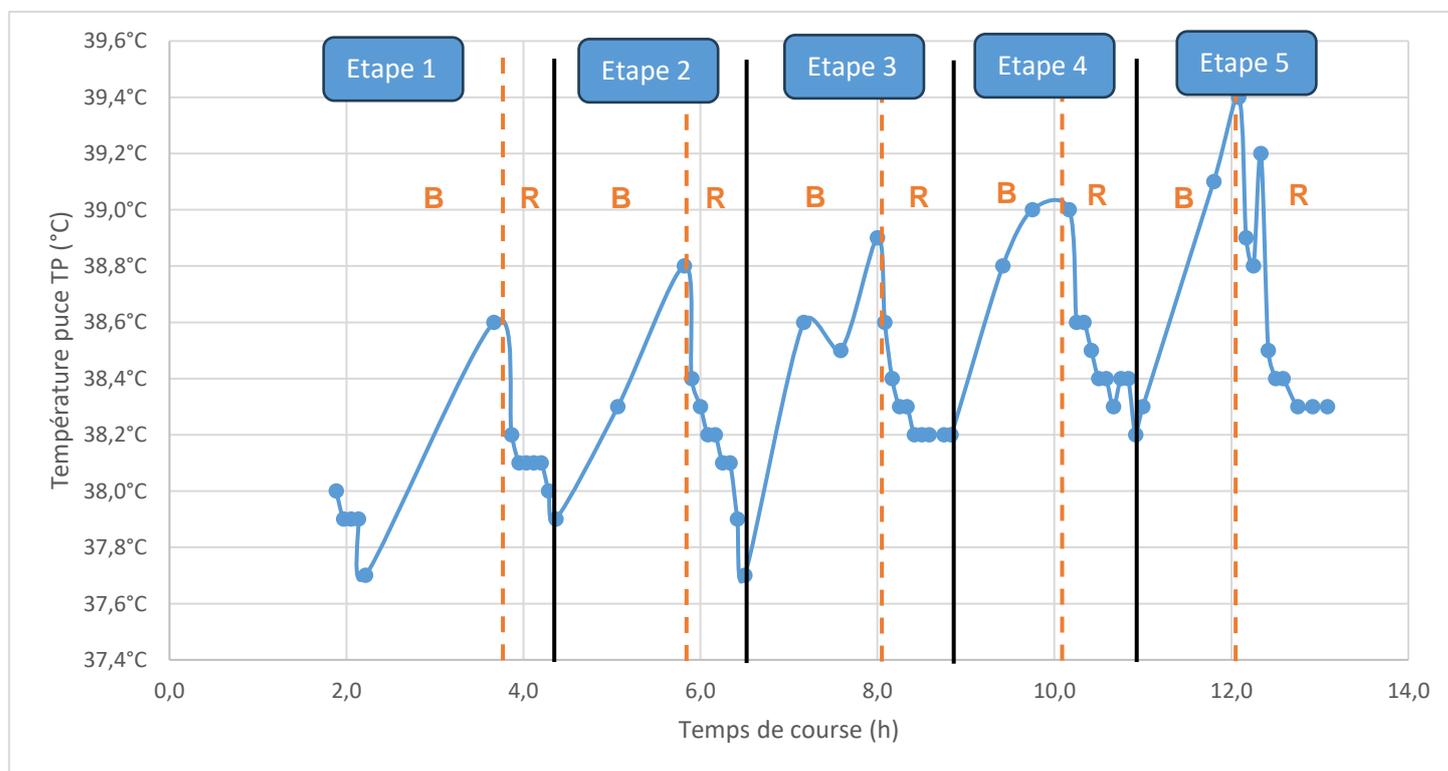


c. Température : évolution de la température de la puce pendant une course d'endurance

La température de la puce évoluait pendant les étapes de course comme le montre la figure 26 sur une course de 160 km du cheval BE. Pendant l'effort, la température augmentait progressivement à chaque point d'assistance où les relevés étaient effectués. Une fois arrivé, la température diminuait assez rapidement avec les méthodes de refroidissement mises en œuvre. Sur les premières boucles, la température maximale obtenue au cours de l'effort était plus faible que sur les dernières boucles. Ainsi, la valeur moyenne de température augmentait au fur et à mesure des boucles et phases de récupération successives. Au cours des étapes 2 à 6, le cheval BE a développé une hyperthermie d'effort avec des valeurs maximales croissantes au fil des boucles. Il a présenté des valeurs allant de 38,6 °C (étape 1) à 39,4 °C (étape 6) en fin de boucle, ce qui correspondait à une moyenne de $38,9 \pm 0,7$ °C, supérieure aux valeurs physiologiques. Cependant, une hyperthermie induite par l'exercice n'était pas systématique sur chaque boucle de course, en particulier sur les premières boucles par temps frais.

La température de la puce augmentait en moyenne à chaque boucle de $1,1 \pm 0,6$ °C par rapport à la valeur basale puis diminuait à raison de $-0,6 \pm 0,3$ °C après 10 minutes de récupération puis de $-0,4 \pm 0,4$ °C entre 10 et 35 minutes de récupération. En moyenne, la température de la puce diminuait de 0,6 °C au cours des phases de récupération.

Figure 26 - Évolution de la température de la puce (°C) en fonction du temps de course (h) (cheval BE, 160 km). B = phase d'effort (boucle) ; R = phase de récupération.



d. Température : influence de l'environnement sur la différence entre la température rectale et la température de la puce

Le tableau 12 présente les moyennes des différences entre les mesures de température rectale et de la puce par cheval et par course. La température extérieure moyenne sur la journée de course est également présente et permet de classer les courses en deux catégories de taille comparable : « froides » et « chaudes », avec une température seuil fixée à 16 °C. Les moyennes de ces deux catégories de courses étaient comparables et il n'existait pas de différence significative après analyse à l'aide d'un test de Student (p -value > 0,05).

En fixant une valeur seuil à 20 °C, la différence était significative (p -value < 0,05) mais cela revenait à comparer un groupe avec huit données et un groupe avec trois données. De plus, le cheval BA, qui présentait un écart élevé entre sa température rectale et sa puce, se retrouvait uniquement dans la première catégorie. En l'excluant et en considérant le seuil à 20 °C, la différence des moyennes des deux catégories était alors non significative. Il faudrait acquérir davantage de données par temps chaud pour que cela soit plus représentatif. Il est difficile de conclure sur l'impact de la température extérieure sur la différence entre la température rectale et la température de la puce au vu des données disponibles pour le moment.

Tableau 12 – Résumés des moyennes de différence entre la température rectale et celle de la puce (TR-TP) et des températures extérieures (Text) obtenues lors des différentes périodes de récupération en courses pour les trois chevaux.

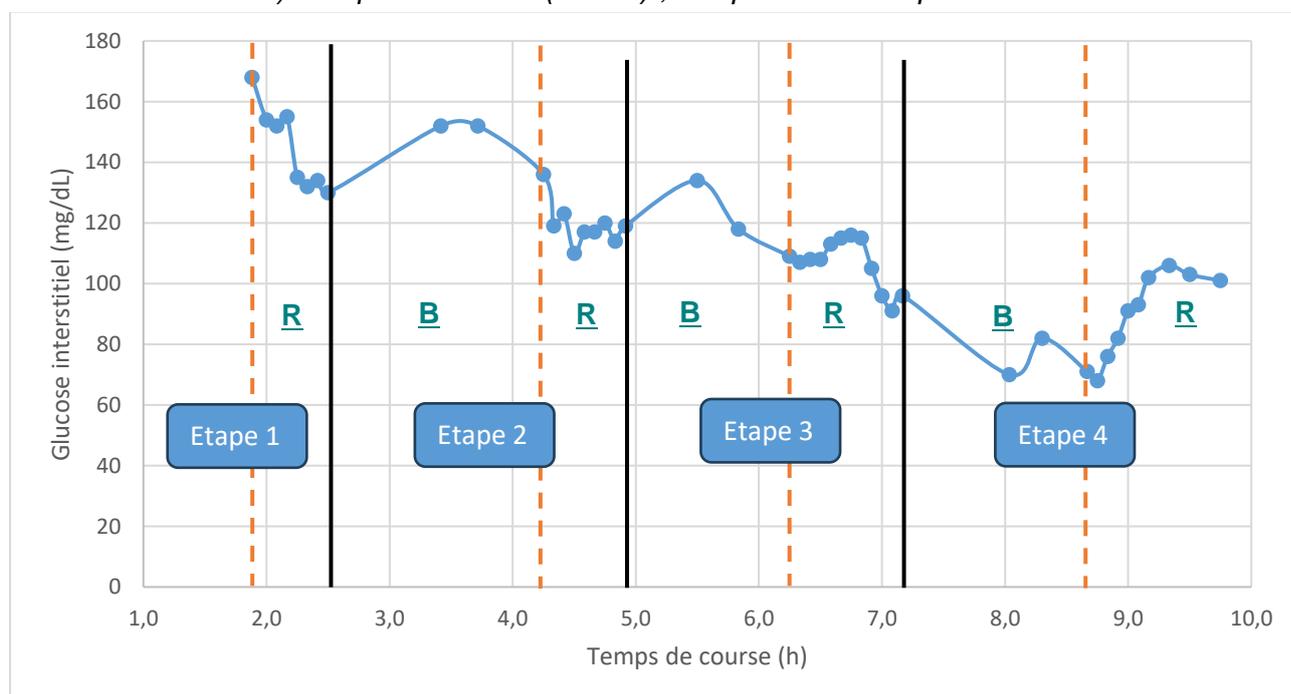
Les cases bleues correspondent aux courses « froides » et les orangées aux courses « chaudes » avec une température seuil de 16°C.

Cheval	Lieu	Distance (km)	Moyenne Diff TR – TP (°C)	Moyenne Text (°C)	Text min (°C)	Text max (°C)
Cheval A	Jullianges (43)	120	0,0	14,1	12	16
SHA	Castelsagrat (82)	100	-0,1	22,1	14	27
	Jullianges (43)	120	-0,1	20,1	14	24
	Florac (48)	160	-0,4	18,3	7	23
Cheval BA	Fontainebleau (77)	100	1,3	17,4	5	21
SHA	Compiègne (60)	120	1,2	14,7	3	18
	Compiègne (60)	120	1,2	17,9	11	23
Cheval BE	Compiègne (60)	120	0,2	14,7	3	18
AR	Castelsagrat (82)	160	0,3	12,4	11	13
	Monpazier (24)	120	0,1	25,0	16	32
	Fontainebleau (77)	160	0,6	15,3	14	16
Moyenne courses « chaudes »			0,4	20,1		
Moyenne courses « froides »			0,5	14,2		
p -value (Test de Student)			0,37			

e. Evolution du glucose interstitiel pendant la course

Le glucose interstitiel a été mesuré sur neuf des onze courses. Les données obtenues étaient de qualité différente avec des aléas techniques sur certaines courses. Néanmoins, un profil glycémique a pu être identifié sur plusieurs courses (figure 27). Le début d'une boucle engendrait un pic de glucose interstitiel, qui décroissait pendant l'effort et remontait progressivement lors des phases de récupération. Néanmoins, la valeur moyenne du glucose interstitiel diminuait au fur et à mesure de la course et pouvait atteindre des valeurs d'hypoglycémie. Par exemple, le cheval BA a débuté le matin en hyperglycémie (> 160 mg/dL) et a terminé sa dernière boucle en hypoglycémie (< 70 mg/dL). Il a retrouvé une valeur physiologique à l'issue de la dernière boucle de course après environ 30 minutes de récupération.

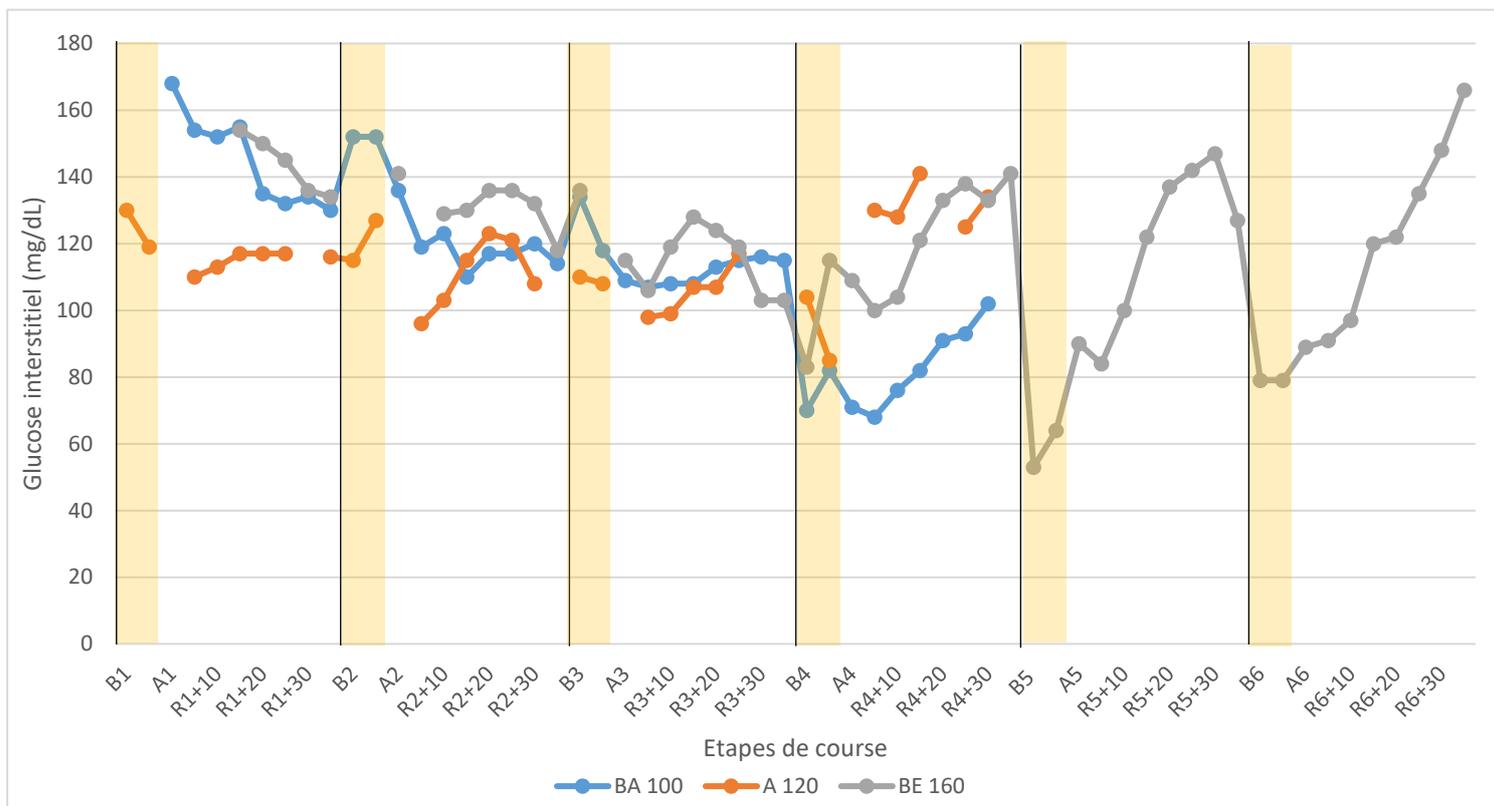
Figure 27 - Evolution du glucose interstitiel (mg/dL) en fonction du temps de course (h) (cheval BA, 100 km). B = phase d'effort (boucle) ; R = phase de récupération.



