



HAL
open science

Entraînement en piscine et sur tapis immergé : effets physiologiques chez le cheval

Valentine Haouit

► **To cite this version:**

Valentine Haouit. Entraînement en piscine et sur tapis immergé : effets physiologiques chez le cheval. Médecine vétérinaire et santé animale. 2023. dumas-04416988

HAL Id: dumas-04416988

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04416988>

Submitted on 25 Jan 2024

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

ENTRAÎNEMENT EN PISCINE ET SUR TAPIS IMMERGÉ : EFFETS PHYSIOLOGIQUES CHEZ LE CHEVAL

THÈSE

pour obtenir le diplôme d'État de
DOCTEUR VÉTÉRINAIRE
présentée et soutenue publiquement devant
la Faculté de Médecine de Créteil (UPEC)
le 21 décembre 2023

par

Valentine, Marie HAOUT

sous la direction de
Estelle MANGUIN

JURY

Président du jury :	M. Fabrice AUDIGIÉ	Professeur à l'EnvA
Directrice de thèse :	Mme Estelle MANGUIN	Maître de Conférences à l'EnvA
Examineur :	M. Ludovic TANQUEREL	Maître de Conférences à l'EnvA
Membre invité :	Mme Audrey BEAUMONT	Praticienne hospitalière
Membre invité :	Mme Claire MOIROUD	Praticienne hospitalière

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



version décembre 2023

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

M	Adjou	Karim	Professeur	DPASP	1
M	Audigé	Fabrice	Professeur	DEPEC	2
M	Bellier	Sylvain	Professeur	DSBP	3
Mme	Benckroun	Ghita	Maître de conférences HDR	DEPEC	4
M	Blaga	Radu	Professeur	DSBP	5
M	Blot	Stéphane	Professeur	DEPEC	6
M	Boulouis	Henri-Jean	Professeur émérite	DSBP	7
Mme	Chahory	Sabine	Professeur	DEPEC	8
Mme	Chastant	Sylvie	Professeur	DPASP	9
M	Chateau	Henry	Professeur	DSBP	10
Mme	Chetboul	Valerie	Professeur	DEPEC	11
Mme	Crevier-Denoix	Nathalie	Professeur	DSBP	12
M	Degueurce	Christophe	Professeur	DSBP	13
M	Denoix	Jean-Marie	Professeur	DEPEC	14
M	Desquilbet	Loïc	Professeur	DSBP	15
Mme	Dufour	Barbara	Professeur émérite	DPASP	16
M	Eloit	Marc	Professeur	DSBP	17
M	Fayolle	Pascal	Professeur émérite	DEPEC	18
M	Federighi	Michel	Professeur	DPASP	19
M	Fontbonne	Alain	Professeur	DEPEC	20
Mme	Gilbert	Caroline	Professeur	DSBP	21
M	Grandjean	Dominique	Professeur	DEPEC	22
Mme	Grimard-Ballif	Bénédicte	Professeur	DPASP	23
Mme	Haddad-Hoang Xuan	Nadia	Professeur	DPASP	24
M	Jouvion	Gregory	Professeur	DSBP	25
M	Kohlhauer	Matthias	Professeur	DSBP	26
Mme	Le Poder	Sophie	Professeur	DSBP	27
Mme	Le Roux	Delphine	Maître de conférences HDR	DSBP	28
M	Manassero	Mathieu	Professeur	DEPEC	29
Mme	Maurey-Guénec	Christelle	Professeur	DEPEC	30
M	Millermann	Yves	Professeur	DPASP	31
M	Ponter	Andrew	Professeur	DPASP	32
Mme	Risco-Castillo	Véronica	Maître de conférences HDR	DSBP	33
Mme	Rivière	Julie	Maître de conférences HDR	DPASP	34
Mme	Robert	Céline	Professeur	DSBP	35
M	Tiret	Laurent	Professeur	DSBP	36
M	Tissier	Renaud	Professeur	DSBP	37
M	Verwaerde	Patrick	Professeur	DEPEC	38
Mme	Viateau	Véronique	Professeur	DEPEC	39

Liste des Maîtres de conférences et Ingénieurs de recherche DMV

M	Arné	Pascal	Maître de conférences	DPASP	1
Mme	Barassin	Isabelle	Maître de conférences	DPASP	2
Mme	Barbarino	Alix	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC	3
Mme	Bertoni	Lelia	Maître de conférences	DEPEC	5
Mme	Canonne-Guibert	Morgane	Maître de conférences	DEPEC	7
Mme	Chevallier	Lucie	Maître de conférences	DSBP	8
Mme	Cochet-Faivre	Noëlle	Maître de conférences	DEPEC	9
Mme	Cordonnier-Lefort	Nathalie	Maître de conférences	DSBP	10
Mme	Coudry	Virginie	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC	11
Mme	Crepeaux	Guillemette	Maître de conférences	DSBP	12
M	Crozet	Guillaume	Maître de conférences	DPASP	13
Mme	De Paula Reis	Alline	Maître de conférences	DPASP	14
M	Delsart	Maxime	Maître de conférences	DPASP	15
Mme	Denis	Marine	Ingénieur de recherche (DMV)	DPASP	16
M	Deshuillers	Pierre	Maître de conférences	DSBP	17
M	Gauthier	Michel	Maître de conférences associé	DPASP	18
Mme	Guérin	Virginie	Maître de conférences	DSBP	19
Mme	Guélin-Poirier	Valentine	Maître de conférences	DPASP	20
Mme	Jacquet	Sandrine	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC	21
M	Kurtz	Maxime	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC	22
Mme	Lagré	Anne-Claire	Maître de conférences	DSBP	23
Mme	Le Dudal	Marine	Ingénieur de recherche (DMV)	DSBP	24
Mme	Legrand	Chantal	Maître de conférences associé	DSBP	25
M	Mammeri	Mohamed	Maître de conférences	DSBP	26
Mme	Manguin	Estelle	Maître de conférences	DEPEC	27
Mme	Marignac	Genevieve	Maître de conférences	DSBP	28
Mme	Marotto	Stéphanie	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC	29
Mme	Maurice	Emeline	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC	31
Mme	Mespoules-Rivière	Céline	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC	32
Mme	Mtmet	Narjès	Maître de conférences	DPASP	33
M	Mortier	Jérémy	Maître de conférences associé	DEPEC	34
M	Nudelmann	Nicolas	Maître de conférences	DEPEC	35
M	Pignon	Charly	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC	36
M	Polack	Bruno	Maître de conférences	DSBP	37
Mme	Quéré	Émilie	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC	38
Mme	Ravary-Plumioën	Bérangère	Ingénieur de recherche (DMV)	DPASP	39
M	Reyes-Gomez	Edouard	Maître de conférences	DSBP	40
Mme	Rose	Hélène	Maître de conférences associé	DSBP	41
M	Tanquerel	Ludovic	Maître de conférences	DEPEC	42

Remerciements

Au Président du Jury de cette thèse, M. Fabrice AUDIGIÉ, Professeur à l'EnvA

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

À Mme Estelle MANGUIN, Maître de conférences à l'EnvA,

Merci d'avoir accepté de diriger cette thèse et de m'avoir proposé ce sujet si passionnant. Merci pour le temps que tu m'as consacré, ta disponibilité, ta patience et ta pédagogie dans l'élaboration de cette thèse.

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

Pour avoir accepté d'être l'examineur de cette thèse, sincères remerciements.

À Mme Claire MOIROUD, praticienne hospitalière à l'EnvA

Je vous remercie d'avoir pris le temps de répondre à mes questions dans le cadre de l'élaboration de cette thèse.

Je vous remercie d'avoir accepté d'être membre invité de cette thèse.

À Mme Audrey BEAUMONT, praticienne hospitalière à l'EnvA

Je vous remercie d'avoir accepté d'être membre invité de cette thèse.

À Mme Brigitte LAUDE, directrice de la bibliothèque à l'EnvA

Merci pour le temps que vous m'avez accordé et la grande aide que vous m'avez apportée.

À mes parents, merci d'avoir été présents depuis le début, de m'avoir appris à toujours donner le meilleur de moi-même, quelles que soient les circonstances.

À mes grand-mères, merci de m'avoir soutenue depuis ces nombreuses années, de m'avoir vue grandir et de m'avoir permis d'être la femme que je suis aujourd'hui. Oma, tu aurais sûrement été fière de voir que j'ai réalisé un des projets les plus importants de ma vie.

À mon grand-père, tu aurais été si fier de savoir que je suis devenue vétérinaire.

À mes amis de l'école, de la faculté de pharmacie ou d'ailleurs, qui ont toujours cru en moi, merci de m'avoir fait comprendre qu'il n'y a pas d'obstacles et que tout est possible, merci de m'avoir soutenue dans les meilleurs comme dans les pires moments.

Table des matières

Liste des figures	3
Liste des tableaux	5
Liste des abréviations	7
Introduction	9
1. Principes physiques de l'entraînement en milieu aquatique.....	11
A. <i>Les lois physiques</i>	11
a. La force d'Archimède.....	11
b. La force de pesanteur ou poids.....	12
c. La flottabilité.....	13
d. Le poids apparent.....	13
e. Les résistances.....	14
B. <i>Les échanges thermiques</i>	15
a. La conduction.....	15
b. La convection.....	15
c. L'évaporation.....	16
d. Le rayonnement.....	16
e. Importance des échanges thermiques et de la température de l'eau.....	17
C. <i>Cinématique de la nage et de la marche en milieu aquatique</i>	19
a. Cinématique de la nage.....	19
b. Cinématique de la marche en tapis immergé.....	19
2. Principes techniques de l'entraînement en milieu aquatique.....	21
A. <i>Principes appliqués à la nage en piscine</i>	21
a. Construction.....	21
b. Durée et types d'exercices.....	23
c. Vitesse.....	26
d. Température.....	27
B. <i>Principes appliqués à la marche en tapis immergé</i>	28
a. Caractéristiques du travail (durée, vitesse et hauteur de l'eau).....	29
b. Température et entretien de l'eau.....	32
C. <i>Bonnes pratiques d'utilisation</i>	34
a. Tapis immergé.....	34
b. Piscine.....	37
D. <i>Indications et diversités d'utilisation</i>	40
a. Indications.....	40
b. Diversités d'utilisation.....	40
E. <i>Contre-indications et risques</i>	42
a. Contre-indications.....	42
b. Risques.....	43
3. Conséquences physiologiques de l'entraînement en milieu aquatique.....	45
A. <i>Conséquences sur les paramètres sanguins</i>	45
a. Lactates.....	46
b. Glucose et insuline.....	49
c. Hématocrite, hémoglobine et protéines totales.....	51
d. Gaz sanguins.....	52
e. Autres paramètres.....	53
B. <i>Conséquences sur le système cardiovasculaire</i>	55
a. Conséquences de la nage.....	56
b. Conséquences de la marche en tapis immergé.....	62
C. <i>Conséquences sur le système respiratoire</i>	66
a. Sur la fréquence et le pattern respiratoires.....	66

b. Sur les voies aériennes supérieures	68
c. Sur les voies aériennes inférieures	69
D. Conséquences sur le système musculaire	74
a. Conséquences de la nage.....	74
b. Conséquences de la marche en tapis immergé	78
E. Conséquences sur la température corporelle.....	82
a. Conséquences de la nage.....	82
b. Conséquences de la marche en tapis immergé	82
F. Conséquences sur les performances	84
a. Conséquences de la nage.....	84
b. Conséquences de la marche en tapis immergé	84
Conclusion.....	87
Liste des références bibliographiques.....	89
Annexe 1	97
Annexe 2	105

Liste des figures

Figure 1 : Illustration de la force d'Archimède d'après Richard <i>et al.</i> (2015).....	12
Figure 2 : Illustration du centre de gravité du cheval à l'arrêt d'après Buchner <i>et al.</i> (2000).....	12
Figure 3 : Illustration de la force de pesanteur d'après Richard <i>et al.</i> (2015)	13
Figure 4 : Illustration de la résistance frontale d'après Richard <i>et al.</i> (2015)	14
Figure 5 : Récapitulatif des forces impliquées lors de la nage d'après Richard <i>et al.</i> (2015).....	15
Figure 6 : Schéma récapitulatif de la thermorégulation chez le cheval d'après Arineo (2022)	17
Figure 7 : Vue d'ensemble de la piscine du CIRALE de l'EnvA (crédit EnvA).....	21
Figure 8 : Vue rapprochée du bassin du CIRALE de l'EnvA (crédit EnvA)	22
Figure 9 : Plateforme d'accès à la piscine du CIRALE de l'EnvA (crédit EnvA).....	23
Figure 10 : Vue de côté du tapis immergé du CIRALE de l'EnvA (crédit EnvA)	28
Figure 11 : Vue arrière du tapis immergé du CIRALE (crédit EnvA).....	28
Figure 12 : Séance en tapis immergé au CIRALE de l'EnvA (crédit EnvA)	35
Figure 13 : Vue de profil d'une séance en tapis immergé au CIRALE de l'EnvA (crédit : EnvA)	36
Figure 14 : Positionnement correct (à gauche) et incorrect (à droite) du cheval lors de la marche en tapis immergé d'après Nankervis et al. (2020).....	36
Figure 15 : Mise en place du matériel avant une séance de nage au CIRALE de l'EnvA (crédit EnvA)	38
Figure 16 : Séance de nage au CIRALE de l'EnvA avec deux meneurs (crédit EnvA).....	38
Figure 17 : Sortie du bassin lors d'une séance de nage au CIRALE de l'EnvA avec deux meneurs (crédit EnvA).....	39
Figure 18 : Variation moyenne de la glycémie obtenue dans l'étude de Bonelli <i>et al.</i> (2017) après un test de stimulation au glucose par voie intraveineuse avant et après un mois d'entraînement aquatique.....	50
Figure 19 : Variation moyenne de l'insulinémie obtenue dans l'étude de Bonelli et al. (2017) après un test de stimulation au glucose par voie intraveineuse avant et après un mois d'entraînement aquatique.....	50
Figure 20 : Equimètre permettant les mesures des paramètres cardiaques durant la nage en piscine (crédit EnvA).....	57
Figure 21 : Equimètre en place permettant les mesures des paramètres cardiaques durant la nage en piscine (crédit EnvA)	57

Figure 22 : ESV sur l'ECG d'un cheval (crédit : EnvA).....	59
Figure 23 : Cheval présentant de l'épistaxis (crédit EnvA).....	68
Figure 24 : Aspect des narines lors de la nage dans l'étude de Jones <i>et al.</i> (2020).....	69
Figure 25 : Sang dans la trachée d'un cheval lors d'une endoscopie (crédit EnvA)	70
Figure 26 : Mucus trachéal lors d'une endoscopie chez un cheval (crédit EnvA).....	71
Figure 27 : Liquide broncho-alvéolaire normal d'un cheval après prélèvement par endoscopie (crédit EnvA).....	72
Figure 28 : Liquide broncho-alvéolaire modifié par des saignements chez un cheval après prélèvement par endoscopie (crédit EnvA)	72
Figure 29 : Lame microscopique provenant d'un prélèvement broncho-alvéolaire et montrant une quantité importante de neutrophiles (flèches rouges) (crédit EnvA)	72
Figure 30 : Muscles superficiels d'un cheval (les muscles cutanés du cou et du tronc ont été enlevés), d'après Barone (2000).....	75
Figure 31 : Muscles fléchisseurs du doigt d'un cheval (membre gauche, vue médiale après ouverture large des gaines), d'après Barone (2000).....	76
Figure 32 : Flexion du doigt et du carpe lors de la nage (crédit EnvA)	77
Figure 33 : Extension du coude lors de la nage (crédit EnvA)	77
Figure 34 : Muscles de l'avant-bras d'un cheval (vues dorsales et latérales), d'après Barone (2000)	78
Figure 35 : Muscles du bassin et de la cuisse du cheval (membre gauche, plan superficiel, vue latérale) d'après Barone (2000).....	79

Liste des tableaux

Tableau 1 : Protocoles des études en piscine.....	24
Tableau 2 : Protocoles des études en tapis immergé	30
Tableau 3 : Comparaison des différentes températures moyennes de l'eau utilisée lors de la marche en tapis immergé (en °C)	32
Tableau 4 : Tableau comparatif des concentrations en lactates lors de la nage	46
Tableau 5 : Tableau comparatif des concentrations en lactates lors de la marche en tapis immergé	48
Tableau 6 : Tableau récapitulatif et comparatif des effets de la nage et de la marche en tapis immergé sur les paramètres sanguins	54
Tableau 7 : Changements cardiovasculaires durant une activité intense d'après Sherwood <i>et al.</i> (2016).....	55
Tableau 8 : Tableau comparatif des fréquences cardiaques lors de la nage.....	56
Tableau 9 : FC physiologiques chez le cheval selon l'allure d'après Marr et Bowen (2010).....	57
Tableau 10 : Nombre de chevaux ayant présenté de l'arythmie (et nombre total d'arythmies) d'après l'étude de Santosuosso <i>et al.</i> (2022).....	60
Tableau 11 : Tableau comparatif des fréquences cardiaques lors de la marche en tapis immergé.....	62
Tableau 12 : Tableau récapitulatif et comparatif des effets de la nage et de la marche en tapis immergé sur les paramètres cardiovasculaires.....	65
Tableau 13 : Tableau comparatif des fréquences respiratoires lors de la nage	66
Tableau 14 : Tableau des fréquences respiratoires lors de la marche en tapis immergé.....	67
Tableau 15 : Tableau récapitulatif et comparatif des effets de la nage et de la marche en tapis immergé sur les paramètres respiratoires.....	73
Tableau 16 : Tableau récapitulatif et comparatif des effets de la nage et de la marche en tapis immergé sur les paramètres musculaires	81
Tableau 17 : Tableau récapitulatif et comparatif des effets de la nage et de la marche en tapis immergé sur la température corporelle	83
Tableau 18 : Tableau récapitulatif et comparatif des effets de la nage et de la marche en tapis immergé sur la performance (VO ₂)	85

Liste des abréviations

ASAT : Aspartate Amino-Transférases

BPM : Battements Par Minute

CK : Créatine Kinases

ECG : Électrocardiogramme

EMG : Électromyogramme

ESSV : Extrasystole Supra-Ventriculaire

ESV : Extrasystole Ventriculaire

EXP : Expérience

FC : Fréquence Cardiaque

FR : Fréquence Respiratoire

HPIE : Hémorragie Pulmonaire Induite à l'Exercice

PA : Pression Artérielle

RPM : Respiration Par Minute

SET : Test à l'effort standardisé

VES : Volume d'Éjection Systolique

Introduction

L'hydrothérapie est définie comme l'emploi de l'eau à des fins thérapeutiques, quelle que soit sa forme (liquide ou gazeuse). Elle comporte diverses techniques telles que les bains (immersion du corps), les marches aquatiques (dans un bassin ou une étendue d'eau naturelle par exemple), les douches, les jets et les enveloppements.

L'utilisation de l'eau à des fins thérapeutiques chez l'Homme remonte à la Grèce antique. Les civilisations romaines et chinoises sont également réputées pour leur utilisation de bains d'eau minérale (Burns et Burns, 1997).

Il a été prouvé depuis de nombreuses années que l'hydrothérapie est efficace chez l'Homme principalement dans le cadre de la rééducation fonctionnelle, et son utilisation ne cesse de croître au fil des années. Ses effets sur la physiologie de l'Homme sont de plus en plus décrits dans la littérature. De façon similaire, l'hydrothérapie s'est développée en médecine vétérinaire, notamment aux Etats-Unis et en Angleterre et dernièrement en France, chez les chiens et les chevaux notamment.

Chez le cheval, les premières utilisations de l'hydrothérapie se situent au XIX^e siècle et correspondent à des bains dans l'eau de mer. Les premières publications concernant l'hydrothérapie en piscine datent de la fin du XX^e siècle. L'utilisation du tapis immergé est quant à elle décrite plus tardivement au début du XXI^e siècle.

Chez les chevaux de course, les programmes d'entraînement très intenses permettent d'augmenter les performances des chevaux, mais entraînent en contrepartie une surcharge et une tension élevée sur les membres, pouvant mener à des blessures. Ces blessures ont un impact tant sur le pronostic sportif qu'économique. Depuis quelques années, l'hydrothérapie, notamment la nage en piscine et la marche en tapis immergé, est utilisée pour la réhabilitation (de troubles musculosquelettiques ou neurologiques par exemple) mais aussi comme outil d'entraînement chez tous les types de chevaux, afin d'améliorer ou maintenir un niveau de performance ou encore de prévenir des affections locomotrices.

Un grand nombre de publications s'est intéressé à l'impact et à l'intérêt de ce type d'hydrothérapie sur la locomotion du cheval, mais peu d'études ont été réalisées concernant les effets de la marche en tapis immergé et de la nage en piscine sur la physiologie du cheval et ses performances. Ces études, lorsqu'elles existent, se concentrent sur des paramètres précis ou sur l'étude d'un système particulier (respiratoire ou cardio-vasculaire par exemple). La présente revue bibliographique a pour but de rassembler et présenter les recherches effectuées sur la physiologie du cheval nageant dans l'eau ou marchant en tapis immergé et de comparer l'utilisation de la piscine et du tapis immergé lorsque des critères de comparaison sont disponibles.

Ce manuscrit comprend en premier lieu une description des principes physiques de l'entraînement en milieu aquatique, afin de comprendre la dynamique de l'immersion dans l'eau et les effets de cette dernière sur un corps immergé et sa physiologie. Une seconde partie présentera les principes techniques appliqués à la nage en piscine et à la marche en tapis immergé afin de décrire les utilisations de ces pratiques (installations disponibles, protocoles, types d'exercices,

bonnes pratiques d'utilisation, indications et contre-indications). Enfin, la dernière partie consistera en une revue bibliographique des données disponibles sur les effets physiologiques de la nage en piscine et de la marche en tapis immergé chez le cheval.