La figure 28 montre l'évolution du glucose interstitiel chez trois chevaux différents et sur des distances de course différentes. Les courbes suivaient une même tendance avec une décroissance moyenne sur les cent premiers kilomètres puis les variations entre les périodes d'effort et de récupération augmentaient. Sur les courses de 120 et 160 km, sur les boucles au-delà de 100 km, des hypoglycémies (valeur minimale de 53 mg/dL), pendant l'effort, et des hyperglycémies compensatrices marquées (valeur maximale de 175 mg/dL), pendant la récupération, se succédaient.

Figure 28 - Variation du glucose interstitiel (mg/dL) après normalisation en fonction des étapes de course sur des distances de 100, 120 et 160 km respectivement pour les chevaux BA, A et BA.

(Rx+ymin : Récupération de la boucle x + y minutes ; Bx : Boucle x ; Ax : arrivée de la boucle x).



f. Difficultés liées à la mesure du glucose interstitiel pendant une course

Des capteurs de glucose interstitiel de type FreeStyle Libre (Abbott) ont pu être mis en place sur un total de dix courses sur les onze suivies, comme le résume le tableau 13. La version du capteur FreeStyle Libre était principalement la version 2 (8/10 courses). Cependant, sur une compétition, deux chevaux ont été équipés avec la version 1. Il s'avère que les résultats obtenus ne correspondaient pas à ceux obtenus avec la version 2 et n'étaient pas interprétables. Sur une autre course, avec la version 2, une mauvaise pose de capteur a eu pour conséquence l'impossibilité de réaliser les mesures.

De plus, il est arrivé que le système se mette en erreur ne permettant pas de réaliser la mesure au moment voulu. Un temps d'attente de 10 minutes était imposé avant de pouvoir effectuer une nouvelle tentative de mesure, ce qui a pu faire perdre des données importantes notamment sur les phases de course pendant les assistances où il n'était pas possible de répéter le scan. Néanmoins, le nombre de points de mesures sur l'ensemble de la course rendait possible l'interprétation des données et permettait d'observer la tendance générale d'évolution du glucose interstitielle comme vu précédemment.

Tableau 13 – Nombre de courses effectuées avec un capteur de glucose interstitiel et données obtenues.

Version du capteur FreeStyle	Nombre total de courses effectuées	Courses avec des données « complètes »	Courses avec des données « partielles »	Courses sans relevés possibles
FSL1	2	0	2	0
FSL2	8	7	0	1

C. Discussion

La puce Biothermo ND et le capteur FreeStyle ont permis dans l'ensemble un suivi facile et pratique de la température et du glucose interstitiel en condition de course. Les résultats obtenus sont prometteurs, malgré l'effectif restreint. Il semble qu'il y ait une accumulation progressive de chaleur au cours de l'effort ainsi qu'une baisse progressive du glucose interstitiel pendant au moins 100 km ; l'évolution sur la fin de la course paraît plus variable selon les individus et les courses.

Les valeurs mesurées par la puce étaient bien différentes (p -value < 0,05) de celles obtenues à l'aide d'un thermomètre rectal mais restaient néanmoins corrélées de manière significative (p -value < 0,01). Il faut également prendre en compte la méthode de refroidissement des chevaux. Le fait d'arroser abondamment les chevaux à l'eau fraîche, en particulier sur l'encolure, à chaque assistance puis à l'arrivée des boucles, peut être responsable d'une diminution plus rapide de la température de la puce et expliquer la différence observée.

Les puces donnaient en moyenne des valeurs proches de celles de la température rectale (différence de $0,4 \pm 0,7$ °C). Cependant, le cheval BA différait des deux autres par la différence élevée entre ses valeurs de température de puce et rectale ($1,3 \pm 0,4$ °C) malgré une corrélation significative. Il pourrait s'agir d'un défaut de calibration de la puce ou bien d'un mauvais positionnement. Ces hypothèses doivent être vérifiées afin de statuer sur la différence de mesures observée. Une échographie comparative du positionnement de la puce pourrait être effectuée chez les trois chevaux pour voir si une différence est visible. Un suivi quotidien de la température pourrait permettre de voir si la température au repos est toujours différente. Un étalonnage de la puce serait la meilleure solution si celui-ci est réalisable.

Le suivi du glucose interstitiel a livré des informations intéressantes, notamment sur la différence entre les courses de 100 km, 120 km et de 160 km. Les erreurs de scan de la glycémie ne sont pour le moment pas élucidées. Il est possible que la présence d'appareils électroniques à proximité, ou de lignes à haute tension, puissent perturber la réception du signal. L'eau utilisée en quantité sur l'encolure peut également interférer et le capteur tout comme le lecteur peuvent être endommagés. L'utilisation du capteur FreeStyle Libre 1 ND a donné des résultats incohérents (figure 25) par rapport à ceux du FreeStyle Libre 2 ND. Il convient d'utiliser cette dernière version, qui avait été validée en première partie d'étude au cours du test d'effort standardisé. La mise en place du capteur est également une étape délicate et plusieurs capteurs ont été défectueux suite à une mauvaise pose. Une documentation en vue de standardiser son utilisation a été réalisée et publiée dans un journal dédié aux vétérinaires équins.

L'étude de la température et du glucose interstitiel en course doit être poursuivie sur un effectif plus large, avec davantage de chevaux différents, et sur une période de temps plus longue afin de pouvoir confirmer les résultats préliminaires obtenus.

3. Effet de la méthode de refroidissement sur la température corporelle après un test d'effort standardisé

Les études réalisées précédemment ont permis de mettre en évidence la facilité d'utilisation de la puce Biothermo ND pendant l'effort d'endurance. Cependant, il en est ressorti que la température de la puce tendait à différer de la température rectale. L'une des hypothèses serait liée à la méthode de refroidissement utilisée, notamment avec l'emploi d'eau en grande quantité en particulier sur l'encolure où se trouve la puce.

Cette étude avait ainsi pour objectif d'étudier l'influence de différentes méthodes de refroidissement utilisées en course d'endurance sur la mesure de la température affichée par la puce, en comparaison à la méthode de référence qu'est la mesure de température rectale.

A. Matériels et méthodes

a. Animaux

Pour comparer l'effet de quatre méthodes de refroidissement sur la température affichée par la puce, nous avons décidé de recruter quatre chevaux et de les soumettre alternativement à chacune des méthodes après un test d'effort standardisé. Nous avons vu lors la première étude qu'il était difficile d'imposer des conditions d'effort standard chez les chevaux d'endurance. Par ailleurs, ce genre de test ne peut pas être répété trop souvent : pour préserver la santé des chevaux, il est nécessaire d'attendre entre 10 et 15 jours minimum entre deux gros efforts. Pour permettre une meilleure répétabilité et effectuer des tests rapprochés, nous avons décidé d'effectuer cette étude avec des trotteurs français. La piste de trot offrait des conditions plus reproductibles qu'un terrain varié d'endurance. Le postulat était que les effets obtenus seraient comparables chez des chevaux d'endurance.

Quatre chevaux trotteurs français âgés de 3 ans, qualifiés et ayant déjà couru, ont ainsi été équipés avec une puce Biothermo ND dans l'encolure à droite. Ils ont été soumis à un test d'effort standardisé, au trot attelé, dix jours avant la première expérimentation pour déterminer leurs vitesses de référence pour une lactatémie de 2 mmol (V2) et de 4 mmol (V4) et une fréquence cardiaque de 200 battements par minutes (V200). Les fréquences cardiaques correspondant à une lactatémie de 2 mmol (FC2) et de 4 mmol (FC4) ont également été déterminées.

b. Protocole expérimental

Au mois août 2022, les quatre chevaux ont effectué quatre séances d'entraînement identiques à deux jours d'intervalle, comprenant chacune 10 minutes d'échauffement à 15-18 km/h, puis deux paliers à V2 et V4, soit aux vitesses correspondant aux paliers de lactatémie de 2 et 4 mmol/L, suivis de 10 minutes de récupération au trot.

A leur retour à l'écurie, ils ont été soumis à un des quatre protocoles de refroidissement pendant une durée de 8 minutes :

1. Refroidissement manuel à l'aide d'eau froide (21 - 22 °C) versé au broc sur l'avant main ;
2. Douche sur l'ensemble du corps à l'eau froide (même température que la méthode 1) ;

3. Refroidissement manuel à l'aide d'eau glacée (5 - 6 °C) versée au broc sur l'avant main ;
4. Repos à l'ombre sans autre méthode de refroidissement.

Les chevaux se sont vus appliquer les quatre protocoles testés comme le montre le tableau 14.

Tableau 14 – Répartition des différents protocoles de refroidissement reçu selon le jour de test et le cheval.

Cheval	Jour 1	Jour 3	Jour 5	Jour 6
A	(1) Eau froide	(4) Rien	(3) Eau glacée	(2) Douche
B	(1) Eau froide	(2) Douche	(4) Rien	(3) Eau glacée
C	(3) Eau glacée	(2) Douche	(1) Eau froide	(4) Rien
D	(4) Rien	(3) Eau glacée	(2) Douche	(1) Eau froide

Les chevaux étaient équipés du système Waook ND permettant de suivre en direct et d'enregistrer en continu leur vitesse à l'effort et leur fréquence cardiaque pendant l'effort et lors de la phase de récupération.

La température de la puce a été prise à l'aide d'un lecteur pendant la préparation du cheval, à chaque étape du test d'effort, toutes les minutes pendant le refroidissement, puis toutes les deux minutes jusqu'à la 30^{ème} minute de récupération.

La température rectale a été mesurée pendant la préparation du cheval puis pendant la récupération toutes les deux minutes pendant les 20 premières minutes puis toutes les cinq minutes jusqu'à la 30^{ème} minute.

Les données d'effort (fréquence cardiaque, lactatémie, vitesse) et les temps pour que la température de la puce et la température rectale redescendent à 38,5 °C et la fréquence cardiaque à 64 battements par minute ont été comparés par analyse de variance. Les températures de la puce et rectale ont été comparées par régression linéaire et méthode de Bland et Altman avec calcul du coefficient de Pearson.

B. Résultats

a. Conditions expérimentales

Les conditions environnementales étaient chaudes, avec une température extérieure moyenne de 33 ± 5 °C, et sèches, avec une hygrométrie moyenne de 25 ± 6 %.

Il n'y avait pas de différence significative (p -value >0,05) entre les quatre séances pour les données d'effort (fréquence cardiaque, lactatémie, vitesse). Les tests étaient donc comparables dans leur intensité et dans l'effort demandé aux chevaux.

Le tableau 15 compare les données de conditions expérimentales et d'effort récoltées sur les quatre séances selon les différents protocoles.

Tableau 15 – Conditions environnementales et données d'effort moyennes selon les différents protocoles réalisés. Moyennes sur les quatre chevaux et les quatre sessions de tests.

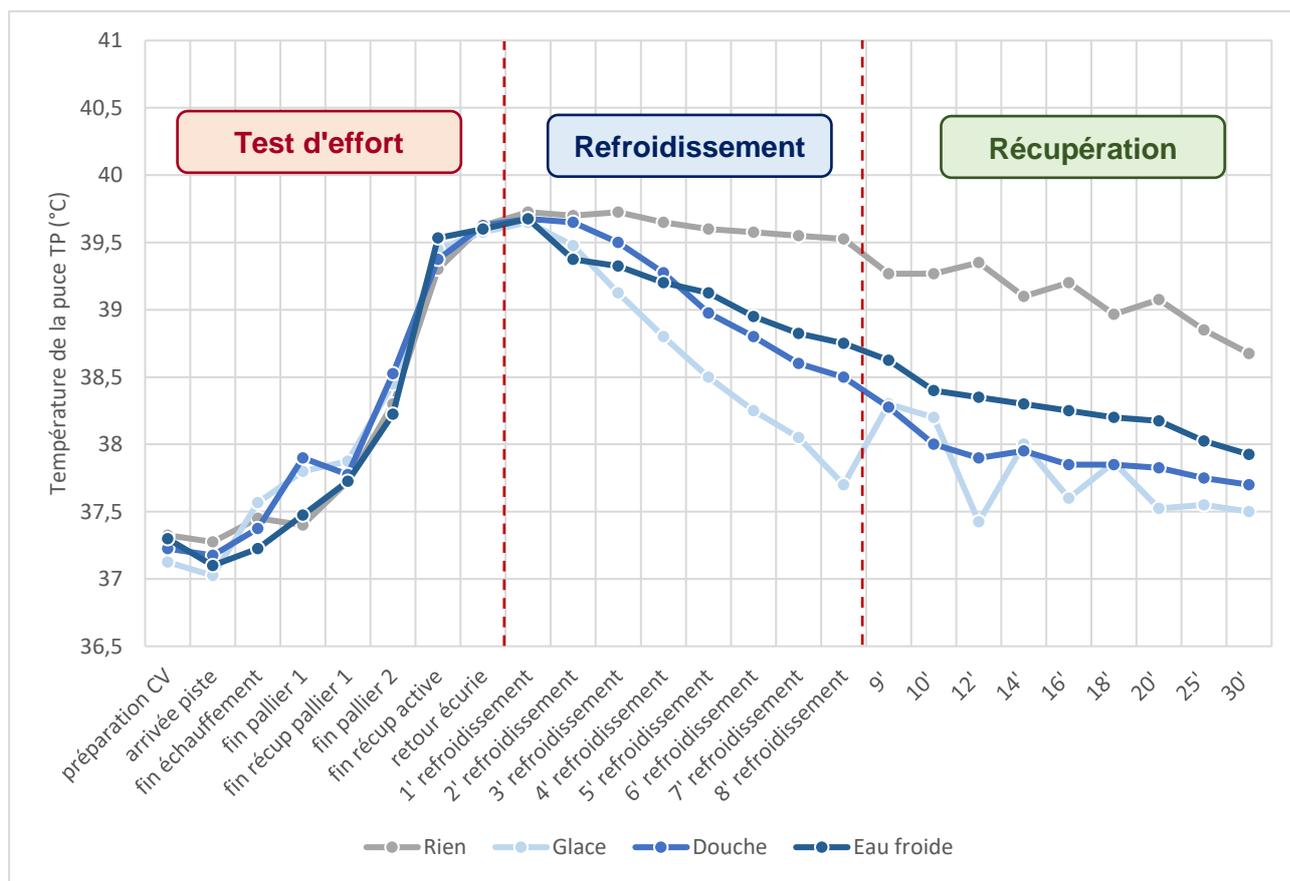
Protocole	Rien	Eau glacée	Douche	Eau froide
Température extérieure moyenne (°C)	33,2	33,5	33,5	29,8
Hygrométrie moyenne (%)	25,5	24,2	24,3	26,6
Vitesse moyenne (km/h)	25,8	25,8	25,9	24,5
Fréquence cardiaque moyenne (bpm)	85,3	85,5	82,7	84,7

b. Evolution de la température de la puce au cours de l'effort et selon la méthode de refroidissement

La puce Biothermo ND a permis de suivre l'évolution de la température corporelle au cours de l'effort puis pendant les phases de refroidissement et de récupération. Cette évolution est matérialisée par la courbe présentée dans la figure 29.

Après une augmentation progressive de la température de la puce au cours de l'échauffement jusqu'à la fin du palier 1, les chevaux ont présenté une nette hyperthermie à l'effort après la réalisation du palier 2, réalisé à V4, et lors du retour à l'écurie avec une température maximale moyenne de $39,7 \pm 0,7$ °C à ce moment. La température de la puce diminua ensuite de manière plus ou moins rapide au cours de la période de refroidissement puis continua sa décroissance au cours de la période de récupération.

Figure 29 - Évolution de la température de la puce (°C) au cours de l'effort et de la récupération selon la méthode de refroidissement. Valeurs moyennes sur les quatre chevaux.



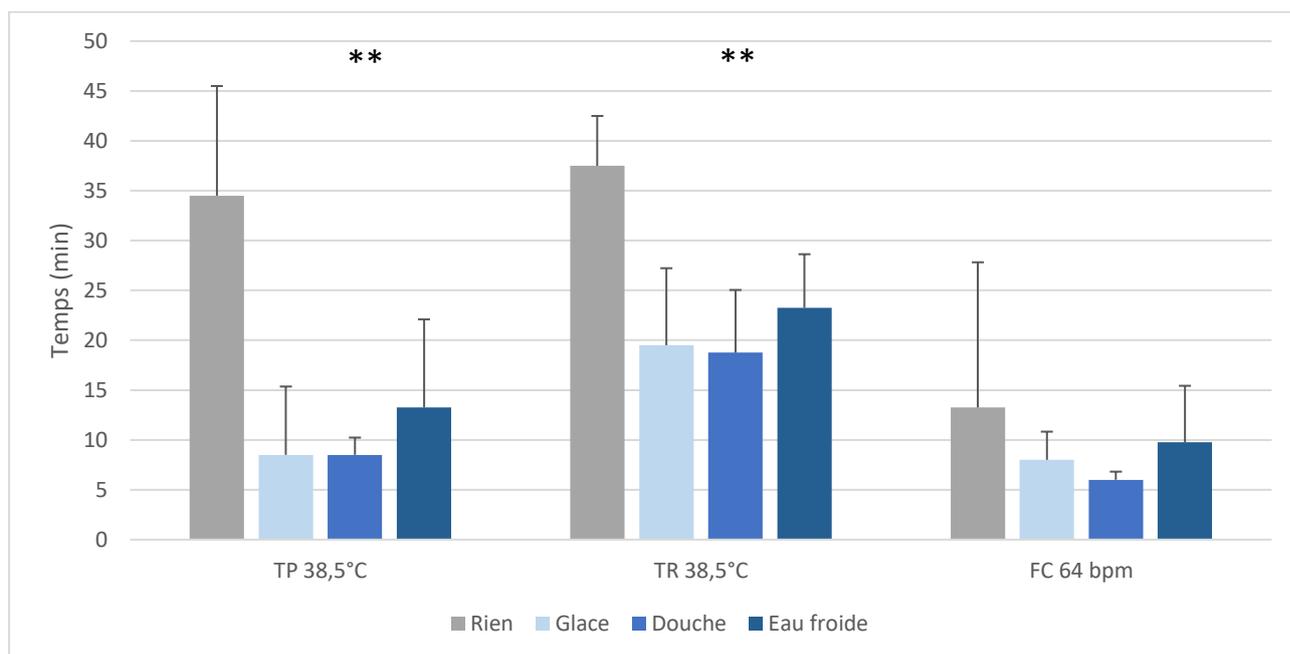
c. Effet de la méthode de refroidissement sur la récupération

Les trois méthodes de refroidissement utilisant de l'eau ont permis une diminution plus rapide (p -value < 0,001) des températures de la puce et rectale que le repos seul, comme le montre la figure 30. Pour que la température redescende à une valeur de 38,5°C, il a fallu 10 ± 6 minutes (température de la puce) et 21 ± 6 minutes (température rectale) avec les méthodes utilisant de l'eau, et respectivement 35 ± 11 minutes et 38 ± 5 minutes pour le repos seul. De plus, la température de la puce diminuait de manière significativement plus rapide avec de l'eau glacée qu'avec de l'eau froide sur l'encolure.

Au niveau de la consommation en eau, le refroidissement manuel à l'aide d'un broc d'eau froide sur l'encolure pendant 8 minutes a consommé environ 100 litres d'eau soit 37,5 % de moins que la douche (environ 160 litres).

Pour la récupération cardiaque, il n'y avait pas de différence significative entre les quatre protocoles. On retrouvait néanmoins une tendance similaire avec une récupération plus rapide avec la douche, l'eau glacée, l'eau froide puis le repos seul.

Figure 30 - Temps nécessaires pour un retour des températures de la puce (TP) et rectale (TR) à 38,5°C et de la fréquence cardiaque (FC) à 64 bpm en fonction du mode de refroidissement. Valeurs moyennes et écart types sur les 4 chevaux.

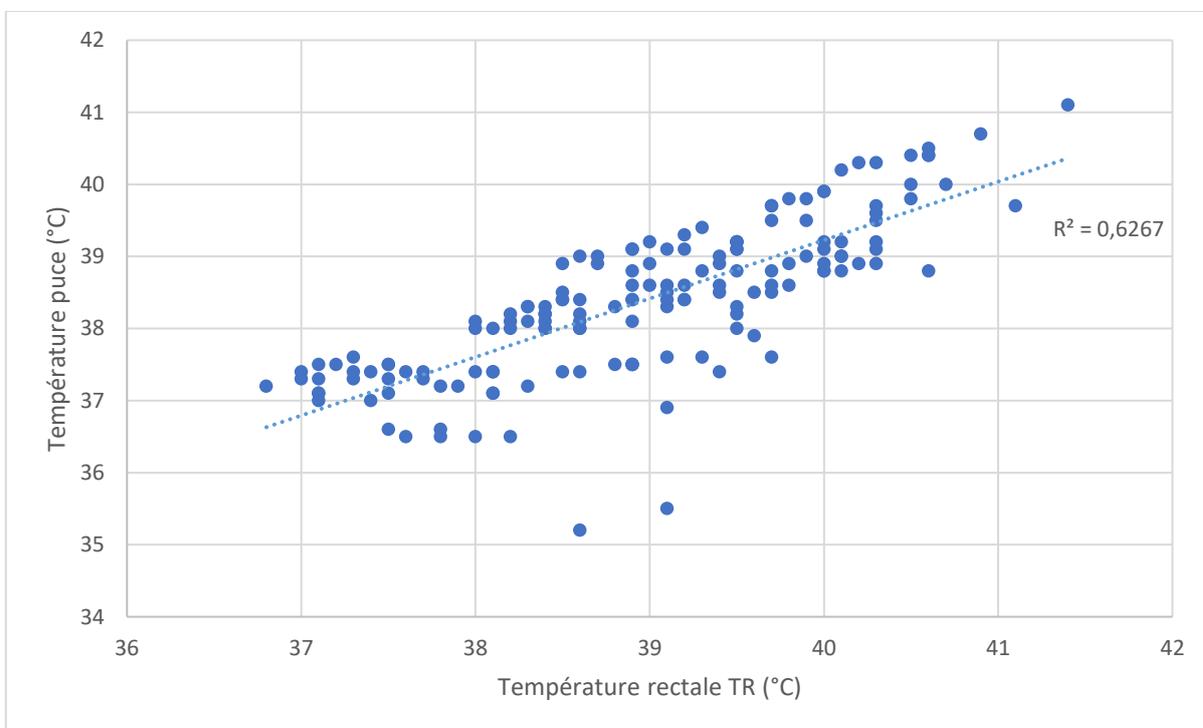


d. Comparaison des valeurs des températures de la puce et rectale

Les valeurs des températures de la puce et rectale ont pu être comparées au repos avant l'effort puis après l'effort lors des phases de refroidissement et de récupération. La figure 31 présente la régression linéaire de la température de la puce en fonction de la température rectale avec les données obtenues pendant les différentes journées de test. Le coefficient de détermination (R^2) était de 0,63.

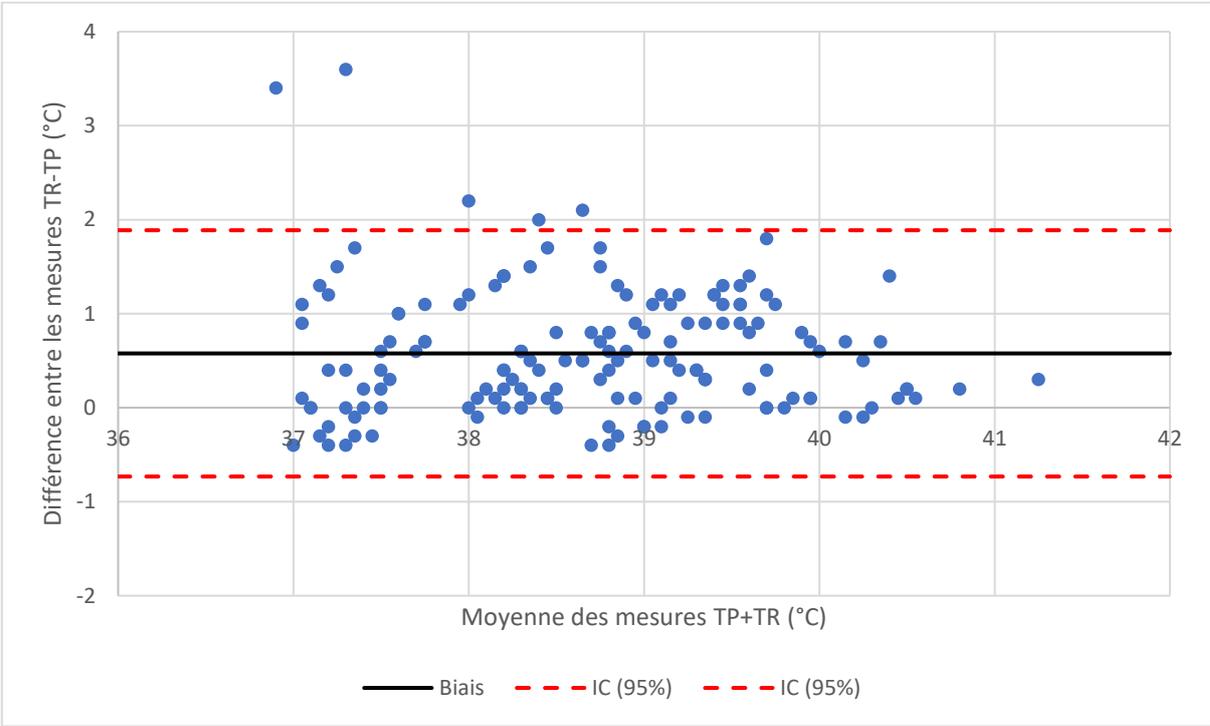
Au repos avant l'effort, il n'y avait pas de différence significative entre les valeurs des températures de la puce et rectale. A l'effort et pendant la récupération, la température de la puce était inférieure à la température rectale avec une différence moyenne de $-0,6 \pm 0,7$ °C (p -value < 0,05). Sur l'ensemble des données acquises, les valeurs des températures de la puce et rectale étaient corrélées avec un coefficient de Pearson de 0,79 (p -value < 0,001).

Figure 31 - Évolution de la température de la puce (TP) en fonction de la température rectale (TR). La droite représente la courbe de tendance et R^2 le coefficient de détermination.



La figure 32 présente la dispersion graphique de la différence entre la température rectale et la température de la puce sur un diagramme de Bland et Altman. L'intervalle de confiance à 95% comprend les valeurs entre -0,7°C et 1,9°C. Plus la température est faible, plus l'écart, et donc la dispersion, entre la mesure de la puce et la mesure rectale est grand.

Figure 32 - Graphique de Bland-Altman comparant les valeurs de la température rectale (TR) et de la température de la puce (TP). Les pointillés rouges indiquent les limites d'agrément à 95%.



C. Discussion

Cette étude a permis de valider une nouvelle fois l'utilisation de la puce Biothermo ND en conditions d'effort. La prise de mesure s'est avérée pratique et peu risquée pour l'opérateur à la différence de la prise de température rectale dangereuse avec des chevaux excités et attelés sur la piste.

Les valeurs seuil de température et de fréquence cardiaque ont été retenues par rapport à leur intérêt clinique. Le seuil de 38,5 °C correspond à la valeur en dessous de laquelle le cheval est considéré comme ayant une température corporelle physiologique. La valeur de 64 battements par minute correspond à la valeur utilisée lors des passages au contrôle vétérinaire en compétition d'endurance et témoignant d'une bonne récupération de l'effort.

Les données des températures de la puce et rectale montraient une bonne corrélation malgré une différence persistante avec une valeur moyenne de la puce inférieure à la rectale. Ces résultats s'inscrivent dans la continuité de ceux obtenus dans les deux études précédentes. La température de la puce semble donc être un moyen fiable et rapide pour se renseigner sur l'état d'hyperthermie éventuel d'un cheval.

L'étude des différentes méthodes de refroidissement a révélé que la température de la puce pouvait être influencée par la méthode utilisée. En effet, en mouillant uniquement l'encolure avec de l'eau glacée, la température de la puce diminuait plus vite qu'avec l'application d'eau froide sur l'encolure. En revanche, l'utilisation de la douche sur tout le corps répartit davantage l'eau donc la différence entre les valeurs des températures de la puce et rectale semblait moins marquée mais la diminution de la température rectale était potentiellement plus rapide. Globalement, aucune méthode de refroidissement utilisant de l'eau ne s'est distinguée des autres par son efficacité au cours de l'étude réalisée. Il peut être souligné que le repos seul ne permet pas une bonne récupération après un effort intense et qu'il apparaît nécessaire de refroidir le cheval.

Au niveau de la consommation d'eau, l'utilisation du broc était plus économe que la douche en continu. L'utilisation d'eau glacée serait plus efficace que l'eau froide courante. Cela implique toutefois de maintenir la température de l'eau à 5 – 6 °C et une utilisation de glace, donc d'eau, ou d'électricité supplémentaire. D'un point de vue écologique, l'application manuelle d'eau froide à l'aide d'un broc apparaît comme la meilleure solution. Actuellement, les cavaliers et leurs assistances utilisent de grandes quantités d'eau à l'aide de seaux. Cette méthode, au-delà d'être couteuse en eau, n'a pas réellement d'effet sur la rapidité de récupération cardiaque. De plus, la gestion de l'eau est devenue un enjeu majeur et les sports équestres ne sont pas épargnés, surtout en période de sécheresse. Ainsi, les cavaliers pourraient utiliser moins d'eau en favorisant le temps de récupération plus que la baisse de température corporelle. Le refroidissement pourrait intervenir dans un second temps, après le contrôle vétérinaire, lors du retour au stand de repos par exemple. L'utilisation des brocs pourraient être imposée par les organisateurs de manière systématique, ce qui réduirait la quantité d'eau utilisée par rapport aux seaux. Une quantification de l'eau par cheval serait plus juste pour sanctionner les utilisations abusives mais difficile à mettre en œuvre.