1. Principes physiques de l'entraînement en milieu aquatique

Afin de comprendre l'équilibre et les contraintes qui s'appliquent sur le cheval lors de la marche ou de la nage en milieu aquatique, il convient tout d'abord d'étudier les bases de la biomécanique appliquée à l'immersion d'un corps dans l'eau. En effet, les forces que nous allons aborder ci-dessous conditionnent les effets de cette pratique, et nous verrons qu'agir sur certaines de ces forces permet d'adapter une séance selon les objectifs fixés. Il convient également d'aborder les échanges thermiques qui s'exercent lors de l'entraînement aquatique car ceux-ci peuvent avoir un impact sur la température corporelle du cheval et par conséquent sur son adaptation à ce milieu.

A. Les lois physiques

Il existe plusieurs lois permettant d'illustrer la physique de nage ou de marche dans l'eau. Nous détaillerons ici les deux principales forces responsables de l'équilibre (la force de pesanteur et la poussée d'Archimède) ainsi que les notions associées ayant un effet sur cet équilibre (le poids apparent et la flottabilité). Nous aborderons enfin les résistances appliquées au corps du cheval lors du mouvement en immersion.

a. La force d'Archimède

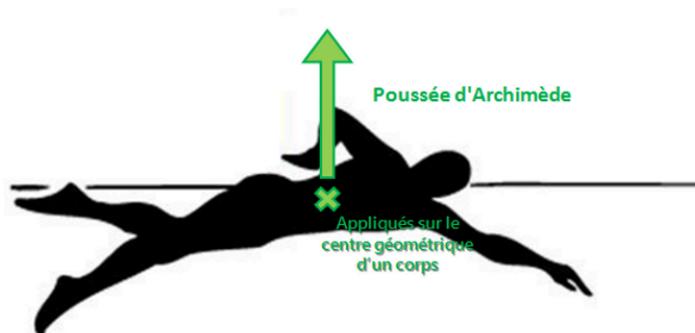
La force d'Archimède (illustrée par la figure 1) dépend de la pression hydrostatique. Cette dernière doit donc être détaillée en premier lieu. La pression hydrostatique à une profondeur définie correspond au poids de la colonne d'eau se trouvant entre la surface et la profondeur considérée et s'exerçant sur 1 cm². Elle augmente de 76 mmHg tous les 100 cm de profondeur (Thomas *et al.*, 1980).

La force d'Archimède (F_A) correspond à la somme vectorielle des forces de pression exercées par les molécules d'eau sur un objet placé entièrement ou partiellement dans un fluide. Elle s'applique au centre géométrique de l'objet et se situe verticalement de bas en haut. Ainsi, tout corps immergé dans un liquide subit de la part de ce liquide une poussée opposée au poids du volume de liquide déplacé (Jones *et al.*, 2023 ; Sultana, 1977).

Cette force s'exprime par l'équation suivante : $F_A = \rho \times g \times V$

Où ρ est la masse volumique du fluide en kg/m³, g est la gravité en N/kg, V le volume de liquide déplacé en m³.

Figure 1 : Illustration de la force d'Archimède d'après Richard *et al.* (2015)



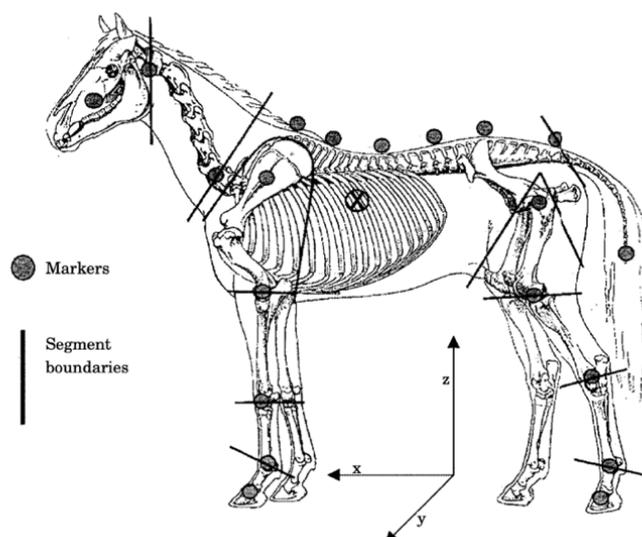
b. La force de pesanteur ou poids

La force de pesanteur (illustrée par la figure 3) s'oppose à la force d'Archimède. Elle correspond à la force qui attire une masse au centre de la Terre et se situe verticalement de haut en bas. Cette force s'applique au centre de gravité défini comme le point d'application moyen de toutes les forces de pesanteur s'exerçant sur le corps (Tisba, 2006). « Le centre de gravité d'un cheval se trouve sous la 13^{ème} vertèbre sur la ligne joignant la pointe de l'épaule et la pointe de la hanche ; soit, en fonction de la morphologie du cheval, plus ou moins sur la ligne du passage de sangle, un peu en arrière du garrot » (Buchner *et al.*, 2000 ; Patigny, 2023). En pratique, le centre de gravité (illustré par la figure 2) et le centre géométrique sont proches mais pas exactement au même endroit.

La force de pesanteur (P) se calcule ainsi : $P = m \times g$

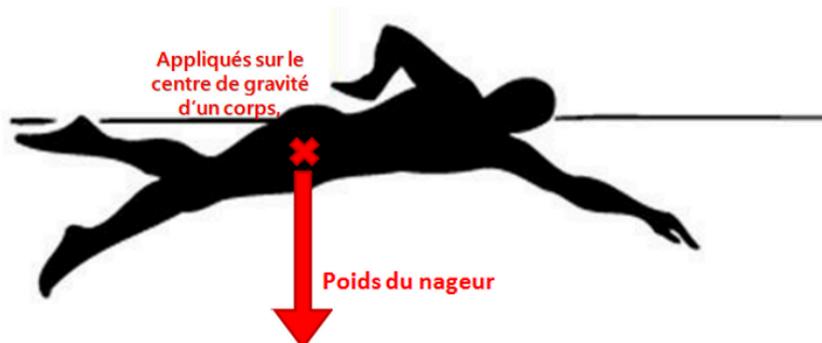
Où m est la masse du corps en kg et g la constante de gravitation sur Terre en N/kg.

Figure 2 : Illustration du centre de gravité du cheval à l'arrêt d'après Buchner *et al.* (2000)



Le centre de gravité sur cette figure est représenté par la croix entourée au niveau de la 13^{ème} côte.

Figure 3 : Illustration de la force de pesanteur d'après Richard *et al.* (2015)



c. La flottabilité

La flottabilité désigne l'équilibre statique en milieu aquatique. Cet équilibre est trouvé lorsque les forces de pesanteur et d'Archimède sont alignées (Futura-Sciences, 2023).

Cette flottabilité dépend avant tout de la densité du sujet et du milieu (un sujet flotte plus facilement dans de l'eau salée car celle-ci a une densité plus élevée par exemple) (Tisba, 2006). Dans le contexte de la nage en piscine, le cheval flotte car sa densité est globalement inférieure à celle de l'eau. Mais cette flottabilité n'est pas la même selon les parties du corps. En effet, la densité des os, des muscles ou encore de la graisse est différente (respectivement 1.5, 1.1 et 0.9) (Tisba, 2006 ; Université de Rennes, 2023). Nous pouvons donc affirmer que la tête et les membres auraient tendance à couler tandis que la cage thoracique, d'un grand volume chez le cheval, lui permet de flotter.

d. Le poids apparent

D'après McClintock *et al.* (1987), le poids d'un cheval immergé dans l'eau ne correspond pas réellement au poids calculé sur terre. En effet, le poids apparent correspond au poids réel, auquel le poids du fluide déplacé lors de l'immersion est retiré, autrement dit via la poussée d'Archimède.

Ce poids se calcule de la façon suivante : $E = P - S$

Où E est le poids apparent en kg, P le poids réel du cheval sur terre en kg, S le poids de la force d'Archimède en kg.

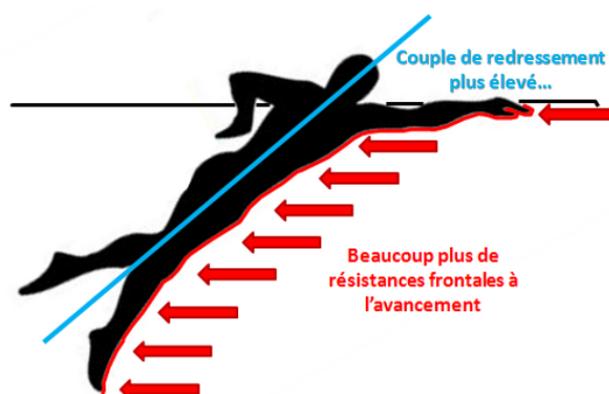
Il est intéressant de noter que plus le corps est immergé, plus le poids de fluide déplacé est important et donc le poids apparent moindre. Selon l'étude de McClintock *et al.* (1987), lorsque qu'un cheval est immergé dans un volume d'eau dont la limite est le *tuber coxae*, son poids est alors réduit de 75 %. Par comparaison, lorsque cette limite se situe au niveau du coude, le poids est réduit de 10,5 %. La réduction du poids est donc inversement corrélée à la profondeur de l'eau (Muñoz *et al.*, 2019a). Ceci présente un intérêt tout particulier puisque l'immersion permet alors de réduire la charge pesant sur les articulations et muscles du cheval lors de l'exercice.

e. Les résistances

Différentes résistances s'opposent à l'avancement du cheval dans l'eau. Elles sont liées à la vitesse de déplacement, à la surface et à la forme du cheval dans l'eau. Il est important de se souvenir qu'en multipliant la vitesse par deux, la résistance sera multipliée par quatre, ce qui peut être intéressant dans le contexte d'un entraînement en milieu aquatique (Sultana, 1977).

- La résistance frontale (illustrée par la figure 4) dépend de la surface qu'oppose le cheval à l'avancement. Par le volume que le cheval représente, cette force est plus impliquée dans l'exercice que pour l'Homme. Elle est difficilement modulable contrairement à un Homme qui nage, car l'Homme peut adapter sa position dans l'eau (par exemple être le plus horizontal possible afin d'aller plus vite, contrairement au cheval qui ne peut pas s'aplanir).

Figure 4 : Illustration de la résistance frontale d'après Richard *et al.* (2015)



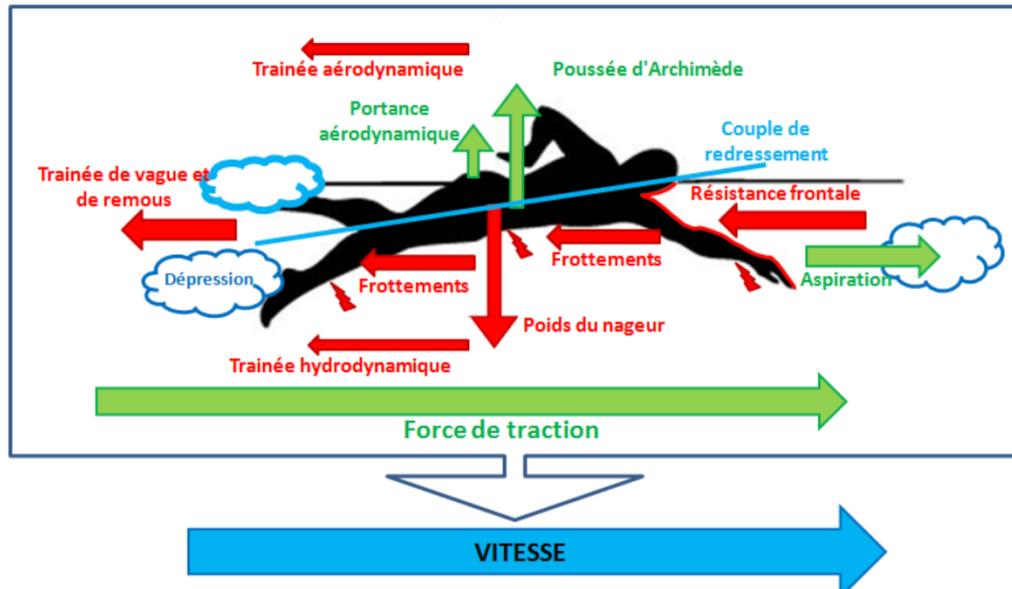
- La résistance de forme dépend du profil hydrodynamique du cheval, autrement dit plus le corps du cheval est allongé et plus ces résistances sont faibles (Tisba, 2006).
- La résistance de frottement correspond à la modification de l'écoulement de l'eau, caractérisé de turbulent sur le cheval. Cette résistance est notamment augmentée par les poils (Sherwood *et al.*, 2016).

Microscopiquement, les molécules d'eau adhèrent sur le corps du cheval puis se détachent et modifient leur vitesse jusqu'à atteindre celle du fluide, cela crée des forces de viscosité et les molécules rebondissant dans toutes les directions créent des turbulences.

- La résistance de vague correspond à des zones de hautes pression (turbulences) se caractérisant par des vagues créées par le plan d'eau ou par la nage du cheval. Elle est considérée chez l'Homme comme la force impactant le plus l'avancée d'un nageur (Tor *et al.*, 2015).

Un récapitulatif des forces s'exerçant lors de la nage est présenté par la figure 5 ci-dessous.

Figure 5 : Récapitulatif des forces impliquées lors de la nage d'après Richard *et al.* (2015)



B. Les échanges thermiques

Les échanges thermiques d'un cheval immergé dans l'eau sont composés de quatre principaux mécanismes.

a. La conduction

La conduction correspond à un transfert de chaleur par contact direct, sans déplacement macroscopique de matière. Elle se réalise donc de proche en proche, du corps le plus chaud au corps le plus froid. L'agitation thermique des molécules du corps le plus chaud entraîne une collision avec les molécules plus lentes du corps le plus froid, permettant une accélération de ces particules et un réchauffement (Sherwood *et al.*, 2016).

Ce mécanisme dépend surtout de la conductivité thermique des milieux. En effet, la conductivité de l'eau est de 0,6 W/m/K à 20°C tandis que celle de l'air est de 0,026 W/m/K (soit 25 fois plus conductrice), le refroidissement du corps se fait donc plus rapidement dans l'eau. Ceci est un avantage lors de la nage puisque cela permet une déperdition efficace de la chaleur créée par le travail du cheval.

b. La convection

La convection désigne un mouvement macroscopique causé par une différence de température. Selon Roussel (2014), « c'est un mode de transfert thermique qui implique un déplacement de fluide. La matière chaude en se déplaçant cède de l'énergie aux particules plus froides ».

Elle peut être naturelle, c'est-à-dire que c'est le gradient de température qui crée le mouvement du fluide, ou bien forcée, où dans ce cas la circulation du fluide est artificielle. Ce mode de transfert d'énergie s'effectue surtout grâce à la respiration (Sherwood *et al.*, 2016).

c. L'évaporation

Le cheval a la capacité de sudation la plus élevée des animaux endothermes selon Collier et Gebremedhin (2015) ; cette dernière correspond au double de l'humain. La sudation représente 71 % de l'évaporation tandis que les 29 % restants le sont grâce à la respiration. En temps normal, un cheval au galop à une vitesse de 10 m/s peut suer jusqu'à 2400 g/m²/h, mais qu'en est-il dans l'eau ?

La sudation nécessitant un contact avec l'air, il apparaît évident que celle-ci est presque inexistante compte tenu du volume du cheval immergé lors de la nage. Cependant, bien qu'il n'y ait pas d'étude disponible chez le cheval, les nageurs humains suent lorsqu'ils nagent. L'étude de Henkin *et al.* (2010) a d'ailleurs conclu qu'il existe une différence significative entre la production de sueur d'un coureur et celle d'un nageur (0,33 ml/kg/min et 0,20 ml/kg/min respectivement). Bien qu'il n'y ait aucune valeur disponible chez le cheval, l'étude de Murakami *et al.* (1976) a néanmoins permis d'observer que lors des exercices en piscine, les chevaux suaient de la tête et que cette sudation paraissait proportionnelle à l'intensité du travail.

Nous retiendrons donc que, bien qu'étant un mécanisme indispensable au refroidissement du cheval lorsque ce dernier est au contact de l'air, la sudation intervient peu lors de la nage.

Concernant la marche en tapis immergé, aucune étude ne s'est intéressée à la sudation provoquée par cet exercice. Seule l'étude de Fleming *et al.* (2014) rapporte une absence de sudation lors de l'exercice imposé.

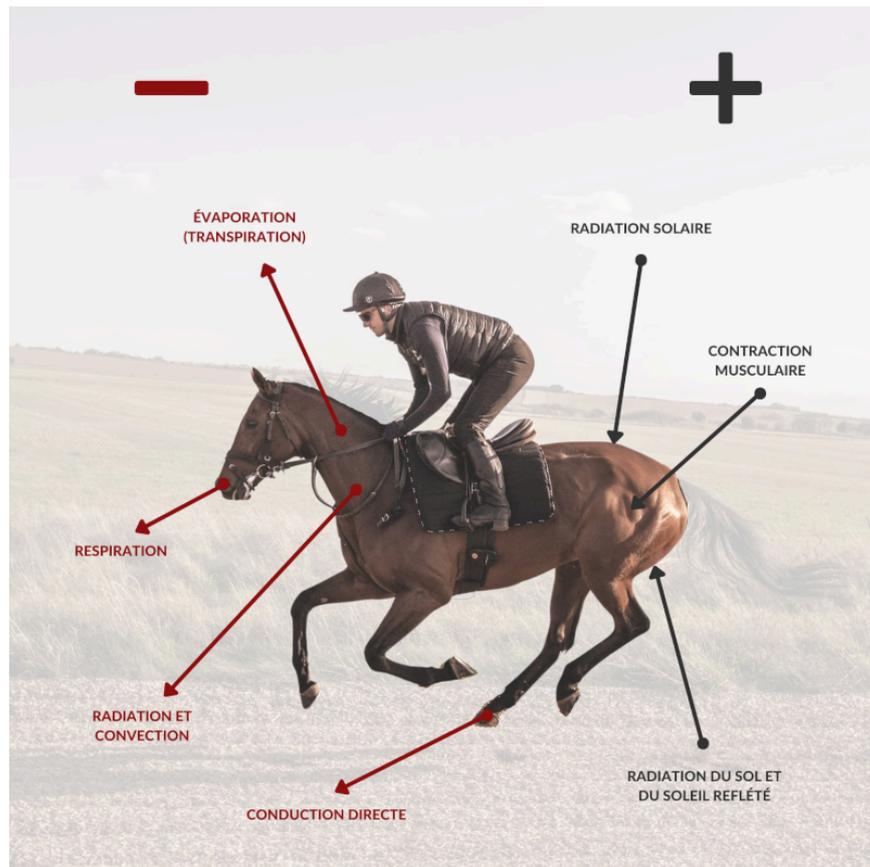
d. Le rayonnement

Il s'agit d'un transport d'énergie par la propagation d'ondes électromagnétiques. Tout corps porté à une température émet un rayonnement électromagnétique dit rayonnement thermique dont l'intensité augmente avec la température (Roussel, 2014).

D'après Hodgson *et al.* (1994), ce mécanisme joue un rôle mineur dans la perte de chaleur durant l'exercice classique sur la terre ferme, mais il intervient davantage lors de la nage.

La figure 6 illustre les différents mécanismes impliqués dans la thermorégulation du cheval.

Figure 6 : Schéma récapitulatif de la thermorégulation chez le cheval d'après Arineo (2022)



e. Importance des échanges thermiques et de la température de l'eau

Le travail musculaire produit 25 % de contractilité et 75 % de chaleur, il est donc primordial que cette chaleur puisse être évacuée lors du travail (Sherwood *et al.*, 2016).

Lorsque le cheval est dans une situation de neutralité thermique avec son environnement, les échanges thermiques sont moindres et la température corporelle devrait rester stable. Si la température de l'eau est en dessous de la température de neutralité thermique, alors il se produira une vasoconstriction périphérique, une augmentation du retour veineux et donc un volume cardiaque plus important ainsi qu'une diminution de la fréquence cardiaque. Cette différence de température permettra également au cheval d'évacuer la chaleur produite par conduction essentiellement. Si la température de l'eau est à l'inverse plus chaude, il se produira alors l'inverse (vasodilatation, augmentation de la fréquence cardiaque) (Nankervis *et al.*, 2008). La température de neutralité thermique dans l'eau chez le cheval n'est pas connue, mais celle de l'humain a été définie entre 33 et 35°C (Choukroun et Varene, 1990 ; Nankervis *et al.*, 2008). Bien qu'elle soit inconnue chez le cheval, cette température est suspectée comme moindre que celle rapportée chez l'Homme compte tenu de la plus grande masse musculaire et de la plus faible surface cutanée (Nankervis *et al.*, 2008).

De ce fait, la température de l'eau a une importance considérable sur les paramètres physiologiques chez le cheval et peu d'études évaluent cet impact. Il faudra donc en tenir compte lors de l'exposé de l'influence de la nage ou de la marche en tapis aquatique sur les valeurs

physiologiques du cheval (notamment les paramètres cardio-circulatoires, les lactates et la température rectale).

La température de l'eau a également de possibles effets bénéfiques. Par exemple, Lafon (2015) rapporte qu'une eau chaude permet une vasodilatation et donc un apport de sang favorisé aux tissus et une meilleure oxygénation. Cette augmentation de perfusion des tissus permettrait une meilleure dissipation des médiateurs inflammatoires (impliqués lors d'inflammation locale et de douleur)(King, 2016 ; King *et al.*, 2013). Une immersion dans de l'eau chaude aurait également un impact direct sur la nociception. Son action sur les récepteurs thermiques locaux entrainerait une augmentation de synthèse d'opioïdes endogènes d'après Coruzzi *et al.* (1988). Par ailleurs, un cheval immergé dans une eau à 38°C pendant 15 minutes montrerait une augmentation d'activité du système nerveux parasympathique d'après Kato *et al.* (2003).