Cette étude a été réalisée sur des trotteurs, et avec un faible effectif, lors de tests d'effort standardisés. Il est donc difficile d'extrapoler les résultats à d'autres races et d'autres disciplines ou à ce qui se passe en condition de course. L'utilisation de la puce de température offre la possibilité de poursuivre les recherches de manière plus aisée sur le terrain que la température rectale. D'autres études couplant l'utilisation d'eau et d'autres méthodes de refroidissement, comme des

ventilateurs par exemple, pourraient se révéler plus économes en eau et avec une efficacité comparable sur la récupération des chevaux.

4. Discussion Générale

A. Originalité de l'étude

La réalisation de cette expérimentation en trois actes constitue une avancée dans l'étude de l'utilisation de la puce à technologie Biothermo ND. Jusqu'à présent son utilisation était principalement destinée à des suivis au repos (Scicluna, C., 2018) ou en condition d'effort standardisé, sur tapis roulant notamment (Kang *et al.*, 2020). Il s'agit donc là d'une première concernant son utilisation au cours de compétitions officielles et d'effort de longue durée. Sa facilité d'utilisation permettant l'obtention d'une mesure rapide, malgré des chevaux pouvant être agités pendant les courses, fut appréciable.

Le suivi du glucose à l'effort est également une nouveauté. Cette étude a tout d'abord permis de montrer la difficulté d'utilisation du capteur FreeStyle Libre 2 chez le cheval en condition d'effort. La rigueur et la standardisation de la pose du capteur permettent d'obtenir régulièrement des valeurs pertinentes. Cette expérience a été publiée dans une revue à destination des vétérinaires équins (Robert 2023). Les résultats obtenus par le biais de cette étude exploratoire sur quelques sujets et quelques courses sont encourageants et démontrent l'intérêt de poursuivre cette étude sur un effectif plus large.

Le passage de tests d'effort standardisés à de vraies conditions de compétition a été l'occasion de se rendre compte des aléas pouvant survenir en utilisant ces objets connectés. Les erreurs système furent plus ou moins nombreuses lors des scans du capteur de glucose. Bien que celles-ci soient inexplicables la plupart du temps, plusieurs hypothèses peuvent être avancées avec la présence d'interférences électromagnétiques, d'eau sur le capteur ou le lecteur, un scan trop rapide ou trop loin du capteur. De plus, une mauvaise pose peut engendrer des mesures aberrantes ou une non-utilisation du capteur sur la course. De plus, la version utilisée a son importance. Les données récoltées avec la version 1 du capteur FreeStyle Libre ND se sont révélées incohérentes par rapport aux données obtenues avec la version 2, qui apparaissent bien plus fiables et répétables d'une course à l'autre.

Ainsi, l'étude de l'évolution du glucose interstitiel et de la température corporelle à l'aide de la puce Biothermo ND lors de courses d'endurance se distingue par son caractère novateur et sa contribution significative à la compréhension de la physiologie équine dans des conditions d'effort. Le suivi de ces paramètres fournit des informations précieuses sur le métabolisme énergétique et la thermorégulation des chevaux sur une journée de compétition. L'utilisation de la technologie avec ces capteurs permet d'accéder à des données qui étaient autrefois difficiles à obtenir. Cela ouvre donc de nouvelles perspectives pour comprendre l'impact de l'effort sur la condition physique des chevaux. A terme, cela peut permettre d'améliorer la performance de manière responsable en proposant un suivi médico-sportif personnalisé les chevaux d'endurance.

B. Principaux résultats

a. Validation du protocole sur le terrain

L'objectif des trois manipulations était de tester la fiabilité d'objets connectés en vue d'améliorer le suivi médico-sportif du cheval athlète et en particulier du cheval d'endurance de haut niveau.

La puce Biothermo ND, le capteur de glucose flash FreeStyle Libre 2 ND et le système Waook ND ont été les principaux outils étudiés. Leur utilisation s'est déroulée de manière relativement simple sur les différents protocoles, malgré des contraintes liées au réseau pour la récupération des données en direct par Waook ND ou bien à la pose du capteur pour le FreeStyle Libre ND.

b. Validation de l'utilisation de la puce Biothermo ND à l'effort et limites

L'utilisation de la puce Biothermo ND au cours des études a montré qu'il était facile d'effectuer un suivi de la température chez le cheval à l'effort, en particulier lorsque le thermomètre rectal n'est pas utilisable.

Les résultats obtenus montrent que la température affichée par la puce est en moyenne inférieure à la température rectale. Si les deux méthodes donnent des résultats différents, elles sont néanmoins bien corrélées entre elles.

L'une des limites qui ressort de cette étude exploratoire est la variabilité individuelle. En effet, l'un des individus de l'étude 2 présentait une différence moyenne de $1,3 \pm 0,4$ °C malgré une bonne corrélation. Une telle différence n'est pas négligeable et peut conduire à sous-estimer une hyperthermie chez des chevaux dont le suivi de température se ferait uniquement via l'utilisation d'une puce. Il convient de noter que, même au sein du même muscle, l'implant n'est pas situé exactement au même emplacement et à la même profondeur d'un cheval à l'autre. Or, d'après plusieurs études chez l'Homme (Kenny *et al.*, 2006 ; Faulkner *et al.*, 2013), il existe des gradients de température au sein du muscle, au repos comme à l'effort, et généralement la température la plus élevée est située dans la partie la plus profonde du muscle. De plus, plusieurs parties d'un même muscle peuvent être sollicitées de manière différente pendant l'exercice. Localement, la vascularisation et les débits sanguins varient, ce qui affecte également la température. D'après l'étude de Kang *et al.*, (2020), il y avait une meilleure corrélation avec la température corporelle lorsque la puce était placée dans le muscle pectoral par rapport à d'autres localisations testées, à savoir le muscle splénius, ligament nuchal, et muscle glutéal. Sur le long terme, le vieillissement pourrait également affecter la distribution du flux sanguin et provoquer une redistribution profonde du flux sanguin musculaire au sein et entre les groupes musculaires (Musch *et al.*, 2004).

Si l'existence d'une variation individuelle est une réalité, la technologie des puces nécessite de devoir vérifier systématiquement la corrélation entre la température de la puce et la température rectale sur chaque cheval nouvellement implanté. Un suivi dans le temps est également préconisé avec des vérifications régulières du différentiel entre la température de la puce et la température rectale. De plus, la durée de vie de la puce et sa fiabilité dans le temps sur la vie d'un équidé restent encore à définir.

c. Validation du capteur de glucose interstitiel et limites

L'utilisation de capteur FreeStyle Libre ND au cours des études a permis d'établir de premières courbes d'évolution du glucose interstitiel à l'effort.

Lors de l'étude 1, les valeurs de glucose interstitiel avaient pu être comparées avec celles obtenues par un lecteur de glycémie. Cela a permis d'établir qu'il existait des différences entre les deux techniques et que la corrélation n'était pas constante. Toutefois, l'existence d'un décalage temporel entre la glycémie et le glucose interstitiel a pu être démontrée (Cunneen *et al.*, 2020), avec un décalage de 60 minutes au repos, de 10 minutes en cas d'hypoglycémie induite et de 20 minutes en cas d'hyperglycémie induite. Pour autant, nos résultats tendaient à montrer des valeurs proches au repos puis qui différaient nettement pendant l'effort avant de retrouver des valeurs comparables au cours de la récupération. Il faut cependant noter que, d'après Rebrin *et al.*, 2010, il n'y a aucune preuve que le délai réel du glucose interstitiel soit plus long que 5 à 10 minutes, et que les valeurs supérieures à cette période peuvent s'expliquer par des retards inhérents au fonctionnement et aux algorithmes d'étalonnage des systèmes de mesure du glucose en continue (CGM). De plus, les capteurs tendraient à surestimer les valeurs en cas d'hypoglycémie. Les brevets industriels restreignent l'accès aux algorithmes et donc aux données brutes des capteurs, qui pourraient être intéressantes à exploiter.

Dans la littérature, comme le rappelle Freckmann *et al.*, 2019, il n'est pas facile de comparer l'exactitude des systèmes de mesure de la glycémie sur sang total (BGM) et des systèmes de mesure continue du glucose interstitiel, systèmes que nous avons utilisés et comparés brièvement dans notre première partie d'étude. Bien que ces deux types de systèmes mesurent le glucose à l'aide de réactifs à base d'enzymes similaires dans la bandelette ou le capteur CGM, les échantillons proviennent de compartiments différents (sang versus liquide interstitiel) et chacun est exposé à des concentrations de glucose différentes qui nécessitent des compensations algorithmiques spécifiques et/ou des étalonnages en temps réel pour améliorer la précision. De plus, les métriques utilisées pour décrire la précision ont évolué différemment entre les deux types de systèmes, ce qui rend plus difficiles les comparaisons.

L'étude 2 a livré des résultats prometteurs avec la possibilité de réellement suivre le glucose interstitiel tout au long de la course, aussi bien pendant les phases d'effort que pendant les phases de récupération. L'hyperglycémie pré-effort observée pourrait se produire en réponse au stress physique ou émotionnel et à l'anticipation du cheval. Cette réponse est principalement médiée par le système neuro-hormonal, en particulier par l'activation du système nerveux sympathique. Avant un effort, que ce soit en raison de l'excitation, de l'anxiété, de l'anticipation de l'exercice ou d'autres facteurs de stress, le corps réagit en libérant une hormone de stress, l'adrénaline, et un neurotransmetteur, la noradrénaline. L'adrénaline stimule alors la libération de glucose dans le sang par le foie en convertissant le glycogène hépatique en glucose au cours de la glycogénolyse. Cela augmente la glycémie en préparation de l'effort imminent. Parallèlement, le cortisol agit également pour augmenter la glycémie en favorisant la dégradation des protéines, convertissant ainsi certains de ces composés en glucose par le biais de la néoglucogenèse. L'augmentation de distribution du glucose aux tissus qui résulte de cette réponse au stress est une adaptation physiologique naturelle pour fournir au corps l'énergie nécessaire à l'effort physique imminent. Une glycémie accrue permet de répondre aux besoins énergétiques élevés pendant l'exercice. Au cours de l'effort, le glucose est utilisé par les muscles pour produire de l'énergie. Si l'exercice est intense et prolongé, la glycémie peut diminuer en raison de l'utilisation continue du glucose, ce que l'on tend à observer sur la durée

de la course. L'augmentation initiale de la glycémie pourrait aider à maintenir un niveau adéquat de glucose dans le sang pendant un certain temps. Les récupérations entre les boucles permettraient ensuite de compenser les pertes avec une prise alimentaire mais il en résulterait tout de même un déficit qui pourrait conduire à un état d'hypoglycémie avancée en fin de course.

Dans notre étude, les phases d'hypoglycémie induite par l'effort, en particulier dans les dernières boucles de courses, semblent avoir été en partie compensées avec les repas à la fin de boucle. Cela est également cohérent avec les observations cliniques et le ressenti des cavaliers vis-à-vis de leur monture. Le besoin de faire « souffler » son cheval au cours de l'effort est bien connu des cavaliers de fond, en endurance comme en concours complet. L'existence d'un second souffle pourrait trouver son origine dans la compensation relative d'une hypoglycémie ayant conduit à diminuer la vitesse. Une étude chez l'Homme a néanmoins montré que même en hypoglycémie, il était possible de poursuivre l'effort et d'atteindre l'épuisement à des temps comparables par rapport à d'autres individus ayant maintenu une euglycémie (Felig *et al.*, 1982). Chez l'Homme, une étude similaire a été menée par Sengoku *et al.*, (2014). Il s'agissait de suivre l'évolution du glucose interstitiel chez deux coureurs d'ultra-marathons lors d'une course de 100 km. Le marathonien présentant la meilleure condition physique, et ayant terminé le plus rapidement, a maintenu un taux de glucose proche de la valeur physiologique pendant toute la course. En revanche le second coureur, moins performant, a connu un pic d'hypoglycémie important à partir du kilomètre 80 et jusqu'à la fin de la course. Il serait intéressant de voir si un phénomène comparable peut être observé sur les chevaux d'endurance.

Depuis quelques années, la métabolomique, c'est-à-dire l'étude des métabolites, comme les sucres, les acides aminés ou encore les acides gras, a permis d'avancer dans la compréhension de l'effort et sa régulation chez les chevaux. Si le mécanisme d'oxydation des lipides est connu pour intervenir au cours de l'effort d'endurance, l'étude de Le Moyec *et al.*, (2019), a permis d'observer une consommation plus importante de lipides avec un taux d'acétate plus élevé sur les courses d'endurance de 120 et 160 km versus 90 km. Cela est également associé au fait que le glucose semble moins contribuer aux efforts de longues distances, l'hypoglycémie observée étant plus faible sur les courses de 160 km que sur les autres. Les chevaux auraient aussi davantage recours à la glycogénolyse hépatique et musculaire, et des réserves plus importantes du fait de leur entraînement. D'autres voies semblent également prendre le relais sur les longues distances et l'utilisation des acides gras en fait partie. Il y aurait ainsi un passage du métabolisme glucidique au métabolisme lipidique durant la course et plus particulièrement vers 80 à 100 km. Cela expliquerait les différences au niveau de l'implication du glucose entre les courses de moins de 100 km et les plus longues. Les données acquises en courses ne permettent pas encore de confirmer cette hypothèse et de nombreux paramètres sont à prendre en compte, notamment les conditions de courses (vitesse, distance...) et environnementales (température, humidité...).

Les capteurs de glucose en continu constituent donc un réel moyen d'étudier le métabolisme des chevaux à l'effort, en particulier au cours d'effort de longue durée comme en endurance. La poursuite de cette étude permettra de vérifier si les premières hypothèses émises se confirment avec un nombre plus élevé de chevaux et sur des distances variées.

C. Limites de l'étude

a. Effectifs

L'une des limites principales de notre étude a été le faible nombre d'individus dans nos échantillons. Cela s'explique notamment par le retard d'un an de la commercialisation de la puce Biothermo ND. Les chevaux d'endurance ont ainsi été équipés avec la version expérimentale mais le nombre de ces puces était limité, et *de facto* le nombre de chevaux pouvant être inclus également. De plus, cela impliquait l'obtention de l'accord des propriétaires des chevaux et des autorisations administratives des différentes institutions en charge. Les Trotteurs de l'étude 3 ont pu, quant à eux, être équipés de la puce sous sa version commercialisée.

La partie expérimentale sur les courses d'endurance impliquait des chevaux de haut niveau et comme tout athlète ceux-ci ne sont pas exempts du risque de blessure ou d'arrêt. De plus, une saison pour un cheval de ce niveau ne compte que quelques compétitions. Ces éléments limitent le nombre de courses à suivre sur la saison.

De plus, notre échantillon des études 1 et 2 était composé de chevaux d'endurance d'âge et de niveau comparable, constituant ainsi une population relativement homogène. Pour l'étude 3, il s'agissait comme expliqué précédemment de trotteurs français du même âge et entraînés dans la même écurie. Ceux-ci représentaient donc également une population homogène. Ces deux populations restreintes permettaient néanmoins de comparer plus facilement les résultats obtenus entre les individus avec un faible effectif, ce qui est plutôt adapté pour une étude exploratoire.

Une population plus hétérogène impliquerait d'avoir un nombre plus élevé de chevaux mais permettrait d'avoir une analyse plus fine pour prendre en compte d'avantage de paramètres comme la variabilité liée à l'âge, au sexe, au niveau d'entraînement et de performance ...