Une eau plus froide permet une analgésie voire une résorption des œdèmes par vasoconstriction périphérique et baisse de la perfusion tissulaire pouvant atteindre les 80 % (King, 2016). Cette baisse de perfusion tissulaire entraîne une diminution de la libération de médiateurs inflammatoires, une inhibition de certaines enzymes de dégradation ainsi qu'une réduction de la demande en oxygène cellulaire (Algaflly et George, 2007). Buchner et Schildboeck (2006) confirment la potentielle analgésie secondaire à une baisse de conduction nerveuse lors d'immersion dans de l'eau froide. Les effets thérapeutiques de l'eau froide sont considérés comme présents lorsque la température des tissus se situe entre 10 et 15°C (Petrov *et al.*, 2003).

C. Cinématique de la nage et de la marche en milieu aquatique

a. Cinématique de la nage

Certaines études indiquent que les chevaux nagent plutôt naturellement et ces propos semblent être confirmés par le Dr Moiroud, responsable du secteur physiothérapie et réhabilitation au CIRALE. D'autres indiquent au contraire que les chevaux ne nagent pas naturellement (King, 2016 ; Muñoz, 2018 ; Muñoz *et al.*, 2019a). Il apparaît cependant que le cheval doit être tenu de chaque côté de la tête et parfois à la croupe lors des premières immersions afin d'éviter les pertes d'équilibre selon le Dr Moiroud.

L'allure de la nage ressemble au trot ou à l'amble selon Murakami *et al.* (1976). Le corps du cheval est immergé, seule la tête sort et les mâchoires sont fermées ; cette position entraîne une extension thoraco-lombaire, cervicale et pelvienne. Les antérieurs permettent de diriger et équilibrer le cheval tandis que les postérieurs sont chargés de la propulsion (Muñoz *et al.*, 2019b ; Murakami *et al.*, 1976).

La nage entraîne une plus grande amplitude et une plus grande extension du coude et du carpe en comparaison avec l'exercice sur sol dur ou sur tapis immergé. La flexion du carpe est également plus prononcée. L'amplitude du boulet est en revanche plus faible lors de la nage car l'extension est moindre en raison de l'absence de phase d'appui (Santosuosso *et al.*, 2021a).

Concernant les membres postérieurs, la nage entraîne une réduction d'extension du boulet associée à une augmentation de flexion (l'amplitude est stable) par rapport à la marche en tapis immergé. La flexion et l'amplitude du grasset et du tarse sont accrues (Santosuosso *et al.*, 2021b).

b. Cinématique de la marche en tapis immergé

L'eau permet au cheval de flotter et ainsi l'aide à soulever son membre sur le plan vertical, mais avec une résistance augmentée sur le plan horizontal (Scott *et al.*, 2010). Cette même étude a montré que la marche en tapis immergé entraîne une foulée plus lente mais plus grande. Nous pouvons également retenir que la marche en milieu aquatique permet une réduction de protraction des antérieurs mais une plus grande protraction et rétraction des postérieurs (Nankervis *et al.*, 2017 ; Nankervis et Lefrancois, 2018). En complément, l'étude de Muñoz *et al.* (2019a) a montré un déplacement dorso-ventral du centre de gravité du cheval dépendant de la profondeur de l'eau.

La marche en tapis immergé entraîne donc une foulée plus grande et plus lente, une flexion augmentée des articulations distales des membres et une flexion augmentée de la région lombaire (King, 2016 ; Mooij *et al.*, 2013 ; Nankervis *et al.*, 2016). Cette dernière permet également un déplacement du centre de gravité, effet pouvant être recherché chez les chevaux de dressage ou de CSO et apparaissant comme persistant sur le terrain (Muñoz *et al.*, 2019a).

Immédiatement après une séance sur tapis roulant aquatique, il a été démontré que l'amplitude de mouvement du carpe et du coude était augmentée, bien que huit jours d'exercice sur tapis roulant aquatique n'aient pas eu d'effet durable sur la démarche au sol. De même, il n'existe encore aucune preuve que l'entraînement sur tapis roulant aquatique ait un effet sur la locomotion aérienne lorsqu'il est utilisé régulièrement dans le cadre d'un programme d'entraînement traditionnel (Nankervis *et al.*, 2021).

2. Principes techniques de l'entraînement en milieu aquatique

Ces principes dépendent de chaque cheval et nécessitent d'adapter l'exercice (dans le cadre de l'entraînement ou de la réhabilitation) en modifiant la vitesse, la fréquence, la durée d'exercice et la profondeur d'eau. Selon les objectifs des études réalisées sur ce sujet mais aussi selon la formation que les fabricants proposent aux utilisateurs, l'exercice en milieu aquatique diffère en tous points dans les publications.

A. Principes appliqués à la nage en piscine

a. Construction

Il existe différents types de piscine. La piscine peut être ronde comme dans l'étude de Irwin et Howell (1980), Tokuriki *et al.* (2010) ou encore Murakami *et al.* (1976). Leur diamètre varie de 11 à 15 mètres, sauf pour l'étude de Nicholl *et al.* (1978) dans laquelle le diamètre est de 5,5 mètres. L'étude de Galloux *et al.* (1992) a par exemple eu recours à un bassin rectangulaire de 60 mètres de périmètre. D'autres piscines sont en forme de « couloirs » longs comme dans les études de Santosuosso *et al.* (2021a) et de Santosuosso *et al.* (2022) dans lesquelles ce dernier fait 100 mètres de longueur. Le couloir peut également être plus court (25 mètres) dans le cadre des entraînements avec un cheval attaché à la queue comme dans l'étude de Jones *et al.* (2020). Il existe également des piscines sous forme de couloir ovale comme celles utilisées dans l'étude de Klomp *et al.* (2014) ou de Garcia et Beech (1986). La piscine du CIRALE de l'EnvA est quant à elle un couloir en forme de U, pouvant se fermer via un système de « ponts » et devenir un ovale afin d'adapter l'exercice. Cette piscine mesure environ 50 mètres de longueur (figures 7, 8 et 9).

Figure 7 : Vue d'ensemble de la piscine du CIRALE de l'EnvA (crédit EnvA)



Figure 8 : Vue rapprochée du bassin du CIRALE de l'EnvA (crédit EnvA)



La forme de la piscine dépend le plus souvent de la place disponible dans le bâtiment, la piscine circulaire prenant moins de place. L'inconvénient est que le cheval doit s'incurver lors des virages dans ce type d'installation. Ces piscines sont presque exclusivement des équipements intérieurs, comprenant des installations dédiées telles que des box, des aires de préparation avec douche ou des aires de récupération disposant d'un solarium par exemple.

Les profondeurs et largeurs varient selon les études mais sont en général suffisantes pour permettre au cheval d'évoluer sans contrainte. Dans l'étude de Irwin et Howell (1980) par exemple, la profondeur de la piscine est de 2,7 mètres ; elle est de 2,5 mètres dans celle de Galloux *et al.* (1992) et de 3 mètres au CIRALE de l'EnvA et dans les études de Murakami *et al.* (1976), Tokuriki *et al.* (2010), Jones *et al.* (2020), Santosuosso *et al.* (2021a) ou encore Santosuosso *et al.* (2022). La profondeur d'une piscine peut aller jusqu'à 3,7 mètres (Nicholl *et al.*, 1978) ou même 5 mètres (Garcia et Beech, 1986).

L'angle d'entrée dans la piscine varie entre 15 et 20 degrés selon les études.

Figure 9 : Plateforme d'accès à la piscine du CIRALE de l'EnvA (crédit EnvA)



Différents types d'entretien sont pratiqués dans les piscines des études. Celui-ci reste indispensable pour la filtration des particules et le contrôle des algues. Irwin et Howell (1980) rapportent qu'il existe un système de filtre à sable et balai automatique dans leur étude mais que l'on peut aussi utiliser du sulfate de cuivre, du chlore ou encore de l'acide chlorhydrique pour assurer la stabilité de l'eau. Le changement de l'eau peut être régulier, hebdomadaire et il peut exister un vide sanitaire annuel dans certains centres d'après Lafon (2015). Pour exemple, la piscine du CIRALE de l'EnvA est vidangée une fois par an. L'eau est filtrée entièrement en trois heures et traitée au chlore. Des contrôles quotidiens sont réalisés et un robot aspirateur permet de nettoyer le fond de la piscine y compris les crottins. Cette piscine dispose également d'un système à débordement permettant de filtrer d'une autre manière les particules en surface et certains crottins, d'après le Dr Moiroud.

b. Durée et types d'exercices

Aucun « entraînement type » n'est décrit dans la littérature, premièrement parce qu'il n'existe pas de consensus à ce sujet, mais aussi parce que chaque séance et chaque programme dépendent de la pathologie du cheval, des objectifs du propriétaire et du mode choisi (entraînement en piscine seule ou en association avec l'entraînement habituel). Au CIRALE par exemple, le Dr Moiroud rapporte que chaque entraînement varie, mais que certaines séquences sont souvent retrouvées quel que soit l'objectif ou le mode choisi. Une séance a lieu minimum deux fois par semaine, ou cinq jours sur sept lorsque le cheval ne s'exerce qu'en piscine. Lorsque l'objectif est l'entraînement, les vétérinaires utilisent un type d'exercice fractionné. C'est-à-dire que le cheval s'échauffe par un tour de piscine à chaque main, puis il réalise deux à trois fractions comportant chacune plusieurs tours enchaînés (jusqu'à cinq tours) correspondant à environ trois minutes de nage et trois minutes de marche active entre chaque fraction. Chaque séance dure environ 25 minutes. Lorsque le cheval travaille cinq jours sur sept en piscine, les séances sont adaptées, deux séances au rythme expliqué précédemment sont réalisées, puis sont ajoutées des séances plus légères les trois autres jours.

Les protocoles utilisés dans les publications sur lesquelles s'appuie cette thèse sont résumés dans le tableau ci-après (tableau 1).

Tableau 1 : Protocoles des études en piscine

Publication	Effectif	Exercice proposé
(Murakami <i>et al.</i> , 1976)	4 chevaux pur-sang Non entraînés	Durée 1 mois Expérience 1 : 5, 10 et 20 min sur 3 jours différents Expérience 2 : 5 à 20 minutes/jour progressivement sur 3 semaines Expérience 3 : 60 minutes
(Nicholl <i>et al.</i> , 1978)	10 chevaux de recherche Races variées	Un tour 3 ou 4x/jour les premiers jours puis augmentation progressive entre 1 et 10 min
(Thomas <i>et al.</i> , 1980)	3 chevaux pur-sang 1 demi-sang 1 trotteur américain	3-5 min de nage « échauffement » puis 3 min de repos puis 5 min de nage « retenue »
(Irwin et Howell, 1980)	170 chevaux pur-sang à l'entraînement 25 chevaux ONC	2 tours 3 fois par semaine puis 10 tours au bout de 3 semaines
(Misumi <i>et al.</i> , 1994a)	24 chevaux pur-sang de 2 ans Habitué 2 mois à la natation	Durée 5 mois 3 groupes de 8 chevaux : - Course sur piste - Course + 300m de nage par jour (2 mois) puis course + 500m de nage par jour (3 mois) - Course + 300m de nage par jour (5 mois) + test « standardisé de tolérance » : 3 x 100m de nage à différentes vitesses Course 6 j/7 et nage 4j/7
(Misumi <i>et al.</i> , 1994b)	7 chevaux pur-sang de 2 ans Non débouffés Habitué 2 mois à la natation	En parallèle d'un entraînement sur piste de 4 mois (avec intensité progressive dans le temps) et de 200m de nage 1j/semaine Test standardisé en piscine 3j avant l'entraînement, 2 mois et 4 mois après le début : 3 x 100m à différentes vitesses

(Misumi <i>et al.</i> , 1995)	18 jeunes chevaux pur-sang	Durée 5 mois Course sur tapis + nage 300m tous les jours pendant 2 mois puis nage 500m tous les jours ou course + nage 300 m tous les jours
(Hobo <i>et al.</i> , 1998)	5 jeunes chevaux pur-sang	Échauffement : 20 min pas + 80 m nage + 10 min pas Exercice : 6 tours de piscine (6 x 50m) discontinus
(Davie <i>et al.</i> , 2008)	14 chevaux pur-sang	Durée 9 semaines 2 groupes : - Piste + tapis de course 6j/7 - Piste + tapis de course 6j/7 + nage 4 tours jusqu'à 6 ou 8 tours (augmentation progressive)
(Tokuriki <i>et al.</i> , 2010)	6 chevaux pur-sang	Marche sur sol dur puis 3 tours de piscine (circulaire) puis pas et trot en tapis immergé
(Piccione <i>et al.</i> , 2010)	2 chevaux pur-sang italiens	3 min de nage
(Kang <i>et al.</i> , 2012)	4 chevaux croisés entraînés Non habitués	10 min de nage par jour pendant 14 jours
(Klomp <i>et al.</i> , 2014)	52 chevaux pur-sang à l'entraînement	2 tours de piscine (120 m) 6 jours par semaine + entraînement sur piste ces 6 mêmes jours
(Bonelli <i>et al.</i> , 2017)	12 chevaux pur-sang	Durée 1 mois 30 min de nage par jour la première semaine puis ajout de 10 min chaque semaine, jusqu'à 60 min
(Jones <i>et al.</i> , 2020)	8 chevaux de course Déjà entraînés à nager attachés en piscine	2 min de nage retenue à l'arrière par un élastique (nage sur place)
(Santosuosso <i>et al.</i> , 2022)	16 chevaux pur-sang arabe (endurance), entraînés à la natation depuis 2 mois	5 x 75m en ligne droite + phase de récupération de 100m au pas actif entre chaque
(Leguillette <i>et al.</i> , 2022)	4 chevaux pur-sang arabe Endurance	Non détaillé
(Vinardell <i>et al.</i> , 2023)	15 chevaux d'endurance (entraînés à la natation)	5 x 70m de nage + entraînement de base (90 min montés + 90 min marcheur)

Après lecture de ce tableau, il apparaît que les premières études ont principalement recours à des chevaux de course. Certains protocoles sont très limités dans le temps et se basent sur des faits observés à un instant t, d'autres s'inscrivent dans un suivi longitudinal. La nage est dans la grande majorité libre (c'est-à-dire que le cheval est maintenu via des longes mais sans contrainte ni résistance) mais certains protocoles utilisent un système d'attache arrière imposant au cheval de nager sur place (le cheval est en général maintenu via un système d'attache supplémentaire entre la queue et une paroi ou un mur), et entraînant donc des résistances supplémentaires. Les protocoles sont tantôt simples (utilisation de la piscine seule) tantôt mixtes (utilisation de tapis immergé, entraînement sur piste).

Murakami *et al.* (1976) rapportent que les exercices durent la plupart du temps entre 5 et 60 minutes. Ces mêmes auteurs observaient des signes de fatigue après 20 minutes de nage. Ces signes étaient caractérisés par des coups de pied ou une raideur.

Steel *et al.* (2019) ont dans leur étude questionné 270 entraîneurs. Les chevaux pratiquaient quatre sessions par semaine (médiane) et chaque session durait entre 1,5 et 30 minutes (médiane de 7 minutes). La nage libre était utilisée dans 78,4 % des cas.

c. Vitesse

La lecture des différentes publications montre de faibles différences concernant la vitesse de nage. Celle-ci est la plus souvent spontanée, c'est-à-dire que le cheval adopte le rythme dans lequel il se sent le plus à l'aise. La vitesse peut être augmentée si l'on stimule le cheval à la voix ou via le système d'attache par exemple. Dans l'étude de Tokuriki *et al.* (2010), le cheval nage à une vitesse de 1,5 m/s en moyenne tandis que la vitesse moyenne est de 1,1 m/s dans celle de Santosuosso *et al.* (2021a) et de 1,2 m/s dans celle de Santosuosso *et al.* (2022). Des vitesses plus lentes sont observées dans l'étude de Murakami *et al.* (1976) où elles varient entre 0,62 et 1,1 m/s et dans celle de Klomp *et al.* (2014) où la vitesse moyenne est de 1,06 m/s. Une vitesse similaire est retrouvée dans l'étude de Hobo *et al.* (1998) et de Kang *et al.* (2012).

Il est intéressant de noter que l'étude de Santosuosso *et al.* (2021a) a mis en évidence une variation de cette vitesse selon le nombre de tours effectués (fatigue, stress), l'expérience du cheval, la motivation du meneur ou la présence d'un autre cheval sur un couloir parallèle. L'étude du même auteur réalisée plus tard n'a quant à elle montré aucune variation selon la durée d'exercice (Santosuosso *et al.*, 2022), tout comme l'étude de Murakami *et al.* (1976).

La vitesse de nage est plutôt propre à chaque cheval et reproductible dans le temps comme explicité dans l'étude de Klomp *et al.* (2014). Cette même étude montre par ailleurs qu'il n'y a pas de lien entre la vitesse de nage et la performance du cheval en course (cette performance correspondant à une note calculée selon les courses réalisées avant et pendant l'étude).

d. Température

La température de l'eau varie également selon les études, mais elle correspond souvent à une température confortable pour les chevaux mais n'entraînant pas le développement de bactéries et algues. L'étude de Galloux *et al.* (1992) justifie ainsi une température maintenue entre 14 et 16°C. La température de l'eau de la piscine du CIRALE varie entre 15 et 20°C selon la saison.

Il existe cependant des études dans lesquelles la température de l'eau atteint des valeurs plus élevées allant de 28°C (Thomas *et al.*, 1980) à 30°C (Murakami *et al.*, 1976) ou 31°C (Nicholl *et al.*, 1978 ; Santosuosso *et al.*, 2022).

Les études mentionnées dans ce manuscrit n'indiquent pas toutes la température à laquelle les chevaux sont immergés, ce qui apparaît être un élément manquant à certaines conclusions ou comparaisons puisque l'on sait que les échanges thermiques influent sur de nombreuses constantes physiologiques comme la fréquence cardiaque ou encore les résistances artérielles et veineuses périphériques.

B. Principes appliqués à la marche en tapis immergé

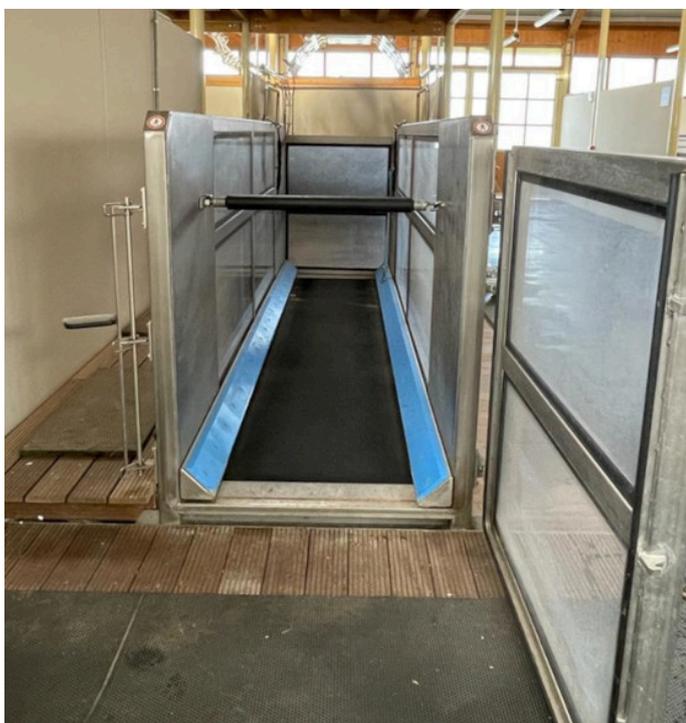
Les tapis immergés sont à peu près similaires dans les études et sur le marché. Leur prix varie de 60000 à 70000 euros selon Lafon (2015).

Les figures 10 et 11 correspondent à un type de tapis immergé, que l'on trouve au CIRALE de l'EnvA par exemple.

Figure 10 : Vue de côté du tapis immergé du CIRALE de l'EnvA (crédit EnvA)



Figure 11 : Vue arrière du tapis immergé du CIRALE (crédit EnvA)



a. Caractéristiques du travail (durée, vitesse et hauteur de l'eau)

Le consensus rapporte, d'après le résumé des expériences lues par ce comité d'experts, une durée d'exercice allant de 5 à 54 minutes (Nankervis *et al.*, 2021).

Les exercices imposés sont moins variés que lors de la nage en piscine, puisque le tapis immergé impose de rester sur place. Seules la hauteur de l'eau, la vitesse de défilement et l'application d'un courant contraire peuvent influencer l'intensité de l'exercice. Les tapis immergés ne possèdent pas de possibilité de pente contrairement aux tapis de course traditionnels.

Concernant les vitesses appliquées, le consensus rapporte une vitesse allant de 0,7 à 3,0 m/s pour le pas et de 3,0 à 5,0 m/s pour le trot. Les études présentées dans cette thèse vont également dans ce sens (voir tableau 2). La marche au pas est en général plus lente sur un tapis immergé (secondairement aux résistances appliquées) que sur un tapis sec ou sur piste.

Les protocoles varient bien évidemment selon les études, ils sont résumés dans le tableau ci-dessous. La publication de Tranquille *et al.* (2018) est intéressante car elle regroupe les habitudes d'utilisation de différents centres possédant un tapis immergé : les chevaux réalisent en moyenne sept séances par semaine ; ils sont échauffés activement avant exercice dans 45 % des centres et passivement dans 20 % des centres (solarium ou massage par exemple). La sédation est employée dans 70 % des cas (romifidine ou détominide associées ou non à de l'acépromazine) pour la première session d'acclimatation. L'habituation prend en moyenne entre deux et trois sessions, chacune durant entre 10 et 30 minutes à une vitesse de 1,6 m/s en moyenne.

Les protocoles utilisés dans les publications sur lesquelles s'appuie cette thèse sont résumés dans le tableau ci-après (tableau 2).