Ainsi, les résultats obtenus ne sont certes pas extrapolables à toute la population équine du fait de la faible taille de l'effectif et de données encore incomplètes. En revanche, il est intéressant de souligner une certaine homogénéité des mesures sur des chevaux ayant des caractéristiques similaires. Ces études exploratoires pourront servir de comparaison ou de postulat de départ pour des études plus grande envergure.

b. Nombre de courses suivies

Au-delà du nombre restreint de chevaux, l'étude 2 impliquait le suivi sur des courses de niveau international. Or, les chevaux ne peuvent participer qu'à un nombre limité d'épreuves par année, un temps de repos minimal étant défini par la FEI entre deux épreuves. De ce fait, cela a eu une incidence directe sur le nombre de courses ayant pu être suivies.

Un autre facteur à prendre en compte est le fait que le suivi d'un cheval nécessite une personne exclusivement dédiée à cette tâche. Dans certaines circonstances (chevaux courant la course ensemble ; récupération au même stand de repos), il est possible de suivre deux chevaux en même temps pour un seul opérateur. Le facteur matériel n'est pas négligeable puisque chaque capteur de glucose nécessite un lecteur spécifique, ce qui implique de disposer d'un nombre suffisant de lecteurs par rapport au nombre de chevaux suivis.

Les facteurs temps et mobilité de l'opérateur sont aussi à considérer. Le suivi d'un seul cheval implique une journée de mesures et le déplacement pendant l'épreuve pour suivre le cheval sur chaque assistance.

c. Conditions climatiques

Les conditions climatiques ont été relativement clémentes pour les études 1 et 2. Pour l'étude 2, sur les onze courses, les températures extérieures minimales allaient de 3 à 16 °C et maximales de 16 à 32 °C, pour une moyenne de 17,4 °C. La distinction entre les courses avec des températures inférieures à 16°C et celles supérieures n'a pas mis en évidence de différence significative dans les mesures de températures de la puce et rectale. Quant à l'étude 3, celle-ci s'est déroulée en plein été avec une température moyenne de 33 ± 5 °C.

L'usage des capteurs, en particulier de la puce, serait intéressant dans des conditions climatiques plus variées afin d'en étudier davantage l'impact sur les mesures de la température de la puce. En effet, plusieurs études ont montré que les conditions environnementales influençaient la température corporelle et le ressenti de l'effort. Les études de Geor *et al.*, 1995 ; Harris *et al.*, 1995 ; Marlin *et al.*, 1996, ont montré qu'un temps chaud et humide était plus éprouvant pour les chevaux à l'effort d'un point de vue métabolique, avec une accumulation de chaleur plus importante et une dissipation de la chaleur plus lente durant la récupération, qu'un temps froid ou chaud et sec. En effet, lorsque l'exercice est prolongé par temps chaud et humide, la dissipation de la chaleur peut être limitée et le transfert de chaleur peut même s'inverser, c'est-à-dire que l'animal ne va pas dissiper de chaleur vers l'environnement mais va au contraire gagner de la chaleur par l'environnement. Le cheval conserve néanmoins sa capacité à perdre de la chaleur par transpiration malgré l'humidité ambiante (McCutcheon et Geor, 2014). Cependant, le risque est que la transpiration dépasse l'évaporation de sueur, ce qui peut contribuer à atteindre un état d'hyperthermie critique lorsque la chaleur accumulée devient trop élevée. En effet, lorsque la température centrale, la température hypothalamique et la température musculaire atteignent respectivement 42,5 °C, 41,5 °C et 45 °C, les chevaux peuvent présenter des signes cliniques d'hyperthermie (Guthrie et Lund, 1998).

L'étude 2 n'a pas pris en compte le degré d'hygrométrie. Celui-ci aurait pu être suivi pendant les courses afin de compléter les données environnementales et d'identifier les courses chaudes et humides, conditions plus difficiles à supporter pour les chevaux. De même, la pluie ou vent sont également des paramètres pouvant affecter la température ressentie et donc la température corporelle.

D. Perspectives d'évolution

a. Poursuite de l'étude

Nos études faisaient partie d'un projet sur plusieurs années ; elles ont permis d'affiner le protocole expérimental de suivi des chevaux en course d'endurance et d'obtenir des données préliminaires.

Ces premiers résultats doivent bien sûr être précisés sur un effectif plus large. Un recrutement dans plusieurs écuries permettrait de diversifier davantage les profils de chevaux. Le suivi d'un pool de chevaux plus nombreux sur leur saison de compétition devrait permettre d'établir des données de référence tenant compte des facteurs de variation inter et intra individu.

Il faudrait par ailleurs analyser les courbes de température et de glycémie au regard des performances en course. Cela pourrait éventuellement permettre de mettre en évidence des différences selon la difficulté de la course ou lors de contre-performance et donc à terme de répondre à l'objectif général du projet, à savoir l'identification de nouveaux marqueurs de l'état de forme du cheval en compétition.

Un plus grand nombre de chevaux nécessitera davantage d'opérateurs pour effectuer les relevés. Cette étude a permis de codifier les procédures de pose des capteurs et de recueil des données, qui pourront être mises à disposition des opérateurs.

b. Étude des différentes méthodes de refroidissement en compétitions

Notre étude de méthodes de refroidissement s'est déroulée à l'entraînement, chez des trotteurs, au cours d'un effort relativement court et intense par des conditions climatiques chaudes et sèches. Le postulat était que les chevaux d'endurance avaient la même réponse au refroidissement que les trotteurs.

L'objectif était de pouvoir étudier l'influence de différentes méthodes de refroidissement utilisées en course d'endurance sur la mesure de la température affichée par la puce, en comparaison à la méthode de référence qu'est la mesure de température rectale. Cette étude ouvre également la voie à une utilisation de la puce afin de comparer l'efficacité de différentes méthodes de refroidissement sur les courses directement, notamment des méthodes plus économes en eau.

Pouvoir réaliser une étude sur les méthodes de refroidissement au cours d'une compétition pourrait permettre d'identifier les méthodes économes en eau et adaptées à l'effort demandé. D'autres méthodes pourraient être ajoutées en plus de celles que nous avons étudiées. Par exemple, Takahashi *et al.*, (2020), ont étudié cinq méthodes de refroidissement en conditions chaudes et humides, incluant la simple marche, l'usage de ventilateurs, de douche en continu avec de l'eau tempérée et de l'application intermittente d'eau froide avec utilisation ou non d'un couteau de chaleur. Les différentes méthodes existantes pourraient être combinées lorsque cela est possible avec l'usage de ventilateurs ou de brumisateurs. Si l'existence des *fast line* permet de maintenir les chevaux en marche, et de faire descendre la fréquence cardiaque tout en les arrosant, son intérêt pour la régulation de l'hyperthermie n'est pas avéré. Des *cool zones* constituées de brumisateurs et d'accès à des douches pourraient être testées lorsque les conditions climatiques sont particulièrement éprouvantes, notamment lorsque les températures sont élevées.

c. Étude des différents facteurs impactant la glycémie en course

L'étude du glucose interstitiel en course en est encore à ses débuts. Néanmoins, plusieurs facteurs sont à prendre en compte pour poursuivre ces investigations. En effet, les chevaux sont nourris lors des pauses entre chaque boucle de la course. La nature et la quantité d'aliments distribués varie selon les entraîneurs et les chevaux. Il faudrait quantifier précisément ces apports pour chaque cheval et préciser leur impact sur l'évolution du glucose interstitiel pendant l'épreuve.

Comme le rappellent Richardson et Murray, 2016, bien que le taux de glucose sanguin au repos puisse être plus bas avec un régime riche en fibres par rapport à un repas contenant beaucoup d'amidon, les taux de glucose sanguin pendant et immédiatement après l'exercice sont équivalents, et aucun effet néfaste sur la performance n'a été observé lors des tests à l'effort. Le taux d'utilisation du glycogène n'est pas non plus affecté de manière négative par des régimes contenant du foin ou de la pulpe de betterave sucrière. En fait, la pulpe de betterave sucrière pourrait favoriser l'économie des réserves de glycogène en raison de la production accrue de propionate et de ses propriétés favorisant la néoglucogenèse. Les stratégies optimales pour faciliter une reconstitution efficace du glycogène pendant l'effort sont encore en cours d'étude mais un repas contenant de l'amidon pourrait être nécessaire si les périodes entre les efforts sont courtes, comme c'est le cas lors des courses d'endurance. De plus, des aliments riches en protéines, tels que la luzerne, peuvent avoir un effet positif sur la synthèse du glucose.

Treiber *et al.*, 2010, ont étudié le métabolisme glucidique chez des chevaux Arabes en injectant un bolus de glucose au repos puis à l'effort sur tapis roulant. Cette étude a permis une modélisation de la cinétique du glucose dans un modèle à deux compartiments, montrant comment la cinétique du glucose est régulée à la hausse pendant l'exercice pour répondre à une demande accrue en énergie.

Des études récentes, suggèrent l'existence d'un lien entre la performance en endurance, la composition du microbiote intestinal et la régulation génétique des mitochondries. L'étude de Mach *et al.*, (2022), a mis en évidence le rôle central du microbiote intestinal dans la physiologie de l'hôte, l'amélioration de la santé métabolique et des performances sportives, notamment une meilleure récupération cardiaque. Par exemple, une surreprésentation de bactéries de la famille des *Lachnospiraceae* dans le microbiote intestinal serait associée à des chevaux moins athlétiques, du fait d'une moindre expressivité de certains gènes (CAZymes), qui conduirait à une production réduite d'ATP par la voie aérobie et à une altération des capacités cardiovasculaires. A l'inverse, les chevaux ayant un microbiote plus diversifié avec des espèces rares semblaient disposer de capacités métaboliques supérieures. Il serait intéressant d'étudier en parallèle le régime alimentaire, la composition du microbiote et l'évolution de la glycémie en course.

Conclusion

L'endurance équestre est une discipline s'étant fortement développée au cours des dernières décennies. Elle demande la réalisation d'un effort modéré mais sur la durée. Cet effort nécessite une adaptation de l'appareil locomoteur et du métabolisme des chevaux pour pouvoir le tolérer. Le métabolisme est principalement aérobie et implique les capacités de thermorégulation mais aussi une gestion des réserves et des voies énergétiques. Le suivi de la santé des chevaux en compétition est réalisé lors de contrôles vétérinaires à la fin de chaque boucle parcourue. Cependant, ce suivi étant ponctuel et non exhaustif, le développement d'objets connectés pourrait permettre de renforcer ce suivi médico-sportif et d'assurer une prise d'information rapide.

La puce d'identification à technologie Biothermo ND est une solution innovante permettant d'obtenir la température corporelle du cheval par simple scan de l'encolure. Lors des courses, elle permet un suivi aisé de la température chez le cheval à l'effort, lorsque le thermomètre rectal n'est pas utilisable. Les résultats obtenus au cours des différentes expérimentations menées ont montré que la température affichée par la puce tendait à être inférieure mais néanmoins corrélée à la température rectale. L'utilisation de cette puce à l'effort en est encore à ses débuts mais son usage s'avère facile sur le terrain. Elle ouvre de nombreuses perspectives, comme par exemple l'étude de l'hyperthermie induite par l'effort ou des méthodes alternatives de refroidissement pour limiter l'utilisation massive d'eau.

Concernant l'étude du glucose interstitiel à l'aide du capteur FreeStyle Libre ND, les premiers résultats obtenus sont intéressants et iraient dans le sens d'une hypoglycémie marquée après 80 à 100 km de course. Ces données constituent une première exploration des variations du glucose interstitiel à l'effort chez le cheval d'endurance et doivent être confirmées par davantage de relevés en course. Cela amène également à une réflexion sur l'alimentation et le mode de distribution de la ration aussi bien pendant la course qu'en période d'entraînement.

Les trois études réalisées pour ce travail ont répondu à leur condition d'étude exploratoire et les résultats obtenus pourront être exploités pour poursuivre l'acquisition de données à plus grande échelle. Elles ont également permis de mettre au point différents protocoles, comme la pose du capteur puis le suivi en course du glucose interstitiel.

Les objets connectés, tels que ceux utilisés dans cette étude, ont démontré leur capacité à suivre la condition physique du cheval athlète au cours de l'effort en permettant de suivre de manière instantanée plusieurs paramètres comme sa vitesse, sa fréquence cardiaque mais aussi sa température corporelle ou sa glycémie par simple scan. Toutefois, le suivi à l'aide d'objets connectés est relativement lourd et implique le bon fonctionnement des différents appareils, un bon réseau pour le suivi en direct, une ou plusieurs personnes dédiées... Ces éléments font que l'utilisation concomitante de divers objets connectés n'est pas toujours aisée, et qu'opter pour un nombre plus restreint de technologies peut permettre de mieux cibler les paramètres que l'on souhaite explorer en fonction de l'étude. L'utilisation de la puce de température et du capteur de glucose interstitiel a ainsi permis un suivi plus complet de l'effort en course et ouvert des perspectives pour une gestion plus maîtrisée des méthodes de refroidissement et de l'alimentation pendant l'effort.