Tableau 2 : Protocoles des études en tapis immergé

Publication	Effectif	Exercice	Vitesse (m/s)	Hauteur de l'eau
(Voss <i>et al.</i> , 2002)	7 chevaux allemands	5 min de marche pendant remplissage + 20 min exercice + 5 min de marche pendant vidange 6 exercices : pas (sur tapis sec, eau au-dessus des carpes, eau au-dessus des coudes), trot (sur tapis sec, eau au-dessus des carpes, eau au-dessus des coudes)	Pas : 1,56 +/- 0,8 m/s Trot : 2,9 +/- 0,13 m/s	Au-dessus des carpes ou des coudes Max 1,20 m
(Nankervis <i>et al.</i> , 2008)	8 chevaux Habitué	16 minutes de marche à différentes températures : 13, 16 et 19°C (température ambiante entre 4 et 10°C)	Pas confortable : 1,1 m/s ou 1,4 m/s (selon le cheval)	A la hauteur de l'articulation scapulo-humérale
(Tokuriki <i>et al.</i> , 2010)	6 chevaux pur-sang	Marche sur le terrain puis nage en piscine puis marche en tapis immergé	Pas : 1,34 m/s Trot : 2,67 m/s	1,20 m
(Scott <i>et al.</i> , 2010)	9 chevaux dont 5 pur-sang et 4 warmblood Non habitués (sédatisés pour la 1 ^{ère} session)	Partie 1 : durée 6 jours Entre 15 et 30 min par jour Partie 2 : durée 3 jours Chaque jour 5 min à une hauteur différente (+ 5 min échauffement + 5 min récupération) + entraînement hors tapis	0,9 m/s	Partie 1 : entre le sabot et l'ulna (augmentation progressive jour après jour) Partie 2 : articulation interphalangienne proximale, ulna ou carpe
(Borgia <i>et al.</i> , 2010)	5 chevaux Habitué	5 jours par semaine pendant 4 semaines De 5 à 20 min (augmentation de 5 min chaque semaine)	2 m/s	Abdomen ventral
(Lindner <i>et al.</i> , 2012)	10 chevaux allemands	Étude 1 : 3 SET espacés de 1 semaine chacun SET 1 : 25 min avec vitesse en augmentation de 0,5 m/s toutes les 5 min SET 2 et 3 IDEM (seule la hauteur d'eau change) Échauffement et récupération : 5 minutes dans le tapis immergé	1,6 m/s pour l'échauffement et la récupération De 3,5 à 5,5 m/s	SET 1 : eau 10 % hauteur garrot SET 2 : eau 50 % hauteur garrot SET 3 : eau 80 % hauteur garrot

		Étude 2 : 5 étapes de 5 minutes (25 min) avec augmentation progressive du niveau d'eau	5,5 m/s (constante)	Niveau d'eau/garrot : 20 %, 35 %, 49 %, 63 %, 77 %
(Vincze <i>et al.</i> , 2013)	8 chevaux de CSO	3 jours/semaine : 10 min de pas puis 30 min de trot puis 5 min de pas + entraînement de base (y compris saut) 6j/7	Pas : 1,25 m/s Trot : 3,6 m/s	15 cm au-dessus de l'épaule
(Fleming <i>et al.</i> , 2014)	7 chevaux Habitué	Durée 3 jours 15 min à chaque hauteur	Pas actif mais confortable : 1,6 m/s (moyenne)	- Sans eau - Articulation interphalangienne proximale - Carpe
(Firschman <i>et al.</i> , 2015)	6 Quarter Horse Habitué	2 x 6 semaines (aléatoires) : de 16 à 40 min (augmentation 1min/j) 6 semaines de tapis sec (5j/semaine) 6 semaines de tapis immergé (5j/semaine) 60 jours de repos entre chaque	1,5 m/s	Jusqu'à l'olécrâne
(Vincze <i>et al.</i> , 2016)	4 chevaux de CSO	Durée : 14 jours 44 minutes : 10 min de pas, 30 min de trot et 4 min de pas + entraînement de base	Pas : 1,25 m/s Trot : 3,6 m/s	85 % de la hauteur au garrot
(Greco-Otto <i>et al.</i> , 2017)	15 Quarter Horse Habitué	Durée 3 jours (chaque jour à une hauteur différente) : 21 min : 2 min par vitesse, pré et post exercice (sans eau) + 3 minutes à chaque vitesse	Pas confortable : 1,11 m/s, 1,25 m/s et 1,39 m/s	A la hauteur mi-canon, du carpe ou de la patella ou sans eau (contrôle)
(Muñoz, 2018)	6 chevaux	4 sessions de 40 min (sans précision)	1,6 m/s	- Sans eau - Articulation métacarpo /métatarso-phalangienne - Tarse - Grasset

(Greco-Otto <i>et al.</i> , 2020)	18 chevaux pur-sang	Durée : 18 jours (5 jours par semaine) De J1 à J8 : augmentation progressive du temps de travail et de la hauteur De J9 à J18 : 20 minutes à hauteur maximale Avant et après l'entraînement aquatique, sur piste : 300 m à 4m/s, 300m à 6m/s, 300 m à 8m/s puis 800 m de galop à vitesse maximale	1,45 m/s	J1 et J2 : carpe A partir de J3 : grasset Un groupe contrôle (sans eau), différent du groupe en tapis immergé
-----------------------------------	---------------------	--	----------	---

b. Température et entretien de l'eau

La température de l'eau utilisée dans un tapis immergé varie selon les études mais se trouve dans un intervalle plutôt restreint situé entre 13 et 22°C (tableau 3). L'eau est en moyenne plus froide que lors de nage en piscine. Le tableau ci-après résume les températures utilisées dans les publications disponibles sur le sujet. Notons que certaines études ne rapportent pas la température de l'eau, sachant que cette donnée a un impact considérable sur l'observation des valeurs physiologiques mesurées, il peut être regrettable de ne pas avoir accès à cette information.

Tableau 3 : Comparaison des différentes températures moyennes de l'eau utilisée lors de la marche en tapis immergé (en °C)

Études	Température moyenne de l'eau (en °C)
(Nankervis <i>et al.</i> , 2008)	13, 16 et 19°C
(Tranquille <i>et al.</i> , 2018)	13°C
(Greco-Otto <i>et al.</i> , 2017) (Scott <i>et al.</i> , 2010) (Greco-Otto <i>et al.</i> , 2020)	14°C
(Lindner <i>et al.</i> , 2010) (Lindner <i>et al.</i> , 2012)	20°C
(Vincze <i>et al.</i> , 2016)	21°C
(Vincze <i>et al.</i> , 2013)	22°C

La publication de Tranquille *et al.* (2018), consistant en un interrogatoire sur les pratiques de plusieurs centres disposant d'un tapis immergé, a permis de préciser ces pratiques. Concernant l'eau utilisée dans les tapis, la grande majorité avait recours à de l'eau fraîche tandis qu'un petit nombre s'approvisionnaient en eau salée. Cette eau était changée à des fréquences différentes, allant de chaque séance à toutes les cinq séances (le plus fréquent) ou bien jamais. Les centres recyclant l'eau utilisaient des systèmes de filtration au sable ou au charbon dans la majorité des cas. Il existe aussi des systèmes de filtration par ultraviolets. Le traitement de l'eau s'effectuait le plus

souvent à l'aide de chlore ou d'hypochlorite de sodium. Au CIRALE de l'EnvA, l'eau est filtrée et stockée dans des cuves puis traitée par du chlore. Le centre réalise des vidanges régulières de ces cuves d'après le Dr Moiroud.

C. Bonnes pratiques d'utilisation

a. Tapis immergé

En 2020, Nankervis *et al.* (2020) ont créé un guide des bonnes pratiques d'utilisation du tapis immergé chez le cheval afin d'harmoniser les utilisations (voir annexe 1). En effet, l'étude de Tranquille *et al.* (2018) rapportait de nombreuses blessures sur les chevaux ou leurs meneurs. Ce guide de bonnes pratiques a donc pour objectif la sécurité du cheval et du personnel durant l'exercice.

- Généralités

Tout d'abord, il apparaît primordial d'assurer un entretien correct du matériel, en suivant les recommandations du fabricant.

Concernant le meneur, il doit être correctement formé et équipé. L'idéal étant d'avoir un meneur de chaque côté du cheval, et que celui-ci ne se trouve jamais devant ou derrière, durant toutes les étapes de la procédure (entrée, entraînement et sortie).

Avant la séance, il convient de s'assurer que le cheval ne présente aucune blessure, n'ait pas eu d'injections intra-articulaire dans les quatre jours, ait les fers bien fixés, sans matériel pouvant abîmer le tapis. Le cheval doit être propre, les pieds curés.

Le cheval peut être mené en licol ou en bridon, le tout devant assurer le contrôle du cheval sans imposer de contraintes aux mouvements de ce dernier. Les protections de membre ne sont pas indiquées au risque de blesser le cheval (sauf indication spécifique). La queue doit être enveloppée afin d'éviter toute contamination de l'eau.

Après la séance, les membres du cheval doivent être rincés et séchés.

- Habituation du cheval

Le temps d'habituation du cheval conseillé est de trois sessions rapprochées de 15 minutes maximum sur trois jours consécutifs en augmentant progressivement la profondeur de l'eau chaque jour. Les deux premières sessions doivent avoir lieu durant la même semaine au maximum, si elles ne peuvent avoir lieu durant trois jours consécutifs.

Le démarrage du tapis doit être synchronisé avec le cheval, c'est-à-dire quand celui-ci avance le membre pour faire un pas.

S'il existe un risque de blessure ou de comportement inapproprié de la part du cheval, le consensus admet qu'une légère sédation peut être possible. Cependant, d'après l'étude de Nankervis et Williams (2006), la sédation n'affecte pas le temps d'acclimatation (aucune différence significative n'a été observée entre les deux groupes, l'un sédaté et l'autre non). Il faut en moyenne deux entraînements de 15 minutes non sédatés au cheval pour qu'il s'acclimate. La sédation permet donc une première expérience sécurisante mais augmentera le temps d'habituation. Dans cette étude, le marqueur d'habituation était une fréquence cardiaque stable (un seuil étant défini au début de l'étude). Cette étude a également permis de montrer l'importance d'une période d'adaptation avant de réaliser des mesures lors d'expérimentations.

- Gestion de l'exercice (vitesse, profondeur de l'eau et durée)

La combinaison parfaite dépend de chaque cheval à un certain instant. Par exemple, elle peut évoluer en fonction de l'amplitude du cheval, de sa locomotion, de sa taille mais aussi de l'état physique du cheval (stress, fatigue) et de la durée d'exercice. Le protocole doit ainsi être choisi à chaque instant et adapté au besoin.

Il est important que le cheval trouve d'abord son équilibre sans eau, puis d'augmenter la profondeur de l'eau progressivement. De manière générale, il faudra diminuer la vitesse de défilement du tapis à mesure que la profondeur de l'eau augmente, puisque les forces appliquées au cheval augmentent avec la profondeur, comme expliqué dans la première partie de ce manuscrit.

La vitesse du tapis doit être considérée trop rapide si la tête ou l'encolure sont en extension ou non dans l'axe sagittal (témoin d'un recrutement trop intense des muscles protracteurs antérieurs), si le thorax est trop en avant, s'il existe une rotation du bassin ou si les postérieurs sont trop en rétraction.

D'après Nankervis *et al.* (2021), la vitesse de marche est plutôt spécifique au cheval tandis que la profondeur de l'eau est plutôt spécifique à un objectif d'entraînement.

- Gestion des mouvements du cheval

Le meneur doit s'assurer que le cheval est bien positionné au centre du tapis, et que celui-ci a la place de mobiliser sa tête et son encolure vers le bas. La tête doit être assez immobile et les postérieurs alignés. La dorsoflexion de tout l'axe sagittal doit être évitée lors de ce type d'exercice. Le positionnement correct du cheval est montré dans les figures 12, 13 et 14.

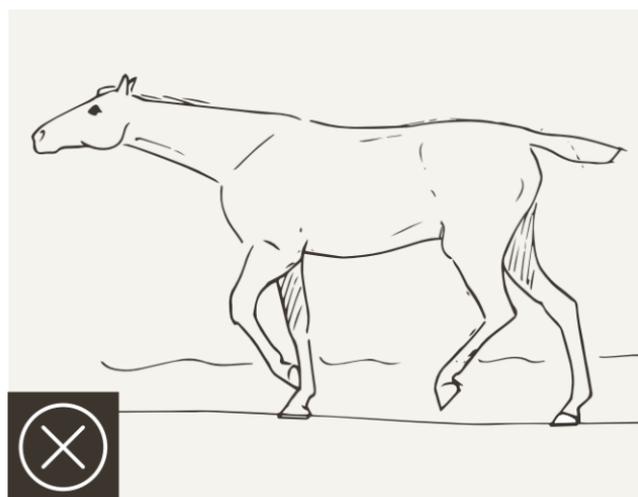
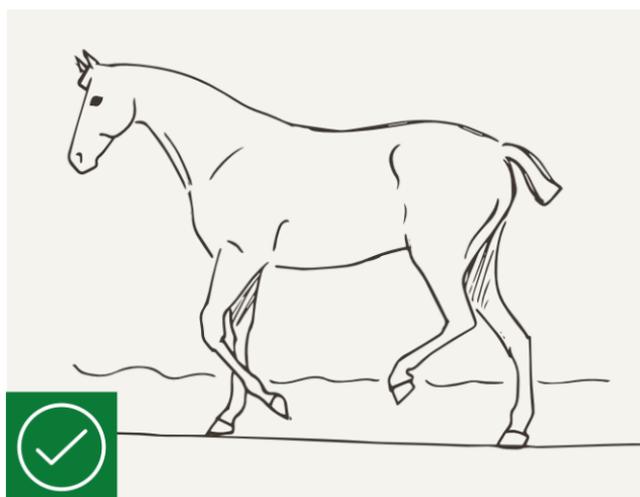
Figure 12 : Séance en tapis immergé au CIRALE de l'EnvA (crédit EnvA)



Figure 13 : Vue de profil d'une séance en tapis immergé au CIRALE de l'EnvA (crédit : EnvA)



Figure 14 : Positionnement correct (à gauche) et incorrect (à droite) du cheval lors de la marche en tapis immergé d'après Nankervis et al. (2020)



b. Piscine

Il n'existe pas de guide universel de bonnes pratiques concernant la nage en piscine. Cette sous-partie sera donc illustrée par ce qui peut être observé dans les études disponibles intégrant de la nage en piscine.

Une fois de plus, la phase d'adaptation varie selon les études et consiste à réaliser quelques tours de piscine (un ou deux généralement) une ou plusieurs fois par jour durant plusieurs jours. Des molécules tranquillisantes sont également parfois utilisées comme dans l'étude de Irwin et Howell (1980), laquelle pratique une injection intraveineuse d'acépromazine et intramusculaire de diazépam.

L'étude de Irwin et Howell (1980) rapporte qu'il n'y a pas eu de temps d'adaptation pour les 195 cas impliqués et que les chevaux savent en général tous nager. Selon le tempérament, certains sautent dans l'eau, d'autres entrent calmement ou bien refusent d'entrer. L'étude de Galloux *et al.* (1992) évalue la phase d'adaptation à huit à dix jours et intègre une phase d'initiation (dans laquelle le cheval ne nage que quelques tours) de deux à trois jours.

Les précautions avant l'entrée dans l'eau sont en général identiques à celles données pour l'utilisation des tapis immergés. Il faut nettoyer et brosser le cheval pour éviter la contamination. Le cheval défèque généralement avant d'entrer sous l'effet du stress, mais les auteurs réalisent parfois une vidange manuelle ou un énéma préalable pour ceux qui ont l'habitude de déféquer dans la piscine (Irwin et Howell, 1980).

Plusieurs techniques pour mener le cheval sont décrites dans les publications, le principe étant souvent le même, c'est-à-dire que l'on utilise des longes associées ou non à une perche pour diriger le cheval (dans les piscine circulaires). Dans la publication de Irwin et Howell (1980) par exemple, le cheval est attaché via un caveçon avec un anneau sur le dessus ; un licol étant disposé par-dessus avec une longe de 12 mètres. Il faut donc deux meneurs, un qui tient la perche et oriente le cheval par rapport aux parois de la piscine et un qui tire le cheval. D'autres techniques sans perche, mais avec deux longes permettent au cheval de nager librement sans contrainte. C'est la technique pratiquée au CIRALE par exemple où un troisième meneur (facultatif) tient le cheval via une corde attachée à la queue, afin de maintenir l'équilibre de l'animal. Les illustrations ci-après montrent le harnachement et une séance type de nage au CIRALE de l'EnvA (figures 15 à 17).

On note de plus l'utilisation d'un cache-oreilles au CIRALE de l'EnvA afin de limiter l'entrée d'eau dans ces dernières.

Figure 15 : Mise en place du matériel avant une séance de nage au CIRALE de l'EnvA (crédit EnvA)



Figure 16 : Séance de nage au CIRALE de l'EnvA avec deux meneurs (crédit EnvA)



Figure 17 : Sortie du bassin lors d'une séance de nage au CIRALE de l'EnvA avec deux meneurs (crédit EnvA)



Il est important de maintenir une tension sur la tête du cheval afin que celui-ci ne perde pas l'équilibre et reste dans la bonne position, le cheval pouvant se retourner sur son axe (la tête en haut et la queue en profondeur) ou sur le côté, comme l'indiquent plusieurs études. Dans un souci de motivation, même si les chevaux aiment nager en général, il est judicieux d'encourager vocalement le cheval selon Irwin et Howell (1980). Minimum deux personnes sont en général présentes au CIRALE afin de motiver le cheval à entrer puis nager lors des premières séances.

Le processus d'adaptation au CIRALE diffère selon le tempérament du cheval mais reste globalement le même. La première séance consiste en une longueur de 12 à 15 mètres en général. Le Dr Moiroud rapporte un minimum de trois séances d'adaptation en général (pouvant aller parfois jusqu'à 15 ou 20 jours pour les plus réticents), ces séances prenant parfois plusieurs heures pour ne pas brusquer le cheval à entrer dans l'eau. Le Dr Moiroud souligne également l'importance de la confiance et de la désensibilisation, notamment il peut être utile d'utiliser la voix, de la nourriture et de faire loger le cheval sur place afin qu'il s'habitue à son rythme au personnel et à son nouvel environnement.

Certaines études comme celle de Galloux *et al.* (1992) utilisent un marcheur en guise d'échauffement et de récupération. C'est également ce qui est réalisé au CIRALE (30 minutes de marcheur avant la séance).

Après chaque séance, au CIRALE, le cheval récupère activement puis est douché, le couteau de chaleur est passé puis il est soit placé sous un solarium en hiver, soit rentré au box en été.

D. Indications et diversités d'utilisation

a. Indications

Les indications ciblent en général des problèmes locomoteurs, tels que des tendinopathies des fléchisseurs (hors phase aigüe (Muñoz *et al.*, 2019b) et hors fléchisseur profond pour le tapis immergé (Nankervis *et al.*, 2017)), desmités du ligament suspenseur du boulet (en prenant des précautions lorsque celle-ci est proximale (Muñoz *et al.*, 2019a)) ou du ligament sésamoïdien distal par exemple, fractures (des sésamoïdes par exemple), arthrose, lésions liées à une surextension du boulet et affections ostéoarticulaires juvéniles (Lafon, 2015).

Il existe des indications plus rares telles que des affections nerveuses, une amélioration de la posture et de la proprioception, une prise en charge du surpoids particulièrement lors de syndromes métaboliques équinés associés à une fourbure (Lafon, 2015 ; Muñoz *et al.*, 2019a) ou encore le renforcement de la ceinture abdominale après une chirurgie de colique (Muñoz *et al.*, 2019a). Concernant la prise en charge du surpoids, Murakami *et al.* (1976) a observé une réduction de la masse graisseuse après 1 mois d'entraînement, à partir de la 2^e semaine.

Outre la réhabilitation, il existe désormais des indications préventives, notamment chez les chevaux de course pour lesquels l'utilisation de l'hydrothérapie chez ces animaux sains permet de limiter les contraintes biomécaniques lorsqu'ils sont à risque de développer des affections locomotrices.

L'hydrothérapie peut également être utilisée dans un programme de changement d'environnement et de stimulation du mental (Lafon, 2015).

b. Diversités d'utilisation

Initialement, le tapis immergé était utilisé dans les processus de réhabilitation du cheval. De plus en plus, cet outil prend une part importante dans l'entraînement des chevaux de sport au quotidien (Tranquille *et al.*, 2018) et devient même un effet de mode chez les chevaux de loisirs dont les propriétaires veulent le bien-être, par anthropomorphisme (Lafon, 2015).

Les tapis immergés sont plus nombreux que les piscines, car ils sont plus abordables et ne nécessitent pas d'infrastructures spéciales ou nécessitant des travaux fastidieux. On en retrouve dans des écoles vétérinaires, dans des centres de réhabilitation ou encore dans des écuries privées.

- **Intérêt général**

De manière générale, il apparaît que cet exercice est utile pour la réhabilitation et l'entraînement car il permet un exercice contrôlé par un poids apparent diminué grâce aux principes physique expliqués en amont. En effet, la charge axiale est réduite sur les articulations et les forces verticales sont minimisées, s'en suivent une réduction de la douleur et de l'inflammation par réduction du poids (King *et al.*, 2013).

Si l'on s'intéresse à la viscosité de l'eau (pour rappel 800 fois supérieure à celle de l'air), celle-ci permet une activation musculaire accrue et une stabilisation des articulations (King *et al.*, 2013). S'en suit alors un meilleur contrôle moteur (Miyoshi *et al.*, 2004).

Concernant l'effet de la pression hydrostatique, elle permettrait une augmentation de la fonction neuromusculaire par stimulation des nerfs sensoriels cutanés et des mécanorécepteurs

articulaires. Elle permettrait aussi un retour veineux et un drainage lymphatique favorisés, et ainsi une plus grande amplitude de mouvement et une diminution des douleurs.

Les mouvements réalisés permettent le développement musculaire (plus particulièrement de l'arrière train pour le tapis immergé) et une meilleure amplitude thoraco-lombaire (Nankervis *et al.*, 2008).

Le Dr Moiroud rapporte qu'au CIRALE, les profils de chevaux sont pour la plupart des chevaux de course (surtout des trotteurs) en entraînement mixte (piscine et tapis immergé) ou en rééducation. Quelques cas individuels concernent des chevaux en repos ou vacances ou encore des chevaux de sport (plutôt avec un profil CSO). Les motifs d'utilisation de l'hydrothérapie sont essentiellement le maintien en forme, la rééducation, la prévention des rechutes (comme pour les tendinites chroniques par exemple) ou encore les arthropathies.

Tranquille *et al.* (2018) décrit dans son étude une utilisation du tapis immergé pour des chevaux âgés de 2 semaines à 25 ans, la moyenne étant de 5 ans. Il apparaît cependant contre-indiqué de placer des poulains dans l'eau, leur système musculosquelettique n'étant pas suffisamment mature ou développé, l'utilisation à cet âge doit être réservée à des prescriptions particulières et non généralisée.

D'un point de vue subjectif, les propriétaires souhaitent avec cette activité que leur cheval gagne en force ou condition, en performance, une prévention des blessures ou des rechutes, un renforcement du tronc, des postérieurs ou du dos ou encore un meilleur équilibre (Tranquille *et al.*, 2018). L'aspect bien-être est plus rare mais en constante augmentation.

Concernant la nage en piscine, dans l'enquête de terrain de Steel *et al.* (2019), 79,2 % des 270 entraîneurs utilisaient la nage pour remplacer l'entraînement sur piste des chevaux blessés aux membres, 62,7 % pour améliorer ou maintenir une condition physique et 40 % dans un objectif de stimulation mentale. Le développement musculaire et la prévention des blessures sont des motifs plus rares (2,9 % et 6,7 % respectivement).

D'après le Dr Moiroud, les entraînements se font soit de façon ponctuelle, c'est-à-dire que le cheval vient régulièrement au CIRALE pour une séance puis repart, soit sous forme de « cures » de plusieurs semaines ou mois en gardant le cheval hébergé sur place. Globalement, les vétérinaires conseillent de réaliser au minimum un à un mois et demi d'entraînement en milieu aquatique pour obtenir des effets.

- Entraînement

Actuellement, d'après le consensus édité par Nankervis *et al.* (2021), il n'est pas recommandé d'utiliser ce type de pratique seul. Le tapis immergé ne se substitue pas à un entraînement sur sol dur.

D'après Tranquille *et al.* (2018), l'utilisation en complément de l'entraînement classique a lieu une ou deux fois par semaine. La balnéothérapie peut être réalisée dans le cadre d'une remise en forme après un temps d'arrêt, mais aussi dans le cadre d'une récupération active ou d'une préparation à une compétition (Lafon, 2015).

Tranquille *et al.* (2018) dans leur étude générale rapportent que 60 % des utilisations du tapis immergé l'étaient pour l'entraînement. La plupart des chevaux étaient des chevaux de sport, principalement de dressage, de concours complet et enfin de CSO. La hauteur de l'eau la plus

souvent utilisée était aux jarrets, la vitesse moyenne était de 1,6 m/s pour le pas et 4,4 m/s pour le trot. Une séance durait en moyenne 23 minutes. Cette étude montrait que l'eau était significativement plus haute, la vitesse de pas plus lente, la durée d'exercice plus longue dans les protocoles d'entraînement que ceux dédiés à la réhabilitation.

Bien qu'il existe des protocoles de rééducation fournis par les études et les fabricants de tapis immergés, il n'existe pas de protocole incluant le tapis immergé comme une part entière de l'entraînement.

Dans l'enquête de terrain de Steel *et al.* (2019), la nage était une forme supplémentaire d'entraînement combiné pour 38,1 % des entraîneurs.

- Rééducation

Il n'existe actuellement pas de consensus général sur l'indication du tapis immergé pour la rééducation kinésithérapique des chevaux car cela dépend de chaque pathologie et de chaque cheval. Peu d'études sur le sujet sont pour l'instant disponibles.

Le tapis immergé peut être utilisé seul en cas de blessure mais sur une période limitée.

L'étude de Tranquille *et al.* (2018) rapporte principalement le recours aux entraînements aquatiques pour la rééducation du ligament suspenseur ou pour des blessures concernant un tendon (41 % des cas). Pour ces indications, la hauteur de l'eau était le plus souvent à mi-canon ou au-dessus du pied et la vitesse moyenne du pas était de 1,75 m/s. Une session moyenne durait 22 minutes.

La marche en tapis immergé aurait également un effet bénéfique sur l'arthrose du carpe (induite expérimentalement dans l'étude de King *et al.* (2017)). Cette étude portant sur 16 chevaux s'exerçant dans un tapis immergé à une vitesse de 2,1 m/s 5 à 20 minutes par jour pendant huit semaines a pu démontrer par analyse histologique des effets anti-inflammatoires sur la membrane synoviale et une amélioration clinique (flexion normale du carpe retrouvée).

E. Contre-indications et risques

a. Contre-indications

Les contre-indications portent essentiellement sur les risques infectieux de l'immersion dans l'eau : plaies ouvertes, maladies infectieuses, affections cutanées (infectieuses ou non) ; mais aussi sur les risques locomoteurs : inflammations en phase aiguë (tendineuses ou articulaires), affections cervicales telles que le chevauchement des apophyses épineuses pour la nage (Lafon, 2015 ; Muñoz *et al.*, 2019a). Galloux *et al.* (1992) ajoutent à cette liste les boiteries hautes, les raideurs dorsales, certaines dorsalgies. Il convient également d'avoir une attention particulière aux myosites (un échauffement préalable et une surveillance accrue de ces chevaux sont nécessaires). Ces contre-indications sont également citées par King (2016), lequel ajoute les problèmes cardio-vasculaires ou respiratoires.

Les conflits de processus épineux sont également une contre-indication à la marche en tapis immergé lorsque le niveau d'eau est élevé (principalement lorsque les anomalies se trouvent crânialement à T13). Les synovites du tarse ou toute atteinte du dos et des membres postérieurs (pour le trot en tapis immergé) constituent d'autres contre-indications (Nankervis *et al.*, 2017).

A ce sujet, pour la nage en piscine ou pour la marche en tapis immergé, le Dr Moiroud rapporte qu'un examen clinique général complet et un examen locomoteur sont effectués avant toute période d'entraînement ou de réhabilitation au CIRALE. Notons que ces précautions ne sont pas toujours suivies lors d'utilisation dans un cadre privé et sans vétérinaire.

b. Risques

Bien qu'ils ne soient pas quantifiés, les risques possibles et les plus courants sont des blessures infligées au cheval ou aux meneurs ainsi que des problèmes cutanés (Mooij *et al.*, 2013). Ces événements apparaissent cependant comme étant rares. Le Dr Moiroud, rapporte également une rare apparition de problèmes cutanés s'apparentant à des croûtes ou boutons localisés dans les zones de plis, le poitrail ou encore le ventre. Les légères blessures observées au CIRALE sont surtout à l'entrée ou en sortie de piscine, lorsque les chevaux glissent, dérapent ou prennent peur. Ces risques peuvent être prévenus en suivant les recommandations explicitées dans la partie 2.C. Au contraire, Tranquille *et al.* (2018) rapportaient des accidents dans 36 % des cas, les affections cutanées et fongiques étant les plus fréquentes. Notons que dans cette étude, les accidents comprenaient les impressions subjectives des propriétaires sur le développement ou la détérioration de boiteries sans preuve d'un lien avec l'utilisation du tapis immergé.

D'une manière générale, même si de possibles effets locomoteurs peuvent survenir lors d'entraînement en milieu aquatique, ces boiteries sont moindres que lors d'entraînement sur sol dur, comme le prouve l'étude de Misumi *et al.* (1994). Il apparaît même d'après cette étude que l'introduction de la nage dans le protocole d'entraînement de jeunes chevaux diminuerait la probabilité d'apparition de problèmes locomoteurs.

Un autre risque, certes rare mais devant être précisé avant toute séance de nage, est l'apparition de coliques. En effet, certaines études rapportent l'apparition de coliques après des séances de nage (Walmsley *et al.* 2011). Dans publication de Walmsley *et al.* (2011) se déroulant sur 3 ans, l'incidence calculée était de 0,08 % dans une population de chevaux de course. Les coliques suspectées comme secondaires à la nage sont résolues médicalement dans 94,9 % des cas. Dans une seconde étude se déroulant sur 7,5 années dans une clinique équine, le profil des chevaux présentés pour colique associée à la natation est plutôt jeune (moyenne d'âge de 4,6 ans) et les coliques répondent peu à l'analgésie. La plupart des cas montre des distensions intestinales ou des déplacements strangulés ou non. A ce jour, la pathogénie n'est pas connue mais une dysmotilité est suspectée, potentiellement associée à une hyperactivité sympathique et une hyporéactivité parasymphatique. Il serait intéressant de réaliser une étude portant sur les facteurs de risque impliqués dans ces coliques afin d'en limiter l'apparition.

Aucune publication ne rapporte d'aggravation objective de lésions initialement présentes ou de dorsalgie. Le Dr Moiroud a occasionnellement pu observer des raideurs lors des séances organisées au CIRALE, ainsi qu'une impression de fatigue se caractérisant par une modification brutale de la nage pendant laquelle le cheval ralentit, s'enfonce dans l'eau et prend plus de temps à sortir du bassin.

3. Conséquences physiologiques de l'entraînement en milieu aquatique

A. Conséquences sur les paramètres sanguins

Il est complexe de faire une conclusion sur les différentes études publiées et de comparer ces dernières tant les protocoles d'exercices varient. Les variables mesurées et les méthodes de mesure sont également différentes selon les études. Il faut également noter le fait que les chevaux inclus sont souvent différents de par leur race, leur âge ou encore leur discipline et niveau d'entraînement. Nous présenterons cependant un état des lieux de ce qui a été démontré ou supposé dans ces études (peu de statistiques sont disponibles étant donné le faible nombre de sujets inclus).

Il est intéressant de se demander, par analogie avec un exercice sur tapis de course par exemple ou sur piste, quelles variations seraient attendues dans le cadre de la nage en piscine ou de la marche en tapis immergé. En effet, tout exercice physique induit normalement une hémococoncentration (par perte d'eau et par mobilisation du réservoir érythrocytaire) ainsi qu'une hypercapnie et une hypoxémie (par augmentation du besoin en oxygène). D'après les expériences de Allaam *et al.* (2014), un exercice sur piste entraîne les modifications sanguines suivantes : hémococoncentration (augmentation de l'hématocrite et des protéines totales), augmentation des créatines kinases (CK) et aspartate amino-transférases (ASAT), augmentation de la cholestérolémie, hyperlactatémie et hyperglycémie après exercice (par augmentation de la glycolyse hépatique et par activation du système adrénérurgique).

a. Lactates

- Variations lors de la nage

De nombreuses études se sont intéressées à la lactatémie au cours de la nage. Les valeurs recueillies sont présentées dans le tableau suivant (pour rappel, le détail des protocoles se trouve dans le tableau 1).

Tableau 4 : Tableau comparatif des concentrations en lactates lors de la nage

Étude	Concentrations sanguines en lactates (moyennes, écart-types et/ou intervalles) (mmol/L)	Autres observations
(Murakami <i>et al.</i> , 1976)	Aucun chiffre disponible	
(Thomas <i>et al.</i> , 1980)	[1 - 10]	Augmentation exponentielle dans le temps
(Galloux <i>et al.</i> , 1992)	1,29 +/- 0,71	
(Hobo <i>et al.</i> , 1998)	[2,3 +/- 0,5 - 2,8 +/- 0,5]	pH = 7,28
(Davie <i>et al.</i> , 2008)	1,8 +/- 0,57	
(Piccione <i>et al.</i> , 2010)	5,8 +/- 0,7	2,10 +/- 0,2 après 30 minutes de repos
(Kang <i>et al.</i> , 2012)	J0 : 13,03 +/- 3,17 J7 : 6,40 +/- 2,91 J14 : 4,66 +/- 2,37	
(Klomp <i>et al.</i> , 2014)	2,3 +/- 1,6	[Lactates] = 6,6 mmol/L pour un cheval
(Bonelli <i>et al.</i> , 2017)	2,1 +/- 0,4	Aucune différence significative avant et après la période d'entraînement
(Jones <i>et al.</i> , 2020)	6,97 [0,73 - 25,3]	
(Leguillette <i>et al.</i> , 2022)	1,5 [0,9 - 2]	

La lecture de ce tableau permet d'observer des concentrations en lactates relativement basses pour la plupart des études, mais aussi de grandes variations pour certaines. L'étude de Jones *et al.* (2020) rapporte une moyenne plus élevée par exemple, mais celle-ci est à différencier des autres études car les chevaux nageaient sur place attachés par la queue, les contraintes et le travail étaient donc plus élevés. L'étude de Kang *et al.* (2012) rapporte également une lactatémie très augmentée, sans en discuter. Il est aussi important de noter que les méthodes de mesure diffèrent, compliquant la comparaison des études entre elles : méthode enzymatique (Galloux *et al.*, 1992), analyseur portable (Kang *et al.*, 2012 ; Klomp *et al.*, 2014 ; Piccione *et al.*, 2010), automate

de laboratoire (Hobo *et al.*, 1998 ; Jones *et al.*, 2020) ou encore spectrophotométrie (Thomas *et al.*, 1980).

L'étude de Murakami *et al.* (1976) comprend deux expériences distinctes : la première consiste en divers temps de nage (5, 10 et 20 minutes, espacés de 48 heures entre chaque, sur 5 jours) et la deuxième consiste en une augmentation du temps de nage quotidienne de cinq minutes semaine après semaine (de 5 à 20 minutes). Les conclusions rapportent que les lactates sont stables et n'augmentent pas avec la durée d'exercice dans la deuxième expérience (exercice progressif), mais qu'ils augmentent durant la première. L'expérience permettrait donc une augmentation moindre des lactates. L'augmentation rapportée reste cependant plus faible que durant un exercice au galop sur sol dur. L'étude de Kang *et al.* (2012) révèle une augmentation plus élevée de la lactatémie que dans d'autres études. Il apparaît cependant que cette dernière est significativement moins élevée après 7 et 14 jours d'entraînement en piscine. L'entraînement en piscine permettrait donc une modification métabolique limitant la production de lactates.

Il n'existerait, d'après Klomp *et al.* (2014), aucune corrélation significative entre la concentration en lactates et la fréquence cardiaque (FC) ou encore la vitesse de nage. Aucune corrélation avec la performance n'a été démontrée d'après cette même étude. Les études de Misumi *et al.* (1994) rapportent au contraire que les lactates sont positivement corrélés à la vitesse de nage (augmentation exponentielle), mais cette corrélation diffère selon les niveaux d'entraînement.

L'étude de Piccione *et al.* (2010) est intéressante dans ce contexte car c'est une étude globale comparant différents type d'exercice, dont la nage en piscine. Le seul inconvénient est l'effectif de la catégorie piscine (deux chevaux seulement), les résultats de cette étude sont donc peu représentatifs. Cette étude a néanmoins permis de montrer que la lactatémie, bien qu'augmentée lors de la nage, baisse rapidement en période de récupération après l'exercice. D'autre part, la lactatémie lors de la nage en piscine ne diffère pas significativement avec celle rapportée lors d'autres types d'exercice (CSO, galopeurs, trotteurs, randonnée ou entraînement sur tapis de course). Ces données semblent être confirmées par l'étude de Thomas *et al.* (1980) qui rapporte une augmentation exponentielle des lactates par rapport au temps, similaire aux données collectées sur les chevaux de course courant sur piste.

La majorité des études exposées dans cette partie conclue sur le fait que la nage en piscine est un effort s'effectuant principalement en aérobie pour le cheval. En effet, il est considéré qu'une lactatémie inférieure à 2 mmol/L lors d'un exercice permet de qualifier celui-ci d'aérobie, tandis qu'une valeur supérieure à 4 mmol/L reflète un exercice anaérobie. Une valeur comprise entre 2 et 4 mmol/L correspond à une zone dite « mixte ». Ce type d'exercice favoriserait le développement de fibres musculaires aérobie (fibres musculaires de type I) permettant une faible production de lactates (Hobo *et al.*, 1998).

Comme le montrent certaines études avec notamment des étendues larges de valeurs obtenues, il existe une variation individuelle. Une part anaérobie du travail en piscine est également possible chez certains chevaux lors d'effort plus intense (Klomp *et al.*, 2014). Il pourrait aussi y avoir une influence de l'hypoventilation, conséquence d'un pattern respiratoire modifié en piscine (portion développée ci-bas). En effet, une hypoventilation entrainerait une diminution de la part de travail en aérobie et donc une production accrue de lactates.

- Variations lors de la marche en tapis immergé

Les valeurs de lactatémie exposées dans les publications étudiées sont présentées dans le tableau ci-dessous (tableau 5), pour rappel, les protocoles détaillés utilisés dans chaque publication sont résumés dans le tableau 1. Les valeurs obtenues sont assez semblables d'une étude à l'autre. Ces valeurs sont moindres que celles observées lors de la nage en piscine.

Tableau 5 : Tableau comparatif des concentrations en lactates lors de la marche en tapis immergé

Étude	Concentrations sanguines en lactates (moyennes ou médianes, écart-types et/ou intervalles) (mmol/l)
(Voss <i>et al.</i> , 2002)	Tous chevaux et exercices confondus : [0,59 - 1,24] Médiane (trot au-dessus des carpes) : 1,01 +/- 0,17
(Lindner <i>et al.</i> , 2010)	Moyenne : 1,4
(Lindner <i>et al.</i> , 2012)	Expérience 1 : SET 1 : [1,1 - 1,9] SET 2 : [1,1 - 1,8] SET 3 : [1,1 - 2,1] Expérience 2 : [0,9 - 1,9]
(Vincze <i>et al.</i> , 2013)	[0,37 - 0,41] Après exercice : [0,62 - 1,03]
(Muñoz, 2018)	Sans eau : 1,03 +/- 0,41 Articulation métacarpo/métatarsophalangienne : 1,05 +/- 0,28 Tarse : 1,05 +/- 0,52 Grasset : 1,11 +/- 0,22
(Vincze <i>et al.</i> , 2016)	[0,3 - 0,4] (d'après graphique)
(Greco-Otto <i>et al.</i> , 2017)	Analyseur portable [0,4 - 1,7]

Voss *et al.* (2002) n'ont dans leur étude pas montré de différences significatives entre les médianes de lactatémie de chaque exercice (pour rappel, ces exercices correspondaient à du pas ou du trot à différentes hauteur d'eau). Cette absence d'augmentation des lactates lors d'un effort plus marqué serait expliquée par une compensation du besoin en oxygène via une augmentation de

la fréquence respiratoire et une augmentation du transport via la mobilisation du réservoir érythrocytaire splénique. L'organisme utiliserait également davantage des fibres musculaires de type I (fibres oxydatives lentes) ou IIA (fibres oxydatives rapides) afin d'effectuer un travail aérobie.

A contrario, l'étude de Lindner *et al.* (2010), ayant recours à plusieurs protocoles d'exercice, a montré une augmentation significative des lactates quel que soit l'exercice imposé. Il existait une influence du type d'effort sur cette augmentation, c'est-à-dire que la lactatémie variait différemment selon l'exercice proposé, sans linéarité. Les valeurs post-exercice restant tout de même très faibles et proches de celles retrouvées dans les autres études, cela confirme que les efforts lors de la marche en tapis immergé se font également en aérobie.

Lindner *et al.* (2012) confortent ces changements dans une étude plus récente, tout en précisant certains points. En effet, un changement significatif de la lactatémie dans la première expérience (où seule la vitesse augmente, dans une hauteur d'eau constante) est rapporté, mais l'amplitude et la direction de ce changement diffèrent entre les différentes hauteurs d'eau (durant un même exercice, la lactatémie pouvait augmenter ou diminuer selon les différentes vitesses imposées, et cette variation était différente aux diverses hauteurs d'eau). L'augmentation des lactates est parfois significative au début de l'exercice seulement, parfois elle l'est au milieu puis stagne pour décroître à la fin. Dans la seconde expérience, où seule la hauteur d'eau change (pour une vitesse constante), une augmentation significative après 10 minutes d'exercice est mise en évidence, puis une stagnation et enfin une diminution. Cette étude conclue à une absence de corrélation entre la lactatémie et la vitesse, et confirme que ce type d'effort s'effectue en aérobie.

Toutes ces études s'accordent sur le fait que le travail en milieu aquatique s'effectue le plus souvent en aérobie chez le cheval. L'étude de Lindner *et al.* (2012) questionne également l'implication d'autres mécanismes, déjà rapportés en médecine humaine, pour expliquer cette faible augmentation des lactates. Il pourrait en effet y avoir une inhibition de la production de lactates via la glycolyse anaérobie, permise par une baisse de la température musculaire. De plus, une vasoconstriction dans le muscle pourrait diminuer l'élimination d'acide lactique contenu dans ce muscle et donc diminuer la lactatémie. Cette étude souligne également le fait que la mesure des lactates en fin d'exercice ne permettrait pas d'évaluer correctement les conséquences de l'exercice en tapis immergé et qu'il est difficile de comparer les valeurs obtenues avec celles obtenues sur terrain classique, puisque de nombreux mécanismes supplémentaires sont impliqués dans la marche en milieu aquatique. Ces mêmes mécanismes sont suspectés dans l'étude de Vincze *et al.* (2013), laquelle a mis en évidence une diminution de la lactatémie durant l'exercice puis une augmentation pendant la phase de repos. Cette augmentation restait tout de même dans les valeurs usuelles et bien inférieure à celles observées sur le terrain, confirmant donc une faible charge de travail et un exercice en aérobie.

b. Glucose et insuline

Une seule étude sur la nage en piscine rapporte une réduction de 40 à 50 % du taux de glucose dans le sang et précise que cette diminution est plus élevée que lors d'une course sur piste (Murakami *et al.*, 1976). La nage en piscine nécessiterait beaucoup d'énergie pour permettre aux muscles de fournir un travail conséquent. Le glucose étant utilisé dans la voie de la phosphorylation oxydative (quand la quantité d'oxygène disponible est suffisante) mais aussi dans la voie glycolytique (quand la quantité d'oxygène disponible n'est pas suffisante ou lorsque l'exercice est trop intense), cette consommation accrue est cohérente avec l'exercice imposé, qu'il soit aérobie ou anaérobie selon l'individu concerné.