Liste des références bibliographiques

- ABERER, F., HAJNSEK, M., RUMPLER, M., *et al.* (2017) Evaluation of subcutaneous glucose monitoring systems under routine environmental conditions in patients with type 1 diabetes. *Diabetes, Obesity & Metabolism* vol. 19, n° 7, p. 1051-1055. [https://doi.org/10.1111/dom.12907]
- ALBERDA, E.J. (2018) Evaluation of a single body IMU at the girth to monitoring horizontal and vertical parameters in warmblood horses at trot – a pilot study. Thèse de doctorat vétérinaire. Faculté de Médecine Vétérinaire d'Utrecht.
- AUCLAIR-RONZAUD, J., BENOIST, S., DUBOIS, C., *et al.* (2020a) 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]
- AUCLAIR-RONZAUD, J., JOUSSET, T., DUBOIS, C., *et al.* (2020b) No-contact microchip measurements of body temperature and behavioural changes prior to foaling. *Theriogenology* vol. 157, p. 399-406. [https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2020.08.004]
- BARREY, E. (1993) Simulation des dépenses énergétiques chez le cheval en compétition. *Science & Sports, Comptes rendus de la deuxième conférence du consensus organisé par la Société française de médecine du sport* vol. 8, n° 2, p. 109-115. [https://doi.org/10.1016/S0765-1597(05)80056-5]
- BECKER, K., LEWCZUK, D. (2022) Variability of Jump Biomechanics Between Horses of Different Age and Experience Using Commercial Inertial Measurement Unit Technology. *Journal of Equine Veterinary Science* vol. 119, p. 104146. [https://doi.org/10.1016/j.jevs.2022.104146]
- BENNET, E.D., PARKIN, T.D.H. (2018) Fédération Equestre Internationale endurance events: Risk factors for failure to qualify outcomes at the level of the horse, ride and rider (2010–2015). *The Veterinary Journal* vol. 236, p. 44-48. [https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2018.04.011]
- BLOOM, F., DRAPER, S., BENNET, E., *et al.* (2023) Risk factors for lameness elimination in British endurance riding. *Equine Veterinary Journal* vol. 55, n° 4, p. 632-641. [https://doi.org/10.1111/evj.13875]
- BOLLINGER, L., BARTEL, A., WEBER, C., *et al.* (2023) Pre-Ride Biomarkers and Endurance Horse Welfare: Analyzing the Impact of the Elimination of Superoxide Dismutase, δ -Aminolevulinic-Dehydratase, Thiobarbituric Acid Reactive Substances, Iron, and Serum Amyloid A Levels in Elite 160 km Endurance Rides. *Animals* vol. 13, n° 10, p. 1670. [https://doi.org/10.3390/ani13101670]
- BROWNLOW, M., DART, A., JEFFCOTT, L. (2016) Exertional heat illness: a review of the syndrome affecting racing Thoroughbreds in hot and humid climates. *Australian Veterinary Journal* vol. 94, n° 7, p. 240-247. [https://doi.org/10.1111/avj.12454]
- CASELLA, E., KHAMESI, A.R., SILVESTRI, S. (2020) A framework for the recognition of horse gaits through wearable devices. *Pervasive and Mobile Computing* vol. 67, p. 101213. [https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2020.101213]
- CHEN, P.H., WHITE, C.E. (2006) Comparison of Rectal, Microchip Transponder, and Infrared Thermometry Techniques for Obtaining Body Temperature in the Laboratory Rabbit (*Oryctolagus cuniculus*). *Journal of the American Association for Laboratory Animal Science* vol. 45, n° 1, p. 57-63.
- CUNNEEN, A., WOOD, K.A., MATHISON, K., *et al.* (2020) Comparison of a continuous indwelling glucometer with a point-of-care device in healthy adult horses. *The Veterinary Record* vol. 187, n° 3, p. e21. [https://doi.org/10.1136/vr.105607]
- DAVÍÐSSON, H.B., REES, T., ÓLAFSDÓTTIR, M.R., *et al.* (2023) Efficient Development of Gait Classification Models for Five-Gaited Horses Based on Mobile Phone Sensors. *Animals* vol. 13, n° 1, p. 183. [https://doi.org/10.3390/ani13010183]
- DEITING, V., MISCHKE, R. (2021) Use of the « FreeStyle Libre » glucose monitoring system in diabetic cats. *Research in Veterinary Science* vol. 135, p. 253-259. [https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2020.09.015]

- DEL BALDO, F., FRACASSI, F., PIRES, J., *et al.* (2021) Accuracy of a flash glucose monitoring system in cats and determination of the time lag between blood glucose and interstitial glucose concentrations. *Journal of Veterinary Internal Medicine* vol. 35, n° 3, p. 1279-1287. [https://doi.org/10.1111/jvim.16122]
- DI BATTISTA, C., CONTE, M., PEPE, M., *et al.* (2019) Epidemiology and risk factors for eliminations from Fédération Equestre Internationale endurance rides between 2004-2015 in Italy. *Preventive Veterinary Medicine* vol. 170, p. 104737. [https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2019.104737]
- EQUISENSE (2023) La locomotion. In *Equisense.com*. [https://equisense.com/pages/la-locomotion] (consulté le 26/07/2023).
- ESSÉN-GUSTAVSSON, B., JENSEN-WAERN, M. (2002) Effect of an endurance race on muscle amino acids, pro- and macroglycogen and triglycerides. *Equine Veterinary Journal. Supplement* n° 34, p. 209-213. [https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.2002.tb05420.x]
- FAULKNER, S.H., FERGUSON, R.A., GERRETT, N., *et al.* (2013) Reducing muscle temperature drop after warm-up improves sprint cycling performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise* vol. 45, n° 2, p. 359-365. [https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31826fba7f]
- FÉDÉRATION ÉQUESTRE INTERNATIONALE (2023a) FEI endurance events. In *FEI.Org*. [https://www.fei.org/endurance/events] (consulté le 30/06/2023).
- FÉDÉRATION ÉQUESTRE INTERNATIONALE (2023b) FEI endurance rules. In *FEI.org*. [https://inside.fei.org/fei/disc/endurance/rules] (consulté le 30/06/2023).
- FÉDÉRATION FRANÇAISE D'ÉQUITATION (2023) Recherche Concours. In *FFEcompet*. [https://ffecompet.ffe.com] (consulté le 30/06/2023).
- FÉDÉRATION FRANÇAISE D'ÉQUITATION (2022) Endurance. In *FFE.com*. [https://www.ffe.com/pratiquer/disciplines/endurance] (consulté le 30/06/2023).
- FELIG, P., CHERIF, A., MINAGAWA, A., *et al.* (1982) Hypoglycemia during Prolonged Exercise in Normal Men. *New England Journal of Medicine* vol. 306, n° 15, p. 895-900. [https://doi.org/10.1056/NEJM198204153061503]
- FIELDING, C.L., MEIER, C.A., FELLERS, G.K., *et al.* (2017) Ability of clinicopathologic variables and clinical examination findings to predict race elimination in endurance horses. *American Journal of Veterinary Research* vol. 78, n° 1, p. 50-56. [https://doi.org/10.2460/ajvr.78.1.50]
- FLAMINIO, M.J.B.F., GAUGHAN, E.M., GILLESPIE, J.R. (1996) Exercise Intolerance in Endurance Horses. *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice, Exercise Intolerance* vol. 12, n° 3, p. 565-580. [https://doi.org/10.1016/S0749-0739(17)30273-0]
- FOREMAN, J.H. (1998) The exhausted horse syndrome. *The Veterinary Clinics of North America. Equine Practice* vol. 14, n° 1, p. 205-219. [https://doi.org/10.1016/s0749-0739(17)30220-1]
- FRECKMANN, G., PLEUS, S., GRADY, M., *et al.* (2019) Measures of Accuracy for Continuous Glucose Monitoring and Blood Glucose Monitoring Devices. *Journal of Diabetes Science and Technology* vol. 13, n° 3, p. 575-583. [https://doi.org/10.1177/1932296818812062]
- GEOR, R.J., MCCUTCHEON, L.J., ECKER, G.L., *et al.* (1995) Thermal and cardiorespiratory responses of horses to submaximal exercise under hot and humid conditions. *Equine Veterinary Journal. Supplement* n° 20, p. 125-132. [https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.1995.tb05018.x]
- GUTHRIE, A.J., LUND, R.J. (1998) Thermoregulation: Base Mechanisms and Hyperthermia. *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice, Fluids and Electrolytes in Athletic Horses* vol. 14, n° 1, p. 45-59. [https://doi.org/10.1016/S0749-0739(17)30211-0]
- HALAMA, A., OLIVEIRA, J.M., FILHO, S.A., *et al.* (2021) Metabolic Predictors of Equine Performance in Endurance Racing. *Metabolites* vol. 11, n° 2, p. 82. [https://doi.org/10.3390/metabo11020082]
- HARRIS, P.A., MARLIN, D.J., MILLS, P.C., *et al.* (1995) Clinical observations made in nonheat acclimated horses performing treadmill exercise in cool (20 degrees C/40%RH), hot, dry (30 degrees C/40%RH) or hot, humid (30 degrees C/80%RH) conditions. *Equine Veterinary Journal. Supplement* n° 20, p. 78-84.
- HENRIKSSON, J. (1991) Effect of exercise on amino acid concentrations in skeletal muscle and plasma. *The Journal of Experimental Biology* vol. 160, p. 149-165. [https://doi.org/10.1242/jeb.160.1.149]

- HODGSON, D.R., MCCUTCHEON, L.J., BYRD, S.K., *et al.* (1993) Dissipation of metabolic heat in the horse during exercise. *Journal of Applied Physiology* vol. 74, n° 3, p. 1161-1170. [https://doi.org/10.1152/jappl.1993.74.3.1161]
- HOLLENBACH, E., ROBERT, M.P., LE ROUX, C., *et al.* (2022) Prevalence of radiographic changes in forelimb digits and metacarpophalangeal joints of South African endurance racehorses. *Journal of the South African Veterinary Association* vol. 93, n° 2, p. 156-167. [https://doi.org/10.36303/JSAVA.490]
- HOLOPHERNE-DORAN, D., HODGSON, D., ROSE, R., *et al.* (1999) Investigation of the accuracy of a new heart rate meter for use in exercising horses. *Présenté à WEVA World 6th Congress, Paris, 30 septembre - 3 octobre 1999.*
- ILLE, N., ERBER, R., AURICH, C., *et al.* (2014) Comparison of heart rate and heart rate variability obtained by heart rate monitors and simultaneously recorded electrocardiogram signals in nonexercising horses. *Journal of Veterinary Behavior* vol. 9, n° 6, p. 341-346. [https://doi.org/10.1016/j.jveb.2014.07.006]
- IZZATI, M.R.N.Z., NORANIZA, M.A., ADAMU, L., *et al.* (2018) Validity of an established metabolic disorder index as a predictor for metabolic eliminations in endurance horses. *International Journal of Veterinary Science and Medicine* vol. 6, n° 2, p. 227-232. [https://doi.org/10.1016/j.ijvsm.2018.08.002]
- KANG, H., ZSOLDOS, R.R., WOLDEYOHANNES, S.M., *et al.* (2020) The Use of Percutaneous Thermal Sensing Microchips for Body Temperature Measurements in Horses Prior to, during and after Treadmill Exercise. *Animals* vol. 10, n° 12, p. 2274. [https://doi.org/10.3390/ani10122274]
- KENNY, G.P., JAY, O., ZALESKI, W.M., *et al.* (2006) Postexercise hypotension causes a prolonged perturbation in esophageal and active muscle temperature recovery. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology* vol. 291, n° 3, p. R580-R588. [https://doi.org/10.1152/ajpregu.00918.2005]
- KNIES, M., TESKE, E., KOOISTRA, H. (2022) Evaluation of the FreeStyle Libre, a flash glucose monitoring system, in client-owned cats with diabetes mellitus. *Journal of Feline Medicine and Surgery* vol. 24, n° 8, p. e223-e231. [https://doi.org/10.1177/1098612X221104051]
- KORT, W.J., HEKKING-WEIJMA, J.M., TENKATE, M.T., *et al.* (1998) A microchip implant system as a method to determine body temperature of terminally ill rats and mice. *Laboratory Animals* vol. 32, n° 3, p. 260-269. [https://doi.org/10.1258/002367798780559329]
- LANGLOIS, C., ROBERT, C. (2008) Épidémiologie des troubles métaboliques chez les chevaux d'endurance. *Pratique Vétérinaire Equine* n° 157, p. 51.
- LE MOYEC, L., ROBERT, C., TRIBA, M.N., *et al.* (2019) A First Step Toward Unraveling the Energy Metabolism in Endurance Horses: Comparison of Plasma Nuclear Magnetic Resonance Metabolomic Profiles Before and After Different Endurance Race Distances. *Frontiers in Molecular Biosciences* vol. 6, p. 45. [https://doi.org/10.3389/fmolb.2019.00045]
- LE MOYEC, L., ROBERT, C., TRIBA, M.N., *et al.* (2014) Protein Catabolism and High Lipid Metabolism Associated with Long-Distance Exercise Are Revealed by Plasma NMR Metabolomics in Endurance Horses. *PLoS One* vol. 9, n° 3, p. e90730. [https://doi.org/10.1371/journal.pone.0090730]
- LEISSON, K., JAAKMA, Ü., SEENE, T. (2008) Adaptation of Equine Locomotor Muscle Fiber Types to Endurance and Intensive High Speed Training. *Journal of Equine Veterinary Science* vol. 28, n° 7, p. 395-401. [https://doi.org/10.1016/j.jevs.2008.05.007]
- LENOIR, A., TRACHSEL, D.S., YOUNES, M., *et al.* (2017) Agreement between Electrocardiogram and Heart Rate Meter Is Low for the Measurement of Heart Rate Variability during Exercise in Young Endurance Horses. *Frontiers in Veterinary Science* vol. 4, p. 170. [https://doi.org/10.3389/fvets.2017.00170]
- LEON, L.R., HELWIG, B.G. (2010) Heat stroke: Role of the systemic inflammatory response. *Journal of Applied Physiology* vol. 109, n° 6, p. 1980-1988. [https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00301.2010]
- LI, G., LEE, P., MORI, N., *et al.* (2012) Long term intensive exercise training leads to a higher plasma malate/lactate dehydrogenase (M/L) ratio and increased level of lipid mobilization in horses.

- Veterinary Research Communications* vol. 36, n° 2, p. 149-155. [https://doi.org/10.1007/s11259-012-9515-0]
- LIKON, I., DYSON, S., NAGY, A. (2023) Magnetic Resonance Imaging Measurements of the Proximal Palmar Cortex of the Third Metacarpal Bone and the Suspensory Ligament in Non-Lame Endurance Horses before and after Six Months of Training. *Animals* vol. 13, n° 6, p. 1106. [https://doi.org/10.3390/ani13061106]
- LUCK, M.M., LE MOYEC, L., BARREY, E., *et al.* (2015) Energetics of endurance exercise in young horses determined by nuclear magnetic resonance metabolomics. *Frontiers in Physiology* vol. 6, p. 198. [https://doi.org/10.3389/fphys.2015.00198]
- MACH, N., MIDOUX, C., LECLERCQ, S., *et al.* (2022) Mining the equine gut metagenome: poorly-characterized taxa associated with cardiovascular fitness in endurance athletes. *Communications Biology* vol. 5, n° 1, p. 1-15. [https://doi.org/10.1038/s42003-022-03977-7]
- MACKECHNIE-GUIRE, R., MACKECHNIE-GUIRE, E., FAIRFAX, V., *et al.* (2020) The Effect That Induced Rider Asymmetry Has on Equine Locomotion and the Range of Motion of the Thoracolumbar Spine When Ridden in Rising Trot. *Journal of Equine Veterinary Science* vol. 88, p. 102946. [https://doi.org/10.1016/j.jevs.2020.102946]
- MARICHAL, G., TRIGO, P., SOTO, C., *et al.* (2023) Hydroelectrolytic and Acid–Base Parameters after 80 to 115 km Endurance Races (Raid Uruguayo) and Their Association with the Comfort Index. *Animals* vol. 13, n° 4, p. 670. [https://doi.org/10.3390/ani13040670]
- MARLIN, D., WILLIAMS, J. (2018) Equine endurance race pacing strategy differs between finishers and non-finishers in 120 km single-day races. *Comparative Exercise Physiology* vol. 14, p. 1-8. [https://doi.org/10.3920/CEP170027]
- MARLIN, D.J., SCOTT, C.M., SCHROTER, R.C., *et al.* (1996) Physiological responses in nonheat acclimated horses performing treadmill exercise in cool (20 degrees C/40% RH), hot dry (30 degrees C/40% RH) and hot humid (30 degrees C/80% RH) conditions. *Equine Veterinary Journal. Supplement* n° 22, p. 70-84.
- MCCRAE, P., SPONG, H., GOLESTANI, N., *et al.* (2023) Validation of an Equine Smart Textile System for Heart Rate Variability: A Preliminary Study. *Animals* vol. 13, p. 512. [https://doi.org/10.3390/ani13030512]
- MCCUTCHEON, L.J., GEOR, R.J. (2014) Thermoregulation and exercise-associated heat illnesses. *In* Hinchcliff, K.W., Kaneps, A.J., Geor, R.J. (Éd.), *Equine Sports Medicine and Surgery*, 2ème éd. Philadelphie, W.B. Saunders, p. 901-918. [https://doi.org/10.1016/B978-0-7020-4771-8.00041-7]
- MEALEY, K.L. (2019) Vital signs and potential monitoring parameters for dogs, cats, horses, and ferrets. *In* *Pharmacotherapeutics for Veterinary Dispensing*. Hoboken, John Wiley & Sons, Ltd, p. 569-570. [https://doi.org/10.1002/9781119404576.app3]
- METAYER, N., BIAU, S., COCHET, J.L., *et al.* (2004) Study of locomotion and morphological factors in the performance of the horse specialized in endurance tests. *30ème Journée de la Recherche Equine*, 3 mars 2004 p. 67-76.
- MIHELIC, K., VRBANAC, Z., BOJANIC, K., *et al.* (2022) Changes in Acute Phase Response Biomarkers in Racing Endurance Horses. *Animals* vol. 12, p. 2993. [https://doi.org/10.3390/ani12212993]
- MISHEFF, M.M., ALEXANDER, G.R., HIRST, G.R. (2010) Management of fractures in endurance horses: Management of fractures in endurance horses. *Equine Veterinary Education* vol. 22, n° 12, p. 623-630. [https://doi.org/10.1111/j.2042-3292.2010.00150.x]
- MORGAN, K. (1998) Thermoneutral zone and critical temperatures of horses. *Journal of Thermal Biology* vol. 23, n° 1, p. 59-61. [https://doi.org/10.1016/S0306-4565(97)00047-8]
- MOSER, O., YARDLEY, J.E., BRACKEN, R.M. (2018) Interstitial Glucose and Physical Exercise in Type 1 Diabetes: Integrative Physiology, Technology, and the Gap In-Between. *Nutrients* vol. 10, n° 1, p. 93. [https://doi.org/10.3390/nu10010093]
- MUÑOZ, A., CASTEJÓN-RIBER, C., RIBER, C., *et al.* (2017) Current Knowledge of Pathologic Mechanisms and Derived Practical Applications to Prevent Metabolic Disturbances and Exhaustion in the Endurance Horse. *Journal of Equine Veterinary Science* vol. 51, p. 24-33. [https://doi.org/10.1016/j.jevs.2016.12.002]