Pour compléter ces recherches, l'étude de Bonelli *et al.* (2017) s'est intéressée à l'effet de la nage sur le métabolisme insuline-glucose chez le cheval. Il est connu que l'exercice de faible intensité entraîne une augmentation de l'absorption de glucose (via le transporteur GLUT-4) par les muscles squelettiques, sous l'influence de l'insuline. Dans cette étude réalisant des tests de stimulation au glucose (injection d'un bolus de glucose en IV puis mesure de la glycémie après 5, 15, 25, 35, 45 et 60 minutes) avant la période d'entraînement aquatique (d'une durée d'un mois) et deux jours après la fin de cette période, les concentrations en glucose sont significativement plus élevées avant l'expérience aquatique qu'après (figure 18). De plus, la concentration basale (à T0) en insuline est significativement plus élevée durant le test post entraînement en comparaison au test pré-entraînement, mais elle devient significativement plus basse après 45 et 60 minutes de stimulation au glucose (figure 19).

Figure 18 : Variation moyenne de la glycémie obtenue dans l'étude de Bonelli *et al.* (2017) après un test de stimulation au glucose par voie intraveineuse avant et après un mois d'entraînement aquatique

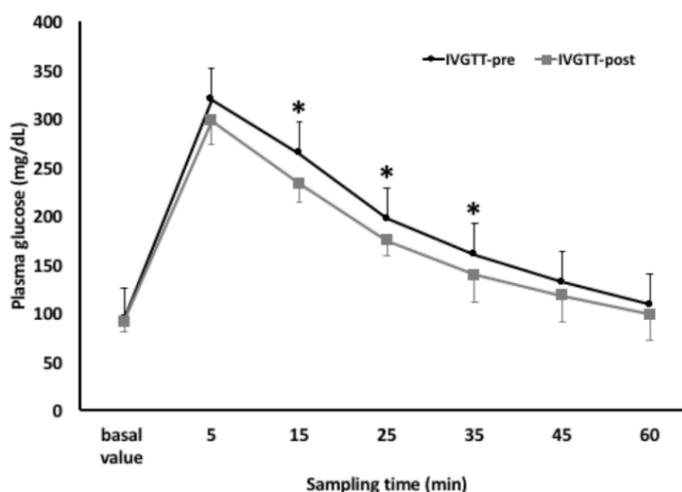
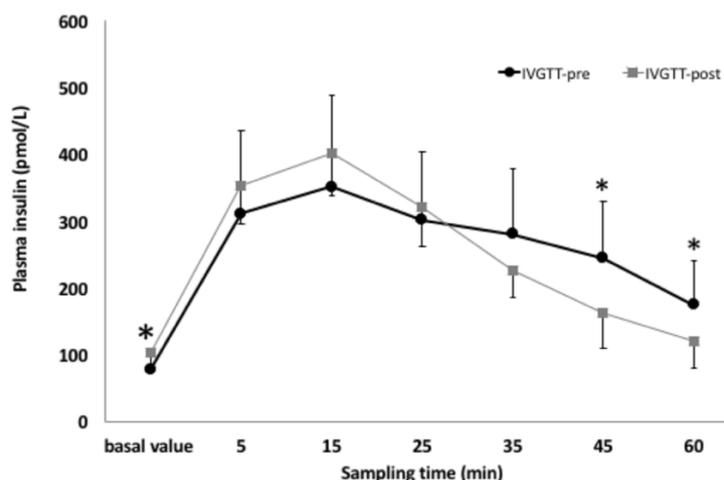


Figure 19 : Variation moyenne de l'insulinémie obtenue dans l'étude de Bonelli *et al.* (2017) après un test de stimulation au glucose par voie intraveineuse avant et après un mois d'entraînement aquatique



Il existe donc une adaptation du métabolisme insuline-glucose lors de l'exercice aquatique (diminution de la concentration sanguine en glucose et diminution plus rapide de l'insuline plasmatique après une période d'entraînement). Dans la même optique, l'étude de Garcia et Beech (1986) a étudié les variations de la glycémie et de l'insulinémie immédiatement après la nage et une heure après la fin de cet exercice. Les variations de l'insulinémie allaient dans le même sens mais contrairement à la précédente étude, il n'y avait pas de changement significatif de la glycémie après l'exercice et il n'y avait aucun effet de la durée d'exercice sur ce paramètre. La diminution de l'insulinémie immédiatement après la nage était justifiée par une probable baisse de glucose circulant (bien qu'il n'y ait eu aucun changement significatif, la glycémie tendait à diminuer) et par une augmentation de l'activité adrénérurgique induite par le travail, tandis que l'augmentation une heure après l'exercice pouvait être expliquée par une probable libération des cellules pancréatiques après inhibition sympathique. Une influence de la durée de la nage sur l'insulinémie était également rapportée, cette dernière baissant avec la durée d'exercice.

Kang *et al.* (2012) ont étudié l'influence d'un entraînement de 7 et 14 jours en piscine sur la glycémie. En comparant les valeurs de glycémie prises immédiatement après l'exercice et après dix minutes durant la phase de récupération, ces derniers ont montré une diminution significative de la glycémie après 14 jours d'entraînement par rapport à la glycémie à J0 avant la période d'entraînement. Ces résultats concordent avec les études précédemment citées.

Concernant la marche en tapis immergé, Vincze *et al.* (2013) ont montré une baisse de la glycémie durant l'entraînement (3,8-4,1 mmol/l) suivie d'une augmentation pouvant atteindre 5,8 mmol/l après le travail. Dans la même logique, la concentration en triglycérides (la principale source de glucose lors d'un travail de faible intensité) chutait après le travail. Cela confirme que le travail en milieu aquatique nécessite du glucose, et que celui-ci est stocké sous forme de glycogène dans les muscles après le travail. Le même phénomène est retrouvé dans l'étude de Vincze *et al.* (2016), sans étude statistique sur ces observations.

c. Hématocrite, hémoglobine et protéines totales

- Variations lors de la nage

Murakami *et al.* (1976) rapportent une augmentation de l'hématocrite durant la nage. Pour rappel, l'expérience 1 consiste en 5, 10 et 20 minutes de nages sur trois jours différents et l'expérience 2 consiste en une augmentation progressive du temps de nage de 5 à 20 minutes sur trois semaines. Cette augmentation est plus prononcée pendant l'exercice de 20 minutes de l'expérience 1 (augmentation entre 50 et 70 %), mais l'hématocrite diminue avec le temps de nage dans l'expérience 2. Il ressort également de cette étude que la numération érythrocytaire est modifiée pendant la nage, sans lien avec la durée de l'exercice. Finalement, les auteurs ont observé que le taux d'hémoglobine reste stable, par ajustement de la concentration corpusculaire moyenne en hémoglobine.

L'augmentation de l'hématocrite durant la nage est équivalente à ce qui est observé lors d'un trot rapide ou d'un galop moyen. Le maintien d'une concentration en hémoglobine stable suggère le développement d'un système cardiopulmonaire efficace pour l'oxygénation.

L'hématocrite est également augmenté dans l'étude de Kang *et al.* (2012) et est significativement plus élevée à J0 (59 %) qu'à J7 (45 %) et J14 (42 %) d'entraînement. L'entraînement en piscine permettrait donc une modification du métabolisme nécessitant une

moindre augmentation de l'hématocrite. Dans le même sens, l'hémoglobine lors de la nage et après dix minutes de repos était significativement plus faible après 7 et 14 jours d'entraînement.

Cette augmentation significative de l'hématocrite allant jusqu'à 57,4 % a aussi été observée par Hobo *et al.* (1998). Le taux augmente également avec le temps de nage, mais aucune comparaison statistique entre hématocrite et temps de nage n'est rapportée dans cette étude. Ces analyses ont en revanche été réalisées par Garcia et Beech (1986). Dans leur étude, l'hématocrite est significativement augmenté après la nage (54,8 % et 54,5 % pour les deux expériences) mais il n'y a aucun effet de la durée d'exercice sur cette augmentation. Cette augmentation est expliquée par les auteurs comme secondaire à une contraction splénique mais aussi par une concentration induite par une perte d'eau extracellulaire. Les protéines totales dans cette étude suivent la même tendance, elles sont significativement augmentées immédiatement après la nage, sans influence de la durée d'exercice.

Une augmentation d'hématocrite est cohérente avec le fait que l'exercice de natation soit pour la plupart des chevaux un exercice aérobique comme supposé précédemment. Il convient donc d'apporter le maximum d'oxygène aux tissus et l'augmentation de l'hématocrite constitue l'un des moyens d'y parvenir.

- Variations lors de la marche en tapis immergé

Voss *et al.* (2002) ont inclus l'analyse de l'hémoglobine dans leur étude. Ils rapportent une différence significative entre les valeurs physiologiques de base (134 +/- 11 g/l) et les valeurs durant les différents exercices dans l'eau, l'hémoglobine étant plus élevée après l'exercice sur tapis immergé. Aucune différence significative n'a en revanche été trouvée entre les différents protocoles d'exercice. Il existe donc une mobilisation du réservoir érythrocytaire depuis la rate pendant l'exercice en tapis immergé.

L'entraînement de 4 semaines en tapis immergé ne semble pas entraîner de changement de l'hématocrite du cheval lors d'un exercice standardisé sur tapis sec (Borgia *et al.*, 2010). L'hématocrite dans cette étude était en effet de 44,4 +/- 4,1 % avant la période d'entraînement et de 42,9 +/- 4,7 % après cette période, sans différence significative.

Les données manquent à ce sujet. Il serait intéressant de réaliser des mesures d'hématocrite immédiatement après un exercice en tapis immergé (et non lors d'un test standardisé sur tapis sec après conditionnement en tapis immergé comme dans l'étude précédente) afin d'observer les changements instantanés de ce type d'exercice sur ce paramètre et les comparer à la nage ou à la course sur tapis sec par exemple.

d. Gaz sanguins

D'après Hobo *et al.* (1998), la pression artérielle en O₂ diminue significativement lors de la nage en piscine mais reste dans les normes entre 90 et 94 mmHg (normes : > 85 mmHg). La pression artérielle en CO₂ augmente entre 46,8 et 51 mmHg, excédant les normes usuelles (normes : 35-45 mmHg). Ces observations attendues lors d'un exercice permettent également de confirmer la conséquence de la pression hydrostatique sur la cage thoracique qui s'ajoute à cela, la ventilation n'étant pas optimale. L'hypercapnie est à relier avec l'acidose retrouvée lors de cette étude (pH = 7,28, normes : 7,35-7,45). Une concentration sanguine plus élevée en CO₂ peut en effet entraîner une acidémie d'origine respiratoire. Notons que parallèlement, une hyperlactatémie peut entraîner une acidémie d'origine métabolique.

e. Autres paramètres

L'étude de Vincze *et al.* (2013) ne rapporte aucune influence de la marche en tapis immergé sur les taux de cholestérol et de bilirubine dans le sang. De plus, cette étude a permis de montrer une augmentation transitoire du cortisol durant l'exercice. Cela pourrait indiquer que ce type d'entraînement représente un stress pour l'animal. Il faut cependant noter que cette hausse est considérée comme physiologique et commune à tous types d'exercices.

Dans leur étude, Garcia et Beech (1986) ont également montré une augmentation significative de la cortisolémie après dix minutes de nage, ce paramètre semble donc être influencé par l'intensité de l'exercice. La cortisolémie s'élève à 68,3 +/- 8,3 ng/ml immédiatement après 20 minutes de nage, puis retrouve ses valeurs pré-exercice après une heure de récupération.

Cette même étude s'intéresse également aux taux de triiodothyronine (T3) et thyroxine (T4), lesquels sont significativement augmentés une heure après la nage, bien que cette augmentation soit discrète. Il n'y a pas d'influence de la durée de nage sur ces paramètres. Cette variation serait secondaire à l'augmentation de la circulation sanguine.

Le tableau ci-après (tableau 6) reprend les variations de chaque paramètre présenté dans cette partie ainsi qu'une comparaison entre les deux types d'entraînement aquatique lorsque cela est possible.

Tableau 6 : Tableau récapitulatif et comparatif des effets de la nage et de la marche en tapis immergé sur les paramètres sanguins

Paramètres sanguins		Nage	Marche en tapis immergé	Comparaison nage/tapis immergé
Lactatémie	Variation	Augmentation modérée	Augmentation faible	
	Influence (positive/négative)	Entraînement (négative) Vitesse (positive)		
	Commentaire	Effort aérobie mais variations individuelles ou selon l'exercice (parfois anaérobie)	Aérobie quel que soit le cheval ou l'exercice	Tapis = travail plus aérobie que nage
Glycémie	Variation	Diminution puis augmentation post-exercice	Diminution puis augmentation post-exercice	Travail en milieu aquatique nécessite beaucoup de glucose Variation semblable entre le tapis immergé et la nage
	Influence	Entraînement (négative)		
Insulinémie	Variation	Augmentation puis diminution		
	Influence	Entraînement (positive)		
Hématocrite	Variation	Augmentation	Augmentation	Variation semblable
	Influence	Entraînement (négative)		
	Commentaire	Semblable aux valeurs observées au trot rapide ou au galop		
Protéines totales	Influence	Augmentation		
PO₂	Variation	Diminution		
	Commentaire	Dans les normes		
PCO₂	Variation	Augmentation		
	Commentaire	Au-delà des normes usuelles		
Cortisol	Variation	Augmentation	Augmentation	

Une influence négative dans ce tableau désigne le fait que le paramètre indiqué dans la case « influence » diminue le paramètre étudié. A l'inverse, une influence positive désigne le fait que le paramètre indiqué dans la case « influence » augmente le paramètre étudié.

B. Conséquences sur le système cardiovasculaire

En préambule de cette partie, il est utile de rappeler les changements cardiovasculaires attendus lors d'une activité intense. Le tableau 7 ci-après résume ces modifications.

Rappelons que le système cardiovasculaire suit la loi fondamentale de l'hémodynamique :

$Q = \Delta P/R$
Où Q est le débit cardiaque, ΔP la pression artérielle moyenne, R la résistance périphérique totale.
$Q = FC \times VES$
Où FC est la fréquence cardiaque et VES le volume d'éjection systolique.

Tableau 7 : Changements cardiovasculaires durant une activité intense d'après Sherwood et al. (2016)

Variable cardiovasculaire	Changement	Mécanisme physiologique
Fréquence cardiaque (FC)	Augmentation	Augmentation de l'activité du système sympathique et diminution du système nerveux parasympathique.
Retour veineux	Augmentation	Vasoconstriction veineuse induite par le système sympathique et activité accrue des pompes musculaires et respiratoire.
Volume d'éjection systolique (VES)	Augmentation	Contractilité du myocarde accrue par le système sympathique et augmentation du retour veineux.
Débit cardiaque	Augmentation	Augmentation de la FC et du VES.
Débit sanguin dans les muscles squelettiques et cardiaques et la peau	Augmentation	Vasodilatation des artéoles localement et sous influence du système nerveux sympathique (récepteurs beta 2).
Débit sanguin dans les autres organes	Diminution	Vasoconstriction artériolaire généralisée induite par le système sympathique (récepteurs alpha 1).
Résistance périphérique totale	Diminution	La résistance de la peau, des muscles squelettiques et du cœur décroît plus qu'elle n'augmente dans les autres organes.
Pression artérielle moyenne	Augmentation	Le débit cardiaque augmente plus que ne décroît la résistance périphérique totale.

a. Conséquences de la nage

- Sur la fréquence et le débit cardiaques

De nombreuses études se sont intéressées à la fréquence cardiaque (FC) du cheval lors de la nage. Pour rappel, les caractéristiques des études et des exercices imposés sont regroupées dans le tableau 1. Le tableau 8 ci-après présente les FC observées dans ces études.

Tableau 8 : Tableau comparatif des fréquences cardiaques lors de la nage

Étude	Fréquence cardiaque (moyenne, écart-type et/ou intervalle) (bpm)	Autres observations
(Murakami <i>et al.</i> , 1976)	EXP 1 : [144 - 171] EXP 2 : [127 - 158] EXP 3 : [138 - 160]	FC de départ retrouvée après 60 min post exercice (séance de 20 min de nage, EXP 1) FC retrouvée après 70 à 80 min dans l'EXP 3
(Thomas <i>et al.</i> , 1980)	[150 - 200]	
(Garcia et Beech, 1986)	0-5 min : 117 +/- 8 5-10 min : 117 +/- 12 10-15 min : 119 +/- 14 15-20 min : 80 +/- 6	FC retrouvée après 60 min post exercice
(Galloux <i>et al.</i> , 1992)	161	
(Hobo <i>et al.</i> , 1998)	[182 - 195]	
(Davie <i>et al.</i> , 2008)	109 +/- 18,75	
(Kang <i>et al.</i> , 2012)	J0 : 149 J7 : 124 J14 : 132	Récupération plus rapide à 10 min post-exercice après 7 à 14 j d'entraînement qu'à J0
(Klomp <i>et al.</i> , 2014)	178 [130 - 202]	
(Bonelli <i>et al.</i> , 2017)	[120 - 160]	
(Santosuosso <i>et al.</i> , 2022)	162	
(Leguillette <i>et al.</i> , 2022)	178 [148 - 182]	

Les études décrites ci-dessus montrent toutes une FC relativement élevée lors de la nage en piscine. Cette fréquence cardiaque est le plus souvent augmentée lors du premier passage ou de la première expérience pour le cheval, probablement en raison du stress. Les études incluant

des chevaux déjà entraînés peuvent donc parfois rapporter des valeurs plus faibles. Pour comparaison, le tableau 9 rappelle les FC habituellement mesurées aux différentes allures sur piste.

Tableau 9 : FC physiologiques chez le cheval selon l'allure d'après Marr et Bowen (2010)

Allure	FC (bpm)
Repos	30-40
Trot	80-120
Canter	120-150
Galop	150-180
Intensité maximale	200-240

Les figures 20 et 21 ci-dessous montrent un exemple de dispositif servant à la mesure des paramètres cardiaques, l'équimètre.

Figure 20 : Equimètre permettant les mesures des paramètres cardiaques durant la nage en piscine (crédit EnvA)

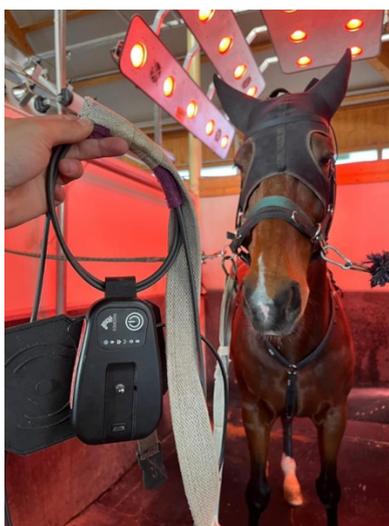


Figure 21 : Equimètre en place permettant les mesures des paramètres cardiaques durant la nage en piscine (crédit EnvA)



Concernant la tachycardie induite par le stress, il est évidemment connu que ce dernier en activant le système adrénérgique crée une stimulation sympathique et donc une tachycardie. L'étude de Nankervis et Williams (2006) a montré l'influence du stress sur la tachycardie lors de la marche en tapis immergé, on peut donc imaginer que le même mécanisme soit impliqué pour la nage en piscine.

Plusieurs études s'intéressant à la FC du cheval lors de la nage ont voulu déterminer l'influence de la durée d'exercice, de la vitesse ou bien de l'intensité du travail. C'est ainsi que Galloux *et al.* (1992) et Murakami *et al.* (1976) n'ont pas observé de lien entre la FC et la durée d'exercice. La dernière étude rapporte cependant un temps de récupération cardiaque plus long après 60 min de nage (EXP 3). Dans cette même étude, la FC augmente néanmoins lorsque la vitesse de nage devient plus rapide. Cette observation a également été rapportée par Klomp *et al.* (2014), avec la mise en évidence d'une corrélation significative entre FC et vitesse de nage, ainsi que dans l'étude de Misumi *et al.* (1994), bien que le niveau d'entraînement préalable des chevaux n'entraîne aucune différence significative. De plus, l'étude de Garcia et Beech (1986) a montré une différence significative entre les valeurs de FC des chevaux nageant plus de 15 minutes (plus faibles) et ceux nageant moins de 15 minutes. Dans tous les groupes, la FC augmente significativement immédiatement après la fin de l'exercice.

En somme, la FC du cheval atteinte lors de la nage est équivalente à celle obtenue lors d'un trot rapide ou d'un galop lent, celle-ci diminuant avec l'habituation du cheval mais aussi l'expérience (Murakami *et al.*, 1976), la récupération étant aussi plus rapide (Kang *et al.*, 2012). Cette tachycardie est cependant moindre que lors de courses de trot ou de galop selon Vermeulen et Evans (2006) qui rapporte une valeur moyenne à 216 bpm lors de ces efforts intenses.

A propos du débit cardiaque, dans l'étude de Thomas *et al.* (1980), ce dernier correspond à huit fois la moyenne au repos (soit 545 ml/kg/min) ; il est de plus corrélé à la FC. Le volume d'éjection systolique est réduit au début du travail puis augmente jusqu'à atteindre des valeurs identiques à celles sur le terrain. Il existe donc d'après ces auteurs un stress sur le système cardiovasculaire lors de la nage, tout comme lors d'un exercice sur piste. Il est également intéressant de noter que dans cette étude, une corrélation entre l'intensité de travail et la FC a été démontrée ; les chevaux étaient attachés lors de la nage et luttaient donc contre une résistance supplémentaire. Cette corrélation ne s'appliquerait peut-être pas à un exercice sans contrainte.

S'intéressant à la morphologie cardiaque, Davie *et al.* (2008) ont étudié l'impact de l'entraînement en piscine sur l'épaisseur de la paroi cardiaque et la fraction de raccourcissement. Il n'y a pas de différence significative ni entre les deux groupes (avec et sans entraînement en piscine) ni entre le début et la fin de chaque période d'entraînement chez ces deux groupes. Il n'y a également pas de changement significatif du diamètre du ventricule gauche avant et après la période d'entraînement chez ces deux groupes. Bien que non significatifs, le diamètre du ventricule gauche est passé de 7,2 à 7,5 mm et la fraction de raccourcissement de 37 % à 34,6 % dans le groupe qui incluait la nage.