- MUÑOZ, A., RIBER, C., TRIGO, P., *et al.* (2010) Dehydration, electrolyte imbalances and renin-angiotensin-aldosterone-vasopressin axis in successful and unsuccessful endurance horses. *Equine Veterinary Journal. Supplement* n° 38, p. 83-90. [<https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.2010.00211.x>]
- MUSCH, T.I., EKLUND, K.E., HAGEMAN, K.S., *et al.* (2004) Altered regional blood flow responses to submaximal exercise in older rats. *Journal of Applied Physiology* vol. 96, n° 1, p. 81-88. [<https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00729.2003>]
- NAGY, A., DYSON, S.J., MURRAY, J.K. (2012) A veterinary review of endurance riding as an international competitive sport. *The Veterinary Journal* vol. 194, n° 3, p. 288-293. [<https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2012.06.022>]
- NAGY, A., MURRAY, J., DYSON, S. (2013) Horse, Rider and Venue-Related Risk Factors for Eliminations from Fédération Equestre Internationale Endurance Rides due to Lameness and Metabolic Reasons. *Equine Veterinary Journal* vol. 45, n° S44, p. 8-8. [https://doi.org/10.1111/evj.12145_18]
- NAGY, A., MURRAY, J.K., DYSON, S.J. (2014) Descriptive epidemiology and risk factors for eliminations from Fédération Equestre Internationale endurance rides due to lameness and metabolic reasons (2008–2011). *Equine Veterinary Journal* vol. 46, n° 1, p. 38-44. [<https://doi.org/10.1111/evj.12069>]
- PARIS, A., BECCATI, F., PEPE, M. (2021a) Type, prevalence, and risk factors for the development of orthopedic injuries in endurance horses during training and competition. *Journal of the American Veterinary Medical Association* vol. 258, n° 10, p. 1109-1118. [<https://doi.org/10.2460/javma.258.10.1109>]
- PARIS, A., BECCATI, F., PEPE, M. (2021b) Plantar fasciitis in 19 endurance horses: Diagnosis, treatment and follow-up. *Equine Veterinary Education* vol. 33, n° 12, p. 643-652. [<https://doi.org/10.1111/eve.13383>]
- PARKER, M., GOODWIN, D., EAGER, R., *et al.* (2010) Comparison of Polar W heart rate interval data with simultaneously recorded ECG signals in horses. *Comparative Exercise Physiology* vol. 6, p. 137. [<https://doi.org/10.1017/S1755254010000024>]
- POPE, N. (1992) The Story Of The Pony Express. In *Smithsonian National Postal Museum*. [<https://postalmuseum.si.edu/research/articles-from-enroute/the-story-of-the-pony-express.html>] (consulté le 30/06/2023).
- PROCHNO, H.C., BARUSSI, F.M., BASTOS, F.Z., *et al.* (2020) Infrared Thermography Applied to Monitoring Musculoskeletal Adaptation to Training in Thoroughbred Race Horses. *Journal of Equine Veterinary Science* vol. 87, p. 102935. [<https://doi.org/10.1016/j.jevs.2020.102935>]
- PUC CETTI, M., BECCATI, F., DENOIX, J.-M. (2022) Bone stress injuries and fatigue fractures of the pelvis in endurance horses. *Equine Veterinary Journal* vol. 54, n° 6, p. 1064-1075. [<https://doi.org/10.1111/evj.13536>]
- RAJÃO, M.D., LEITE, C.S., NOGUEIRA, K., *et al.* (2019) The bone response in endurance long distance horse. *Open Veterinary Journal* vol. 9, n° 1, p. 58-64. [<https://doi.org/10.4314/ovj.v9i1.11>]
- 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>]
- REBRIN, K., SHEPPARD, N.F., STEIL, G.M. (2010) Use of subcutaneous interstitial fluid glucose to estimate blood glucose: revisiting delay and sensor offset. *Journal of Diabetes Science and Technology* vol. 4, n° 5, p. 1087-1098. [<https://doi.org/10.1177/193229681000400507>]
- RICHARDSON, K., MURRAY, J.-A.M.D. (2016) Fiber for Performance Horses: A Review. *Journal of Equine Veterinary Science* vol. 46, p. 31-39. [<https://doi.org/10.1016/j.jevs.2016.02.234>]
- ROBERT, C. (2019) Entraînement du cheval d'endurance et respect du bien-être. In *ifce.fr*. [https://www.youtube.com/watch?v=rlOUuefnsQc&ab_channel=IFCE] (consulté le 23/07/2023).
- ROBERT, C., GOACHET, A.-G., FRAIPONT, A., *et al.* (2010) Hydration and electrolyte balance in horses during an endurance season. *Equine Veterinary Journal. Supplement* n° 38, p. 98-104. [<https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.2010.00198.x>]

- 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>]
- SCHOTT, H.C., MARLIN, D.J., GEOR, R.J., *et al.* (2006) Changes in selected physiological and laboratory measurements in elite horses competing in a 160 km endurance ride. *Equine Veterinary Journal. Supplement* n° 36, p. 37-42. [<https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.2006.tb05510.x>]
- SCICLUNA, C. (2018) La puce d'identification Biothermo ND pour la surveillance connectée de la température du cheval. *44ème Journée de la Recherche Equine, Paris, 15 mars 2018.*
- SENGOKU, Y., NAKAMURA, K., OGATA, H., *et al.* (2014) Continuous Glucose Monitoring During a 100 km Race - A Case Study in an Elite Ultra-Marathon Runner. *International Journal of Sports Physiology and Performance*. [<https://doi.org/10.1123/ijsp.2013-0493>]
- SHELTON JR, L.J., WHITE, C.E., FELT, S.A. (2006) A comparison of non-contact, subcutaneous, and rectal temperatures in captive owl monkeys (*Aotus* sp.). *Journal of Medical Primatology* vol. 35, n° 6, p. 346-351. [<https://doi.org/10.1111/j.1600-0684.2006.00159.x>]
- SMITS, W.A. (1903) A propos du raid Bruxelles-Ostende : notes et rapports, 27 août 1902. Bruxelles, Imprimerie Scientifique Charles Bulens.
- 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>]
- TER WOORT, F., DUBOIS, G., DIDIER, M., *et al.* (2021) Validation of an equine fitness tracker: heart rate and heart rate variability. *Comparative Exercise Physiology* vol. 17, n° 2, p. 189-198. [<https://doi.org/10.3920/CEP200028>]
- TREIBER, K.H., BOSTON, R.C., GEOR, R.J., *et al.* (2010) Single-injection glucose kinetics with compartmental modelling during rest and low-intensity exercise in horses. *Equine Veterinary Journal* vol. 42, n° s38, p. 361-369. [<https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.2010.00239.x>]
- TREIBER, K.H., HESS, T.M., KRONFELD, D.S., *et al.* (2006) Glucose dynamics during exercise: dietary energy sources affect minimal model parameters in trained Arabian geldings during endurance exercise. *Equine Veterinary Journal. Supplement* n° 36, p. 631-636. [<https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.2006.tb05617.x>]
- TRIGO, P., CASTEJON, F., RIBER, C., *et al.* (2010) Use of biochemical parameters to predict metabolic elimination in endurance rides. *Equine Veterinary Journal* vol. 42, n° s38, p. 142-146. [<https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.2010.00238.x>]
- VIRY, S., DE GRAAF, J.B., FRANCES, J.-P., *et al.* (2015) Combined influence of expertise and fatigue on riding strategy and horse-rider coupling during the time course of endurance races. *Equine Veterinary Journal* vol. 47, n° 1, p. 78-82. [<https://doi.org/10.1111/evj.12236>]
- VIRY, S., SLEIMEN-MALKOUN, R., TEMPRADO, J.-J., *et al.* (2013) Patterns of Horse-Rider Coordination during Endurance Race: A Dynamical System Approach. *PLoS One* vol. 8, n° 8, p. e71804. [<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0071804>]
- WALLER, A.P., LINDINGER, M.I. (2010) Nutritional aspects of post exercise skeletal muscle glycogen synthesis in horses: a comparative review. *Equine Veterinary Journal* vol. 42, n° 3, p. 274-281. [<https://doi.org/10.2746/042516409X479603>]
- WICKLER, S.J., GREENE, H.M., EGAN, K., *et al.* (2006) Stride parameters and hindlimb length in horses fatigued on a treadmill and at an endurance ride. *Equine Veterinary Journal* vol. 38, n° S36, p. 60-64. [<https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.2006.tb05514.x>]
- WIEDMEYER, C.E., JOHNSON, P.J., COHN, L.A., *et al.* (2003) Evaluation of a continuous glucose monitoring system for use in dogs, cats, and horses. *Journal of the American Veterinary Medical Association* vol. 223, n° 7, p. 987-992. [<https://doi.org/10.2460/javma.2003.223.987>]
- WOLFRAMM, I.A., BOSGA, J., MEULENBROEK, R.G.J. (2013) Coordination dynamics in horse-rider dyads. *Human Movement Science* vol. 32, n° 1, p. 157-170. [<https://doi.org/10.1016/j.humov.2012.11.002>]
- WONG, D., MALIK, C., DEMBEK, K., *et al.* (2021) Evaluation of a continuous glucose monitoring system in neonatal foals. *Journal of Veterinary Internal Medicine* vol. 35, n° 4, p. 1995-2001. [<https://doi.org/10.1111/jvim.16186>]

- YOUNES, M., ROBERT, C., COTTIN, F., *et al.* (2015) Speed and Cardiac Recovery Variables Predict the Probability of Elimination in Equine Endurance Events. *PloS One* vol. 10, n° 8, p. e0137013. [<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0137013>]
- ZUFFA, T., BENNET, E.D., PARKIN, T.D.H. (2022) Factors associated with completion of Fédération Équestre Internationale endurance rides (2012-2019): Modelling success to promote welfare-oriented decisions in the equestrian sport of endurance. *Preventive Veterinary Medicine* vol. 198, p. 105534. [<https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2021.105534>]

Annexe 1 : liste des publications issues de la thèse.

Robert C, Rallet N, Leleu C. (2021) « Intérêt de la puce Biothermo ND pour le suivi de la température chez le cheval à l'effort ; étude préliminaire lors d'un test d'effort standardisé chez des chevaux d'endurance ». Journées annuelles AVEF, Marseille, 184 – 185.

Robert C, Rallet N, Leleu C. (2022) « Évolution de la température corporelle pendant une course d'endurance » et « Étude comparative de différentes méthodes de refroidissement ». Journées annuelles AVEF, Reims, 88 – 90.

Robert C. (2023) « Fiche pratique : suivi du taux de glucose en continu avec le système FreeStyle Libre ». Pratique Vétérinaire Équine n°216, 23 – 26.