L'étude de Klomp *et al.* (2014) n'a pas pu démontrer de corrélation entre la FC et le niveau de performance, définie par une note calculée selon les courses réalisées avant et pendant l'étude. En d'autres termes, la FC observée pendant la nage n'avait aucun lien avec le classement du cheval lors des courses.

La nage en piscine représente donc un exercice de moindre intensité que sur piste mais entrainerait probablement un stress cardiovasculaire, par rapport à de la marche rapide par exemple où cette dernière entraîne une tachycardie ne dépassant pas 120 bpm (Santosuosso *et al.*, 2022). Les retours veineux et lymphatique augmentés grâce à la pression hydrostatique de l'immersion dans l'eau et à une vasoconstriction périphérique dans le cas d'une immersion dans de l'eau froide pourraient également expliquer la tachycardie lors de la nage (Jones *et al.*, 2020).

Il est intéressant de se poser la question de l'impact du réflexe d'immersion dans le contexte de la nage chez le cheval. Plusieurs études, dont celle de Santosuosso *et al.* (2022), expriment la possible implication de ce réflexe sur les paramètres physiologiques du cheval. Ce réflexe a en effet été démontré chez les mammifères et est suspecté comme présent chez le cheval depuis 1977 par Fregin et Nicholl (1977). Il est défini comme un réflexe autonome s'exprimant normalement lors de la plongée mais existant également avec d'autres stimulus comme par exemple lors de l'immersion du visage dans de l'eau froide chez l'Homme. Ce réflexe entraîne apnée, bradycardie et redirection du flux sanguin vers le cœur, le cerveau et les surrénales. Son objectif serait de sauvegarder l'oxygène et réduire le métabolisme, réduire la charge de travail du cœur et sa consommation en O₂ ainsi que diminuer la température du corps (Sherwood *et al.*, 2016).

- Sur le rythme cardiaque

La seule étude disponible à ce sujet est celle de Santosuosso *et al.* (2022), dans laquelle la nage fait partie intégrante du programme des chevaux depuis deux mois. Le protocole consiste en de la nage en ligne droite (75 mètres) cinq fois avec 100 mètres de pas actif entre chaque passage. Dans cette étude comprenant 16 chevaux d'endurance et 80 électrocardiogrammes (ECG), 94 % des chevaux ont présenté au moins une arythmie (physiologique et isolée pour la plupart) et 27 % des ECG réalisés durant la nage ont montré au moins une arythmie (19 arythmies physiologiques et 23 pathologiques). Les arythmies physiologiques comprennent l'arythmie sinusale, le bloc sinusal, le bloc atrio-ventriculaire de second degré et la pause sinusale. Les arythmies pathologiques incluent les extrasystoles ventriculaires (ESV) (figure 20), extrasystoles supra-ventriculaires (ESSV) et la tachycardie atriale. L'arythmie la plus fréquente lors de la nage était l'ESSV (sur 13 % des ECG et chez 37,5 % des chevaux) puis l'extrasystole ventriculaire (sur 10,4 % des ECG et chez 43,8 % des chevaux). Il est intéressant de noter que la fréquence de ces arythmies n'augmentait pas au fil des passages. Aucune tachycardie atriale, flutter ou fibrillation n'ont été observés. Deux blocs atrio-ventriculaires ont été mis en évidence chez deux chevaux avant l'exercice.

Figure 22 : ESV sur l'ECG d'un cheval (crédit : EnvA)



La fréquence des arythmies sinusales et des ESSV est significativement plus élevée pendant la phase de récupération que pendant la nage. 14 chevaux (soit 87,5 %) ont eu une arythmie durant cette période. Un bloc sinusal a été observé chez 43,8 % des chevaux à la sortie de la piscine et une arythmie sinusale a été observée chez 81,3 % des chevaux après des blocs sinusaux ou lors des phases de transition entre la nage et le pas, phases durant lesquelles il existe un déséquilibre entre les systèmes nerveux sympathique (tendance à être activé par l'activité physique) et parasympathique (tendance à être activé par l'immersion). Ces fréquences sont rapportées dans le tableau 10 ci-dessous.

Tableau 10 : Nombre de chevaux ayant présenté de l'arythmie (et nombre total d'arythmies) d'après l'étude de Santosuosso *et al.* (2022)

	Longueur n°	Bloc sinusal	Pause sinusale	ESSV	ESV
Repos avant nage		0	0	0	0
Nage	1	1 (2)	5 (5)	5 (6)	3 (3)
	2	1 (2)	1 (1)	0	1 (1)
	3	1 (1)	2 (3)	3 (5)	3 (3)
	4	1 (1)	2 (2)	2 (3)	0
	5	1 (1)	1 (1)	0	1 (2)
Récupération active	1	4 (5)	1 (2)	5 (11)	0
	2	4 (4)	0	1 (2)	0
	3	2 (4)	1 (1)	2 (2)	0
	4	6 (10)	0	1 (1)	0
	5	6 (12)	0	1 (1)	0

Notons cependant que, bien que classées dans la catégorie « pathologique » par les auteurs, les ESSV peuvent être considérées comme physiologiques après un exercice chez le cheval et les ESV ne sont pas préoccupantes lorsqu'elles sont isolées.

Cette arythmie pourrait découler de la phase d'apnée que présentent les chevaux lors de l'entrée dans le bassin (voir partie 4.C.a), ce phénomène existant chez l'Homme. Il a également été démontré que le stress associé à une tachycardie augmentent les probabilités d'apparition d'arythmies (Physick-Sheard et McGurrin, 2010).

Des arythmies sont également retrouvées chez les triathlètes humains (notamment des ESV), principalement lors de la phase de récupération immédiate. Les facteurs de risques identifiés sont identiques à ceux identifiés chez le cheval : l'immersion dans eau froide associée au stress et à l'exercice entraîne une activation sympathique tandis que l'apnée et la modification du pattern respiratoire entraînent une activation parasympathique (par le réflexe d'immersion) (Hohmann *et al.*, 2018).

Nous pouvons retenir de cette étude que la nage en piscine entraîne l'apparition fréquente d'arythmies physiologiques et le plus souvent isolées, ne compromettant pas les performances du cheval.

Cette étude a également permis, sur le plan scientifique, de démontrer qu'il est possible d'obtenir des ECG de bonne qualité et avec peu d'artéfacts lors de la nage. Il serait donc intéressant de réaliser ce même type d'étude sur des chevaux de course, de sport et dans un contexte de rééducation afin de confirmer ou d'infirmer les résultats obtenus par cette étude.

- Sur les pressions artérielles

L'étude de Thomas *et al.* (1980) a révélé un doublement de la pression artérielle (PA) au niveau de la carotide (300 mmHg), cette augmentation étant corrélée au travail fourni par le cheval. Cette variation n'est en revanche pas observée lors de la course sur le terrain, puisque les PA systolique et PA moyenne sont de 205 et 160 mmHg respectivement (Hörnigke *et al.*, 1977). Rappelons que les pressions varient physiologiquement selon la localisation de la mesure comme le rappelle le tableau 7. L'augmentation de la PA durant la nage serait due à l'augmentation de la pression hydrostatique et à la diminution de la thermorégulation (permise par la grande conductance thermique de l'eau). Cette même étude a également mis en évidence une augmentation de pression dans les atrioms et le ventricule droit ainsi qu'au niveau de l'artère pulmonaire, sans révéler de corrélations entre ces paramètres et le travail. La nage serait donc à l'origine d'un stress sur le système cardiovasculaire.

Il est important de noter que cette conclusion est contre-intuitive dans le sens où les mécanismes d'adaptation pour fournir un apport suffisant en oxygène impliquent normalement une vasodilatation artérielle (Sherwood *et al.*, 2016), on s'attendrait donc à observer une baisse des résistances périphériques totales dans ce contexte et une légère hausse de la pression artérielle moyenne. Il est fort probable que d'autres mécanismes soient davantage impliqués dans l'apport accru en oxygène (tachycardie, tachypnée, libération d'hémoglobine, augmentation de la concentration de myoglobine dans les cellules musculaires).

b. Conséquences de la marche en tapis immergé

Le stress, en activant le système adrénérgique, crée une stimulation sympathique à l'origine de tachycardie. L'étude de Nankervis et Williams (2006) a d'ailleurs montré l'importance de l'habituation du cheval à la marche et à son environnement avant toute récolte de données sur la physiologie de cette pratique chez le cheval.

- Sur la fréquence cardiaque

Le tableau 11 résume les FC observées lors de la marche en tapis immergé. Pour rappel, les protocoles résumés de chaque étude sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 11 : Tableau comparatif des fréquences cardiaques lors de la marche en tapis immergé

Étude	Fréquence cardiaque (moyenne, maximale, écart-type et/ou intervalle) (bpm)
(Voss <i>et al.</i> , 2002)	Maximale : 96 +/- 11,8 (trot au-dessus des coudes)
(Nankervis <i>et al.</i> , 2008)	Dans l'eau à 13°C : 79 +/- 6 Dans l'eau à 16°C : 89 +/- 7 Dans l'eau à 19°C : 92 +/- 5
(Lindner <i>et al.</i> , 2010)	Moyenne : 69 Maximale : 78
(Scott <i>et al.</i> , 2010)	Articulation interphalangienne proximale : 61,1 +/- 8,3 Carpe : 60,6 +/- 6,7 Ulna : 64,7 +/- 8
(Lindner <i>et al.</i> , 2012)	1 ^e étude SET 1, 2 et 3 : [115 - 140] 2 ^e étude : [120 - 160]
(Muñoz, 2018)	Sans eau : 66,13 +/- 8,92 Articulation métacarpo-phalangienne : 71,09 +/- 9,90 Tarse : 81,89 +/- 10,67 Grasset : 81,13 +/- 14,68
(Greco-Otto <i>et al.</i> , 2017)	Moyennes : 59 à 69 Maximale : 78

De même que pour les études concernant la nage en piscine, celles concernant la marche en tapis immergé ont employé diverses méthodes afin de mesurer les fréquences cardiaques. L'étude de Nankervis *et al.* (2008) a par exemple eu recours à un moniteur cardiaque pour récolter

les données tandis que Greco-Otto *et al.* (2017) ont utilisé un ECG télémétrique (comme celui présenté dans les figures 20 et 21).

Il est tout d'abord intéressant de noter que les fréquences cardiaques obtenues sont toutes inférieures à celles de la nage en piscine.

Les résultats de l'étude de Nankervis *et al.* (2008) laissent penser que plus la température de l'eau dans laquelle est immergé le cheval est élevée, plus la fréquence cardiaque (FC) est élevée. En effet, cette étude a mis en évidence une différence significative entre la FC à 13°C et 16°C et celle entre 13°C et 19°C. De plus, au début de l'exercice (T0), la FC à 13°C est déjà significativement inférieure à celle à 16°C et 19°C. L'étude a également rapporté une diminution de la FC au cours des neuf premières minutes. Les auteurs suggèrent que cette baisse pourrait être expliquée par une diminution du stress ou par une déperdition de chaleur. Une étude approfondie de la relation temps/FC a permis de mettre en évidence le fait que la baisse de la FC n'était pas seulement due à l'habituation du cheval moins stressé, mais aussi à la température de l'eau, puisque cette diminution de FC était plus rapide dans l'eau à 13°C que dans celles à 16°C et 19°C. Dans une eau plus froide, les récepteurs cutanés entraînent une augmentation des résistances vasculaires périphériques et donc une baisse de fréquence cardiaque (cf formule de la loi fondamentale de l'hémodynamique présentée en début de partie B).

L'étude de Lindner *et al.* (2010) rapporte des FC plus faibles, alors que la température de l'eau de cette étude est plus élevée (20°C). La vitesse, la durée de la plupart des exercices sont également plus élevées, mais la hauteur de l'eau parfois plus basse. Les auteurs expliquent cette moindre tachycardie, en comparaison d'un exercice sur terrain, par un travail plus faible, une température froide de l'eau et une pression hydrostatique importante. Quel que soit le protocole d'exercice en tapis, une augmentation significative de la FC est objectivée et influencée par l'intensité de l'effort. Globalement, l'exercice en tapis immergé est qualifié de faible intensité, réclamant de faibles sollicitations et peu de contraintes. La FC dépend également de la température et de la hauteur de l'eau.

Dans une étude plus récente, Lindner *et al.* (2012) ont réalisé diverses expériences permettant de montrer l'influence de la vitesse et de la hauteur de l'eau sur la fréquence cardiaque. La première expérience s'intéressant à la vitesse dans une hauteur d'eau fixe a permis de montrer une augmentation significative de la FC jusqu'à un certain point selon les exercices (5, 10 ou 15 minutes), puis une stagnation de cette dernière. La seconde s'intéressant à la hauteur de l'eau à une vitesse fixe imposée et maximale a abouti à la même conclusion. Les explications concernant l'obtention d'une valeur constante de FC malgré l'augmentation de vitesse ou de hauteur d'eau étaient les mêmes que lors de l'étude de Lindner *et al.* (2010). Il est intéressant de noter que les FC de cette étude sont plus élevées que les FC moyennes des autres études exposées. De plus, l'étude de Greco-Otto *et al.* (2017) a montré une différence significative entre la FC dans l'eau et celle sur tapis sec. Cette dernière est plus élevée dans l'eau, quelle que soit la vitesse du tapis. Elle est également significativement plus élevée lorsque l'eau est au niveau de la patella plutôt qu'au canon. La différence de FC observée entre ces deux dernières études s'expliquerait par la différence d'exercice imposé (vitesse notamment).

Voss *et al.* (2002) ont mis en évidence une différence significative entre la valeur de base au repos (32 +/- 1.6 bpm) et les valeurs à l'exercice (minimum 69 +/- 15.4 bpm au pas sur le tapis sec et maximum 96 +/- 11.8 bpm pour le trot avec eau au-dessus des coudes). Ces valeurs sont cohérentes avec celles relevées dans les autres études. Il n'y avait pas de différence significative

concernant les niveaux d'eau. Globalement, il y avait une augmentation du rythme cardiaque quand le travail s'intensifie, sans différence significative. Les valeurs de fréquence cardiaque restent cependant assez faibles et la conclusion était identique aux études précédentes, la marche en tapis immergé équivaut à un travail d'intensité faible à moyenne. L'étude de Muñoz (2018) montre des FC similaires aux autres études et révèle des différences significatives entre la FC sur le tapis sans eau et toutes les valeurs correspondant à une immersion, quelle que soit la hauteur. Seules les FC obtenues avec l'eau aux hauteurs du tarse et de l'articulation métacarpo-phalangienne sont significativement différentes l'une de l'autre.

L'exercice en tapis immergé entraîne une tachycardie faible en comparaison à des exercices sur le terrain (27,7 à 32,7 % de la FC maximale d'après Greco-Otto *et al.* (2017)) et à la nage. L'étude de Thomas et Fregin (1981) rapporte une FC oscillant entre 190 et 200 bpm lors d'exercice au galop sur tapis de course pour comparaison. La FC semble dépendre de la température de l'eau. Il serait donc intéressant de standardiser la température de l'eau des études afin de pouvoir les comparer. Elle ne semble en revanche pas dépendre de la hauteur de l'eau ou de la vitesse pour Lindner *et al.* (2012) bien qu'une hauteur plus élevée entraîne un travail musculaire accru et que l'étude de Greco-Otto *et al.* (2017) ait observé une influence de la vitesse (sans aucune relation linéaire) et de la hauteur de l'eau. Cet aspect mérite d'être davantage investigué dans de futures études. La faible tachycardie observée en tapis immergé serait expliquée par la flottabilité, la pression hydrostatique et la température de l'eau qui limitent l'augmentation de la FC par réorientation du sang dans les muscles qui travaillent (bien décrit chez l'Homme) et par l'augmentation du retour veineux entraînant un meilleur remplissage cardiaque (Lindner *et al.*, 2012). La FC observée en tapis immergé est moindre que celle en piscine probablement car cet exercice demanderait un moindre effort.

Contrairement aux études en piscine, les pressions artérielles n'ont pas été étudiées ces dernières années. Il serait intéressant de réaliser ces investigations afin de les comparer aux valeurs obtenues lors de la nage ou lors de la course sur tapis par exemple.

- Sur le rythme cardiaque

L'étude de Voss *et al.* (2002) s'intéressant au rythme cardiaque durant la marche en tapis immergé a montré une différence significative entre l'écart type des intervalles NN (déterminant la variabilité de la fréquence cardiaque) au repos (plus élevé) et ceux des différents exercices (sur terrain ou dans l'eau). De plus, la variabilité de la fréquence cardiaque est significativement plus élevée durant la marche sur tapis sec comparativement à la marche et au trot dans l'eau à hauteur des coudes ainsi qu'au trot avec l'eau au-dessus des carpes. Il est intéressant de noter que le rythme cardiaque dans cette étude est plus stable lors de la marche en tapis immergé au-dessus des coudes plutôt que lors du trot sur tapis sec. Cette étude a donc permis de conclure à une diminution de la variabilité de la fréquence cardiaque en augmentant le travail et la fréquence cardiaque lors du travail en tapis immergé.

A l'aide d'une analyse de fréquences (une basse fréquence correspondant au système nerveux sympathique et une haute fréquence au parasympathique), l'étude précédente a permis de montrer une augmentation significative du système nerveux sympathique et une diminution significative concomitante du système nerveux parasympathique pendant l'exercice. En effet, le système nerveux autonome a une influence sur le nœud sino-atrial cardiaque et modifie donc les paramètres cardiaques.

Tableau 12 : Tableau récapitulatif et comparatif des effets de la nage et de la marche en tapis immergé sur les paramètres cardiovasculaires

Paramètre cardiovasculaire		Nage	Marche en tapis immergé	Comparaison tapis immergé/nage
Fréquence cardiaque	Variabilité	Augmentation modérée	Augmentation discrète	Nage plus intense que la marche en tapis immergé
	Influence (positive/négative)	Vitesse de nage (positive) Intensité (positive)	Température (positive) Intensité (positive) Hauteur d'eau (positive) (incertain)	
	Commentaire	Semblable au canter ou galop Plus intense que le tapis de course	Intensité faible à moyenne	
Débit cardiaque	Variabilité	Augmentation		
Volume d'éjection systolique	Variabilité	Augmentation		
Arythmies	Variabilité	Augmentation	Diminution	Différentes observations mais mesures différentes
	Commentaire	Arythmies physiologiques		
Pression artérielle	Variabilité	Augmentation		

Une influence négative dans ce tableau désigne le fait que le paramètre indiqué dans la case « influence » diminue le paramètre étudié. A l'inverse, une influence positive désigne le fait que le paramètre indiqué dans la case « influence » augmente le paramètre étudié.

C. Conséquences sur le système respiratoire

a. Sur la fréquence et le pattern respiratoires

- Conséquences de la nage

Le tableau 13 ci-après résume les fréquences respiratoires (FR) observées dans les différentes études s'intéressant à la nage chez le cheval. Pour rappel, les protocoles des différentes études sont résumés dans le tableau 1.

Tableau 13 : Tableau comparatif des fréquences respiratoires lors de la nage

Étude	Fréquence respiratoire (moyenne/médiane, écarts-type et/ou intervalle) pendant la nage (rpm)	Fréquence respiratoire (moyennes et/ou intervalle) après la nage (rpm)	Observations
(Murakami <i>et al.</i> , 1976)	EXP 1 : aucune donnée EXP 2 : [15 - 23] EXP : [16 - 29]	EXP 1 : [42 - 54] (après 10 min et 20 min de nage) EXP 2 : [30 - 48]	Retour à la valeur de repos en 10 minutes quelle que soit la durée pour l'EXP 1
(Nicholl <i>et al.</i> , 1978)	24	45	
(Galloux <i>et al.</i> , 1992)	[14 - 24]	[50 - 60]	
(Hobo <i>et al.</i> , 1998)	[25 - 30]	[52 - 59]	
(Jones <i>et al.</i> , 2002)	28		
(Jones <i>et al.</i> , 2020)	28 +/- 5		
(Leguillette <i>et al.</i> , 2022)	12 (30 premières secondes) Médiane : 31		Bradypnée les 30 premières secondes

Les fréquences respiratoires rapportées par les études présentées dans le tableau ci-dessus sont toutes proches. Il semblerait que la nage en piscine provoque une très discrète tachypnée, bien moindre que celle de 120 rpm observée sur le terrain lors d'exercice intense (Jones *et al.*, 2020). Ces fréquences respiratoires moindres en piscine (correspondant à 25 % de celles rencontrées lors d'exercice sur le terrain) seraient expliquées d'une part par la présence d'une phase d'apnée mais également par la pression de l'eau appliquée sur la cage thoracique et l'abdomen (Hobo *et al.*, 1998). Toutes les études rapportent une hyperventilation et une tachypnée à la sortie de l'eau. L'hypothèse de ce changement post exercice serait une compensation d'une dette en oxygène ou une lutte contre l'hypercapnie.

D'après les expériences réalisées par Murakami *et al.* (1976), la fréquence respiratoire tend à augmenter lorsque la vitesse de nage augmente, non lorsque la durée de l'exercice augmente.

La littérature rapporte, pour la plupart des articles, une respiration stéréotypée pendant la nage et plus particulièrement au moment où le cheval est immergé et flotte (Jones *et al.*, 2020). Celle-ci se caractérise par une phase d'apnée pendant une dizaine de mètres (Galloux *et al.*, 1992) ou durant en moyenne 18,9 secondes (Jones *et al.*, 2020) suivie d'une expiration forcée, puis une inspiration brève suivie d'une expiration longue et bruyante (Galloux *et al.*, 1992 ; Jones *et al.*, 2020 ; Murakami *et al.*, 1976 ; Nicholl *et al.*, 1978). Cette dernière étude rapporte une phase de courte apnée supplémentaire entre l'inspiration brève et l'expiration. L'expiration forcée permettrait de diminuer la pression sur la cage thoracique (Galloux *et al.*, 1992) tandis que la phase d'apnée reste un point d'ombre, puisqu'il n'a pas été démontré si cette apnée est un réflexe autonome ou bien volontaire. Les études parlent d'un probable impact du réflexe d'immersion détaillé en partie 4.B.a. ou encore un mécanisme utilisé pour maintenir la flottabilité (Jones *et al.*, 2020).