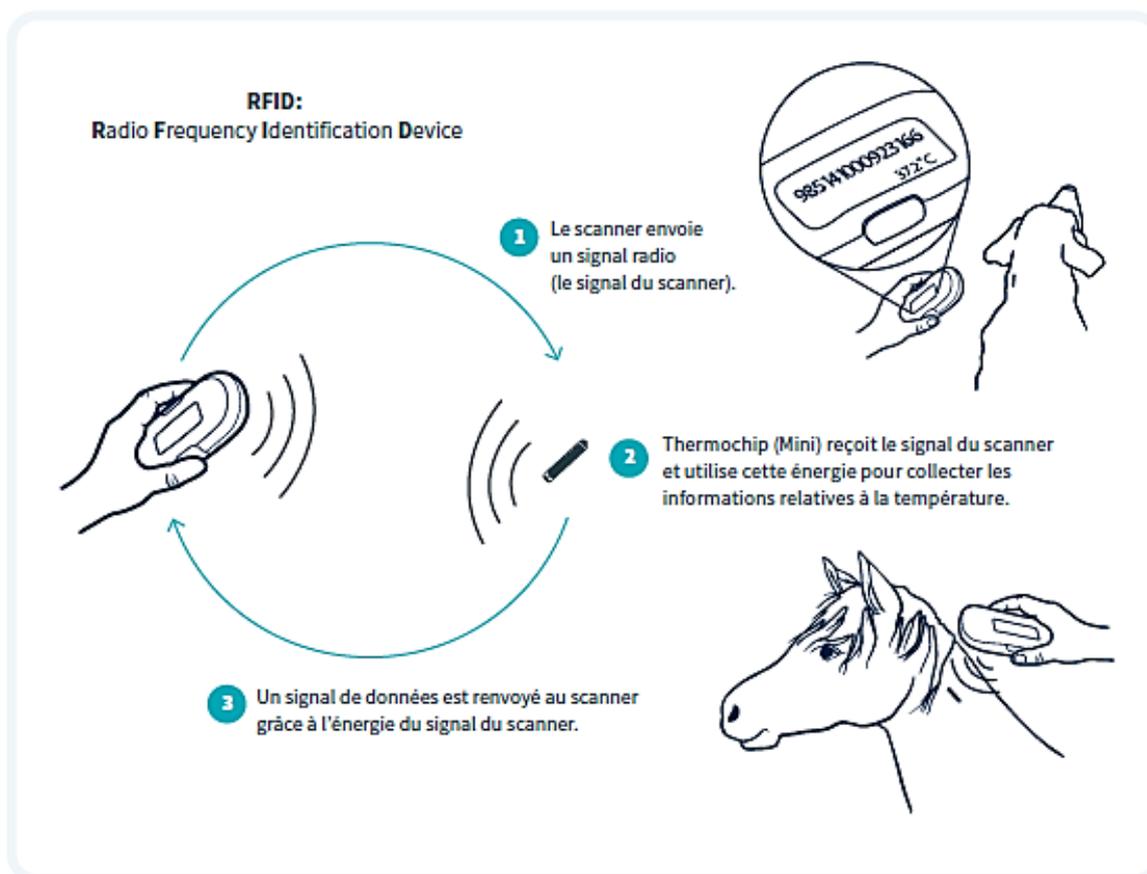
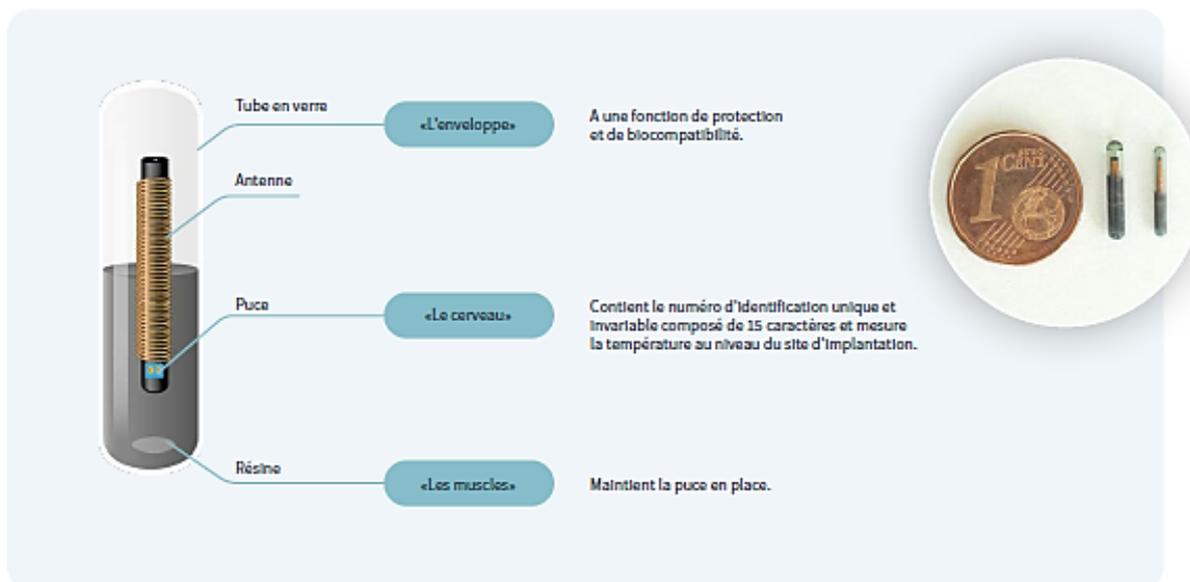
Robert C., Rallet N., Leleu C. (2023) « Méthode de refroidissement et récupération après effort ». Journées Sciences et Innovations Équines, IFCE Saumur.

Robert C., Rallet N., Leleu C. (2023) « Cooling methods and recovery after intense exercise in horses ».

Annexe 2 : fonctionnement de la Thermochip à technologie Biothermo ND (source : MSD Animal Health).

Thermochip (Mini) en détail

Thermochip (Mini) est un système miniature passif de radio-identification (RFID) conçu pour être utilisé avec des scanners compatibles. La puce a la taille d'un grain de riz, ne montre aucune activité et ne contient pas de batterie.



Annexe 3 : exemple de données acquises en course d'endurance (étude n°2).

	Temps	heure	Glycémie	T° puce	T° rectale	T° extérieure	Evènement : passage au vet, mange, marche, ombre/soleil ...
	Avant départ	6:00		36,5°C	37,1°C	11°C	Marche, préparation, pose du capteur de glycémie
	Départ à	6:30					
CEI2*	Etape 1 - distance, vitesse :						06:30
120 km	Assistance 1	7:05				11°C	pas de stop
	Assistance 2	7:25				12°C	pas de stop
	Arrivée étape 1	8:20	158	38,3°C		14°C	arrivée, arrosé
	5 mn	8:25	102	38,2°C		14°C	vetgate 63/60
	10 mn	8:30	107	37,4°C	38,6°C	14°C	arrêt au stand à l'ombre forêt : mange + glace antérieurs
	15 mn	8:35	112	36,7°C	38,3°C	14°C	arrêt au stand à l'ombre forêt : mange + glace antérieurs
	20 mn	8:40	115	36,7°C	38,4°C	14°C	arrêt au stand à l'ombre forêt : mange + glace antérieurs
	25 mn	8:45	112	36,3°C	38,3°C	14°C	stand, stop glace
	30 mn	8:50	111	36,1°C	38,3°C	14°C	préparation (guêtre) au stand
	35 mn	8:55	114	36,4°C	38,2°C	14°C	sellage
	40 mn	9:00	121	36,4°C		14°C	départ boucle
	Etape 2 - distance, vitesse :						09:00
	Assistance 1	9:25	135	37,6°C		15°C	stop eau
	Assistance 2	9:45	116	38,0°C		15°C	stop eau
	Assistance 3	10:10	140	38,0°C		15°C	stop eau
	Arrivée étape 2	10:40	131	38,4°C		16°C	arrivée, arrosé
	5 mn	10:45	125	38,1°C		16°C	vetgate 60/54
	10 mn	10:50	123	38,0°C	38,9°C	16°C	arrêt au stand à l'ombre forêt : mange + glace antérieurs
	15 mn	10:55	110	37,3°C	38,8°C	16°C	arrêt au stand à l'ombre forêt : mange + glace antérieurs
	20 mn	11:00	106	36,9°C	38,1°C	16°C	stand, stop glace
	25 mn	11:05	110	37,3°C		16°C	vet2 Essaouira (marche)
	30 mn	11:10	118	37,1°C		16°C	retour stand
	35 mn	11:15	110	37,2°C	38,0°C	16°C	sellage
	40 mn	11:20	103	37,1°C	38,3°C	16°C	départ boucle
	Etape 3 - distance, vitesse :						11:20
	Assistance 1	12:05	107	37,9°C		18,0°C	stop eau
	Assistance 2	12:35	86	38,2°C		18,0°C	stop eau
	Arrivée étape 3	13:05	75	38,8°C		20,0°C	arrivée, arrosé
	5 mn	13:10	79	38,1°C		20,0°C	arrosé
	10 mn	13:15	72	37,9°C		20,0°C	vetgate 50/56
	15 mn	13:20	71	37,3°C	38,9°C	20,0°C	arrêt au stand à l'ombre forêt : mange + glace antérieurs
	20 mn	13:25	77	37,4°C	38,7°C	20,0°C	arrêt au stand à l'ombre forêt : mange + glace antérieurs
	25 mn	13:30	78	36,7°C	38,5°C	20,0°C	arrêt au stand à l'ombre forêt : mange + glace antérieurs
	30 mn	13:35	82	37,0°C	38,5°C	20,0°C	arrêt au stand à l'ombre forêt : mange + glace antérieurs
	35 mn	13:40	87	37,3°C		21,0°C	stop glace, miction, marche
	40 mn	13:45	92	37,3°C		22,0°C	vet2
	45 mn	13:50	74	37,2°C	37,8°C	22,0°C	retour stand, préparation
	50 mn	13:55	69	37,2°C	37,8°C	22,0°C	sellage, mange
	55 mn	14:00	74	37,1°C		23,0°C	à cheval, départ
	Etape 4 - distance, vitesse :						14:00
	Assistance 1	14:25	53	37,9°C		21,0°C	stop eau
	Assistance 2	14:45	57	38,2°C		21,0°C	stop eau
	Assistance 3	15:10	60	38,3°C		21,0°C	stop eau
	Arrivée étape 4	15:40	77	38,8°C		21,0°C	arrivée, arrosé
	5 mn	15:45	84	38,3°C		21,0°C	arrosé, marche
	10 mn	15:50	80	38,1°C		21,0°C	vetgate
	15 mn	15:55	102	37,8°C		21,0°C	vetgate 59/59
	20 mn	16:00	110	37,5°C		21,0°C	arrêt au stand à l'ombre forêt : mange + glace antérieurs
	30 mn	16:05	98	37,2°C	38,7°C	21,0°C	arrêt au stand à l'ombre forêt : mange + glace antérieurs
	40 mn	16:10	96	37,4°C	38,4°C	20,0°C	stand, mange, stop glace
	50 mn	16:20	101	37,3°C	38,2°C	20,0°C	stand, mange
	60 mn	16:30	90	37,4°C	38,0°C	20,0°C	stand, mange
	70 mn	16:40	92	37,3°C	38,2°C	20,0°C	stand, mange
	80 mn	16:50	80	37,4°C	38,2°C	20,0°C	stand, mange + glace antérieurs
	90 mn	17:00	66	37,4°C		20,0°C	marche vers boxe vet
	100 mn	17:10	60			20,0°C	boxe vet, echo puce
	110 mn	17:20	94			20,0°C	boxe vet, echo puce

Annexe 4 : Protocole de pose du capteur FreeStyle Libre 2 (Abbott). (C. Robert, *Pratique vétérinaire équine* 2023 n°216).

MISE EN PLACE DU CAPTEUR FREESTYLE LIBRE



Étape 1: préparation du capteur

- Ouvrir le pack en retirant l'opercule.
 - Dévisser le bouchon de l'applicateur.
 - Aligner le trait noir de l'applicateur avec celui du pack.
 - Presser fermement vers le bas.
 - Sortir l'applicateur du pack.
 - Placer 4 à 6 points de colle sur le capteur à mi-distance entre l'aiguille (visible au centre) et le bord.
- Ne pas mettre la colle trop près du bord, pour ne pas qu'elle adhère à l'applicateur.

© C. Robert



Étape 2: pose du capteur

- Mettre en place le capteur sur la zone tondue.
- Appuyer fortement sur l'applicateur en faisant contre-appui de l'autre côté de l'encolure.
- Maintenir l'applicateur en place pendant quelques secondes le temps que la colle sèche, avant de le retirer délicatement.

© N. Rallet



Étape 3: consolidation du capteur

- Appuyer sur le capteur.
- Lisser le contour pour favoriser l'adhérence.

© N. Rallet



Étape 4: activation du capteur

- Scanner le capteur avec l'application.
- Contrôler l'heure de première lecture du taux de glucose qui s'affiche 1 heure après cette initialisation.

© C. Robert

UTILISATION D'OBJETS CONNECTÉS POUR LE SUIVI EN COURSE DES CHEVAUX D'ENDURANCE : ÉTUDE EXPLORATOIRE

AUTEUR : Nicolas RALLET

RÉSUMÉ :

Ces dernières décennies ont vu l'essor de l'endurance équestre, une discipline exigeant une adaptation physique et métabolique des chevaux à l'effort prolongé. Les contrôles vétérinaires en compétition contribuent à l'identification des chevaux présentant des troubles locomoteurs et métaboliques. L'objectif de ce travail était de déterminer l'intérêt d'objets connectés pour améliorer le suivi des chevaux en temps réel. Une première étude a utilisé plusieurs objets connectés chez cinq chevaux d'endurance lors d'un test d'effort standardisé ; elle a mis en évidence la difficulté d'utiliser trop d'appareils en même temps. Pour la deuxième étude en conditions de course, le suivi a été restreint à l'utilisation de la puce d'identification à technologie Biothermo ND et au capteur FreeStyle Libre ND, permettant respectivement une mesure de la température corporelle et du glucose interstitiel par simple scan de l'encolure. Une dernière étude a cherché à étudier l'influence de la méthode de refroidissement sur la température mesurée par la puce.

Les données récoltées ont permis de comparer des valeurs de température corporelle obtenues avec la puce et à l'aide d'un thermomètre rectal selon différents protocoles. Les résultats montrent que les valeurs de température mesurées par la puce sont inférieures à la température rectale mais néanmoins bien corrélées ($p\text{-value} < 0,05$). La température mesurée par la puce apparaît influencée par la méthode de refroidissement, notamment l'utilisation d'eau glacée sur l'encolure. L'étude de l'évolution du glucose interstitiel pendant des courses d'endurance a montré des premiers résultats intéressants, avec des phases d'hypoglycémie à l'effort qui semblent compensées pendant les phases de récupération.

Les avancées technologiques ouvrent des perspectives prometteuses pour le suivi en temps réel des chevaux. Ce travail exploratoire ouvre la voie à d'autres études sur de plus larges effectifs. En favorisant une approche plus précise et personnalisée, ces technologies pourraient contribuer à l'évolution de l'endurance équestre tout en garantissant la sécurité et la santé des chevaux athlètes.

MOTS CLÉS :

CHEVAL ; ENDURANCE ; OBJET CONNECTÉ ; GLYCÉMIE ; RÉCUPÉRATION ; TEST D'EFFORT STANDARDISÉ ; TEMPÉRATURE RECTALE.

JURY :

Présidente : Pr Fanny PILOT-STORCK
Directrice de thèse : Pr Céline ROBERT
Examinatrice : Dr Lélia BERTONI

USE OF CONNECTED OBJECTS FOR MONITORING ENDURANCE HORSES IN RACING: AN EXPLORATORY STUDY

AUTHOR: Nicolas RALLET

SUMMARY:

The last few decades have seen the development of equestrian endurance, a discipline requiring horses to adapt physically and metabolically to prolonged effort. Veterinary examinations during competitions help to identify horses with locomotor or metabolic disorders. The aim of this study was to determine the benefits of using connected devices to improve real-time monitoring of horses.

An initial study used several connected devices on five endurance horses during a standardised exercise test, highlighting the difficulty of using too many devices at the same time. For the second study under race conditions, monitoring was restricted to the use of the Biothermo ND technology identification chip and the FreeStyle Libre ND sensor, which measured body temperature and interstitial glucose, respectively, simply by scanning the neck. A final study looked at the influence of the cooling method on the temperature measured by the chip.

The data collected made it possible to compare body temperature values obtained with the chip and using a rectal thermometer according to different protocols. The results show that the temperature values measured by the chip are lower than the rectal temperature but nevertheless well correlated (p -value < 0.05). The temperature measured by the chip appears to be influenced by the cooling method, in particular the use of ice water on the neck. The study of changes in interstitial glucose levels during endurance races has produced some interesting initial results, with phases of hypoglycaemia during exercise appearing to be compensated for during recovery phases.

Technological advances are opening up promising prospects for real-time monitoring of horses. This exploratory work paves the way for other studies involving larger numbers of horses. By encouraging a more precise and personalised approach, these technologies could contribute to the development of equestrian endurance while guaranteeing the safety and health of the horse athletes.

KEYWORDS:

HORSE; ENDURANCE; PERCUTANEOUS THERMAL SENSING MICROCHIP; BODY TEMPERATURE; COOL-DOWN METHOD; GLYCEMIA; EXERCISE TEST.

JURY:

Chairperson: Pr Fanny PILOT-STORCK

Thesis Director: Pr Céline ROBERT

Reviewer: Dr Lélia BERTONI