L'étude de Jones *et al.* (2020) rapporte également un pattern modifié chez deux chevaux inclus. Ces derniers présentent une respiration normale pendant quatre temps puis une phase d'apnée cycliquement.

Un second type de pattern respiratoire est avancé par Hobo *et al.* (1998). En effet, cette étude décrit un cycle composé d'une inspiration sur un tiers du temps suivi d'une expiration plus longue sur deux tiers du temps restant, contrairement à ce qui est observé sur le terrain (habituellement la moitié du cycle en inspiration et l'autre moitié en expiration). Dans ce contexte, les auteurs avancent que cette adaptation permettrait de limiter la vidange soudaine (en augmentant le temps de vidange des alvéoles) et le collapsus des voies respiratoires secondaire à la pression de l'eau, et favoriserait également la flottabilité. Le même ratio inspiration/expiration est décrit par Leguillette *et al.* (2022).

- Conséquences de la marche en tapis immergé

Tableau 14 : Tableau des fréquences respiratoires lors de la marche en tapis immergé

Étude	Fréquence respiratoire (rpm)
(Greco-Otto <i>et al.</i> , 2017)	Min : 32 mpm Max : 52 mpm Moyenne : 46 mpm

Greco-Otto *et al.* (2017) n'ont dans leur étude pas mis en évidence de différence significative entre la FR observée sur tapis sec et celle lors de l'exercice en tapis immergé. Cependant, ils rapportent une différence significative selon la hauteur d'eau en tapis immergé. La FR est en effet plus élevée lorsque l'eau est à mi-canon ou au carpe plutôt qu'au niveau des rotules. Donc plus la hauteur de l'eau est importante, moins la FR l'est. Il est intéressant de noter que cet exercice entraîne une tachypnée plus élevée que lors de la nage, mais plus faible que lors de marche sur tapis sec.

L'étude du volume tidal (pour rappel le volume d'air entrant ou sortant des poumons au cours d'un cycle ventilatoire) dans cette publication a révélé une différence significative entre l'exercice contrôle (sans eau) et l'exercice avec de l'eau à hauteur des rotules, quelle que soit la vitesse. Le volume tidal était également plus important pour des niveaux d'eau à mi-canon et au carpe, mais

cette observation ne concernait pas toutes les vitesses. En comparant les différentes hauteurs d'eau, le volume tidal était significativement plus élevé lorsque l'eau était à la hauteur des rotules. Ces observations permettent donc de déduire que le volume tidal augmenterait avec la hauteur de l'eau et la vitesse. Sa valeur moyenne était de 4,90L dans cette étude, cette valeur étant à peu près similaire à celles retrouvées lors d'entraînement sur tapis sec.

Les auteurs ont observé une respiration plus lente et plus profonde, caractérisée par une FR plus basse et un volume tidal plus élevé. Cette adaptation de la respiration favoriserait la ventilation alvéolaire, les échanges gazeux et réduirait l'espace mort.

Contrairement à la nage en piscine, il n'existe pas, à la connaissance des auteurs, de différence dans le cycle respiratoire. En effet, aucune phase d'apnée n'a été observée et il n'y avait aucune différence significative du rapport inspiration/expiration lors d'un cycle respiratoire, les médianes tout exercice confondu étant de 0,92 s et 0,75 s respectivement.

b. Sur les voies aériennes supérieures

Des épisodes d'épistaxis (figure 23) ont été observés lors de la nage dans l'étude de Sherwood *et al.* (2016). Ces saignements sont caractérisés comme occasionnels et à des niveaux bas d'exercice. Il aurait été intéressant de réaliser une endoscopie des voies respiratoires supérieures et trachéale afin de déterminer l'origine de ces saignements (provenant des voies respiratoires supérieures ou inférieures), et d'avoir à disposition plus d'informations sur la survenue de ces saignements, comme par exemple le moment d'apparition, s'ils étaient uni ou bilatéraux et le nombre d'individus touchés.

Figure 23 : Cheval présentant de l'épistaxis (crédit EnvA)



L'étude de Jones *et al.* (2020) a montré, chez les huit chevaux inclus, que pendant la phase d'apnée, les narines sont collabées par la lèvre supérieure (figure 24). De plus, un collapsus des voies aériennes supérieures défini par une adduction des cartilages aryénoïdes, un collapsus des cordes vocales et du nasopharynx sont observés à l'endoscopie durant la nage. Deux chevaux présentaient également une rétroversion de l'épiglotte au même moment.

Figure 24 : Aspect des narines lors de la nage dans l'étude de Jones *et al.* (2020)



Hobo *et al.* (1998) ont montré une augmentation des pressions intra-trachéales pendant l'exercice (4-4,5 kPa à l'inspiration et 4,8-5,1 kPa à l'expiration). Ces pressions à peu près identiques différaient de ce qui est observé sur le terrain (la pression inspiratoire est normalement plus élevée que la pression expiratoire). Cette étude n'a en revanche pas révélé d'anomalies à l'endoscopie trachéale.

La nage en piscine semble donc induire une augmentation de la pression expiratoire, ce qui semble cohérent avec ce qui a été rapporté dans la partie précédente. Les observations macroscopiques obstruant le passage de l'air lors de la respiration sont également concordantes avec l'apnée rapportée dans la partie précédente. Ces observations permettent de conclure à une possible hypoventilation lors de la nage.

c. Sur les voies aériennes inférieures

- Pression intra-thoracique

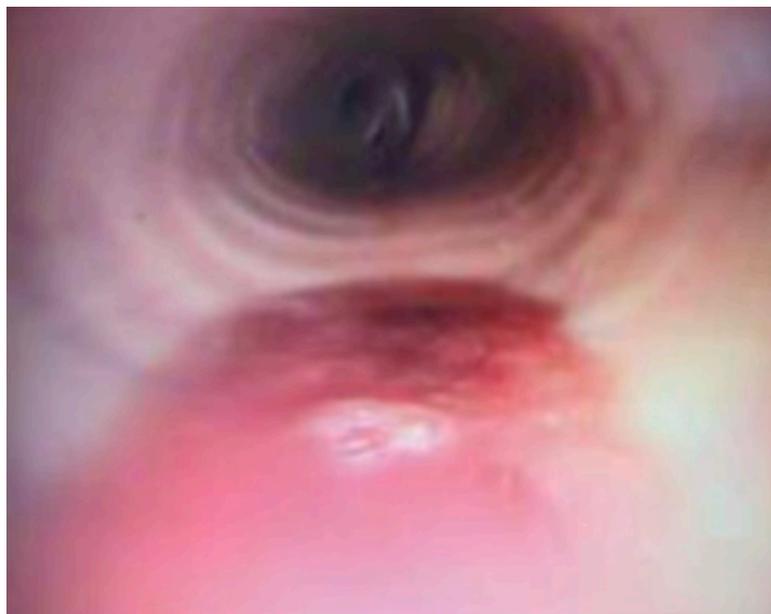
La nage entraîne un changement de pression sur la cavité thoracique. Dans l'étude de Jones *et al.* (2002), la pression intra-pleurale à l'expiration lors de la nage correspondait au double de celle enregistrée au galop (9 à 10,5 kPa et 3,5-4,3 kPa respectivement). De plus, la respiration est modifiée comme vu dans la partie précédente. Les conséquences physiques de ces deux modifications entraînent une pression forte et négative dans l'espace pleural pouvant entraîner secondairement une augmentation de la pression intra-murale pulmonaire et donc engendrer un stress sur les capillaires pulmonaires (Jones *et al.*, 2002 ; Vinardell *et al.*, 2023). Il est ainsi légitime de se demander si la nage pourrait entraîner des hémorragies pulmonaires induites à l'exercice (HPIE).

En médecine humaine, une augmentation de la pression intra-thoracique peut entraîner un œdème pulmonaire chez les nageurs, se caractérisant par des troubles respiratoires aigus associés à une hémoptysie, une toux et une dyspnée. Ces symptômes se résorberaient dans 82% des cas. Les facteurs de risques décrits sont l'eau froide, l'exercice, une augmentation de la pression inspiratoire, l'âge et le stress (Grünig *et al.*, 2017). L'étude de Hohmann *et al.* (2018) confirme l'importance de l'eau froide dans le déclenchement des œdèmes pulmonaires (par augmentation de la pression veineuse centrale, de la pression artérielle pulmonaire et des résistances veineuses périphériques entraînant un œdème interstitiel).

- Saignements pulmonaires

Jones *et al.* (2020) ont observé la présence de sang dans la trachée (grade 1/4) chez deux chevaux inclus dans l'étude (voir le descriptif des grades dans l'annexe 2). La nage pourrait donc induire des HPIE. Cependant, l'échantillon reste trop faible pour conclure, d'autant plus que le travail imposé dans cette étude était intense (nage sur place maintenu par des élastiques). La figure 25 présente la vision endoscopique de sang dans la trachée d'un cheval.

Figure 25 : Sang dans la trachée d'un cheval lors d'une endoscopie (crédit EnvA)



Dans cette continuité, une récente étude de Vinardell *et al.* (2023) a réalisé des endoscopies et des lavages bronchoalvéolaires sur les chevaux afin de déterminer les effets de la nage sur les voies respiratoires inférieures. Cette étude n'a pas montré de présence de sang dans les voies respiratoires des quinze chevaux inclus, et l'analyse cytologique ne montre qu'une médiane de 271 globules rouges/ μL alors que le seuil diagnostique de l'HPIE se situe à partir de 1000 cellules/ μL . De même, le rapport hémosidérophages/macrophages est inférieur à 0,01. Cette étude n'est ainsi pas en faveur d'apparition d'HPIE secondaire à un exercice de natation libre.

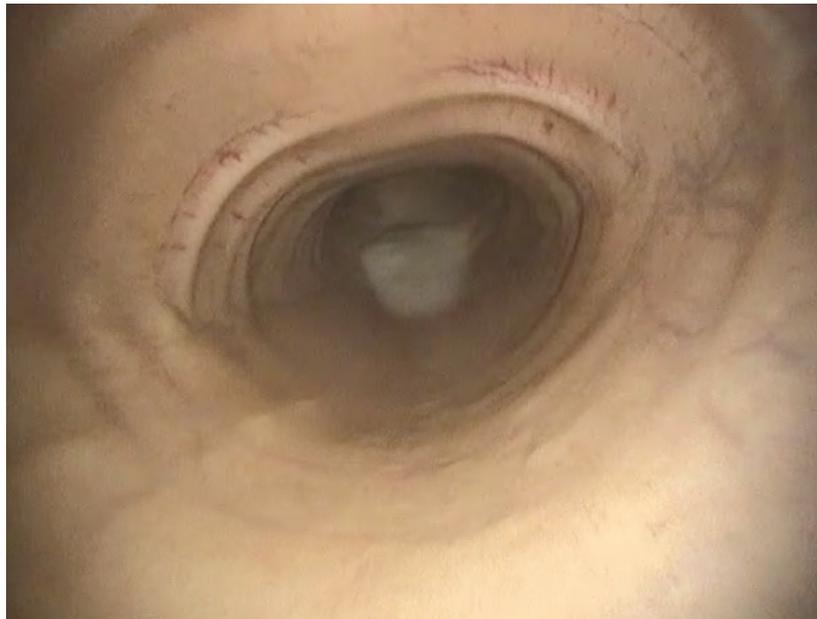
Jones et Hiraga (2006) rapportent que des vétérinaires de la « Japan Racing Association » ont observé de l'épistaxis durant l'exercice en piscine mais que l'origine semblait plutôt venir du pharynx après contrôle endoscopique. Des entraîneurs ont par ailleurs diagnostiqué à l'endoscopie des HPIE après la nage, mais ces mêmes chevaux ont couru sur piste au préalable, il n'est donc pas possible de déterminer le moment d'apparition exacte de l'HPIE.

Le lien entre nage en piscine et HPIE chez le cheval reste controversé. Il serait intéressant de réaliser des études sans exercice sur piste et incluant des prélèvements de liquide bronchoalvéolaire afin de pouvoir explorer l'apparition d'HPIE et d'inflammation des voies respiratoires profondes avec la nage. Les HPIE sont le plus souvent retrouvées lors d'efforts intense, par exemple chez les chevaux de course. L'association HPIE et nage devrait être un sujet de recherche important dans les années à venir, car bien que le niveau de preuves soit modéré, l'HPIE réduirait les performances d'un cheval de course et induit des lésions pulmonaires (Hinchcliff *et al.*, 2015). Les chevaux présentant de l'HPIE pourraient donc se voir contre-indiquée la pratique de la nage en piscine.

- Inflammation pulmonaire

L'étude de Jones *et al.* (2020) a également permis de mettre en évidence la présence de mucus trachéal (décrite comme faible à marquée) chez sept des huit chevaux inclus dans l'étude, lors d'endoscopies réalisées 30 minutes après exercice. La figure 26 présente la vision endoscopique de mucus dans la trachée d'un cheval.

Figure 26 : Mucus trachéal lors d'une endoscopie chez un cheval (crédit EnvA)



Cette observation a également été confirmée par Vinardell *et al.* (2023). Les scores de mucus dans cette étude sont compris entre 0 et 3,5 (un score anormal étant considéré comme supérieur à 2), 13 chevaux sur 15 ayant un score entre 0 et 2 (voir le descriptif des grades en annexe 2). La moitié des chevaux n'ont en revanche montré aucun signe d'inflammation dans le liquide bronchoalvéolaire collecté. L'autre moitié présente une augmentation modérée des neutrophiles, éosinophiles et/ou mastocytes, révélant une inflammation pulmonaire possiblement secondaire à la présence de chlore dans l'eau, cette association ayant déjà été démontrée chez l'Homme (Ondolo *et al.*, 2009). Les figures 26 à 29 montrent l'aspect macroscopique d'un LBA normal et anormal ainsi que l'aspect microscopique d'un LBA montrant une inflammation.

Au contact des matières organiques, le chlore se transforme en chloramine et cette molécule (plus concentrée à la surface de l'eau) est inhalée par le cheval. La chloramine induit ensuite une inflammation pulmonaire par affection de l'épithélium. La littérature humaine à ce sujet démontre des inflammations et remodelages (sur biopsies bronchiques) semblables à un asthme léger ainsi qu'une production accrue de mucus (secondaire à une déshydratation des voies respiratoires et à une adaptation chronique face à l'inflammation). La chloramine peut de plus entraîner une hyperréactivité bronchique ou encore une rhinite (Kanikowska *et al.*, 2018). Ces observations toucheraient surtout les individus sensibles ou très exposés mais le lien avec la désinfection de l'eau par le chlore est incertain (cette inflammation pourrait également être dûe à une augmentation de la ventilation minute ou à un stress mécanique) (Bougault et Boulet, 2012). Il serait judicieux d'étudier les effets de la nage chez le cheval sur l'inflammation pulmonaire en menant des études semblables

à celles réalisées chez l'Homme, et de comparer ces effets selon différentes méthodes de désinfection de l'eau. L'étude de Kanikowska *et al.* (2018) a par ailleurs évoqué la chloramine comme étant irritant non seulement pour la muqueuse respiratoire mais aussi pour les yeux et la peau, à forte concentration. L'étude de ces potentiels effets sur le cheval serait à envisager également.

Figure 27 : Liquide broncho-alvéolaire normal d'un cheval après prélèvement par endoscopie (crédit EnvA)

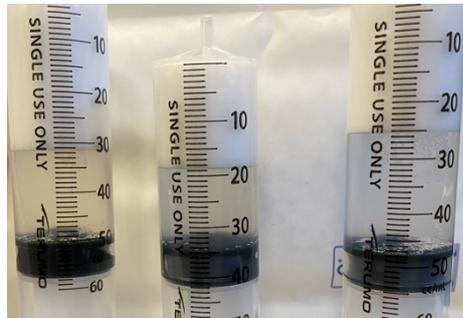


Figure 28 : Liquide broncho-alvéolaire modifié par des saignements chez un cheval après prélèvement par endoscopie (crédit EnvA)



Figure 29 : Lame microscopique provenant d'un prélèvement broncho-alvéolaire et montrant une quantité importante de neutrophiles (flèches rouges) (crédit EnvA)

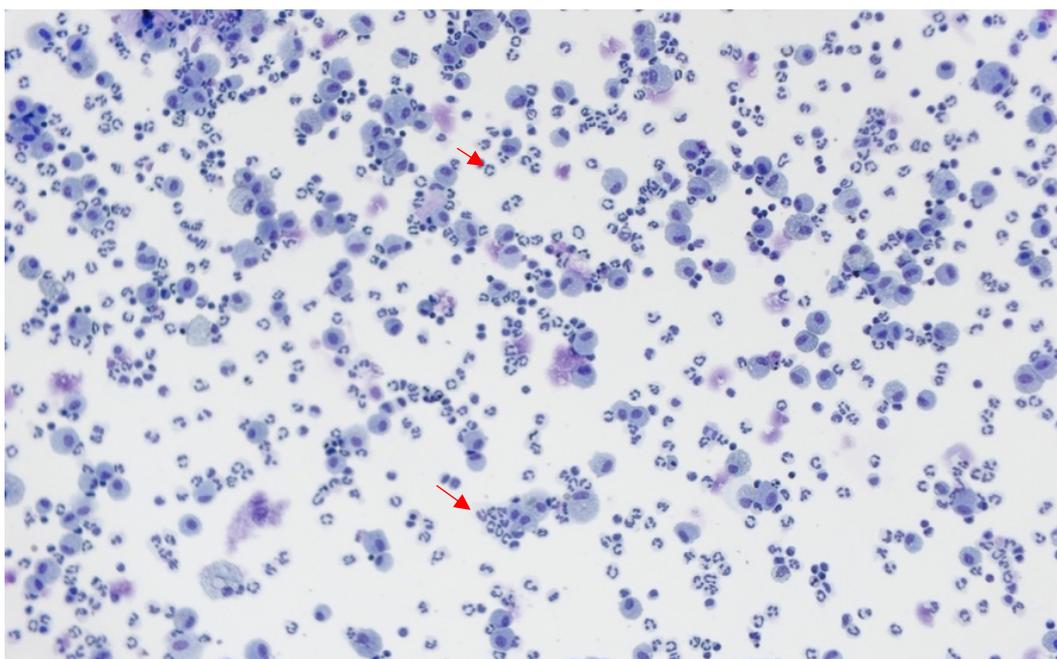


Tableau 15 : Tableau récapitulatif et comparatif des effets de la nage et de la marche en tapis immergé sur les paramètres respiratoires

Paramètre respiratoire		Nage	Marche en tapis immergé	Comparaison nage/tapis immergé
FR	Variabilité	Augmentation discrète puis modérée à la sortie	Augmentation	Tachypnée en tapis immergé plus marquée
	Influence (positive/négative)	Vitesse (positive)	Hauteur d'eau (négative)	
	Commentaire	25% des FR de terrain Cycle stéréotypé et modifié avec des phases d'apnée	Moindre que sur tapis de course Respiration plus lente et plus profonde Pas de modification du cycle	
Volume Tidal	Variabilité		Augmentation	
	Influence (positive/négative)		Hauteur de l'eau (positive) Vitesse (positive)	
	Commentaire		Semblable au tapis de course	
HPIE	Présence/absence	Absence (incertain)		
Inflammation pulmonaire (mucus et LBA)	Présence/absence	Présence modérée (LBA) Mucus : présence mais scores sous le seuil pathologique pour la majorité des chevaux		

Une influence négative dans ce tableau désigne le fait que le paramètre indiqué dans la case « influence » diminue le paramètre étudié. A l'inverse, une influence positive désigne le fait que le paramètre indiqué dans la case « influence » augmente le paramètre étudié.

D. Conséquences sur le système musculaire

D'un point de vue général, l'exercice en milieu aquatique permet d'augmenter l'activation des muscles et de réduire la charge sur les articulations (Nankervis *et al.*, 2021). Ce type d'exercice permet également un massage naturel des masses musculaires et favorise le drainage pour la résorption des œdèmes et la lutte contre l'engorgement (Lafon, 2015).

a. Conséquences de la nage

Macroscopiquement, l'étude de Murakami *et al.* (1976) a noté un développement des pectoraux, des muscles glutéaux et un arrondissement de l'arrière-train. Notons que l'hypertrophie musculaire est en général plutôt observée lors d'exercices en anaérobie, courts ou d'intensité forte (Sherwood *et al.*, 2016).

L'étude de Tokuriki *et al.* (2010) a permis d'identifier les muscles sollicités lors de la nage par la réalisation d'électromyogrammes (EMG) sur les muscles suivants : splénius, sterno-céphalique, brachio-céphalique, triceps brachial, brachial, extenseur digital commun, fléchisseur profond du doigt et quadriceps fémoral. Il doit être précisé que ce type d'étude est complexe compte tenu des nombreuses variations intra- et interindividuelles. Néanmoins, les muscles les plus sollicités lors de la nage sembleraient être le muscle brachio-céphalique et le triceps brachial (par une extension accrue du coude lors de la nage), le muscle fléchisseur profond du doigt (par une flexion accrue du doigt et du carpe) et le muscle splénius (figures 30 et 31). L'étude rapporte enfin une augmentation des muscles antigravitationnels alors que la force de gravité est moindre lors de la nage. Les figures 32 et 33 montrent la flexion du carpe et du doigt et l'extension du coude lors d'un cycle de nage.

Microscopiquement, l'étude de Misumi *et al.* (1995) sur 18 jeunes pur-sang a permis de suivre pendant cinq mois l'adaptation musculaire de chevaux dont l'entraînement inclue de la course sur tapis et de la nage, de la course sur tapis seule ou bien de la nage seule. L'analyse des fibres musculaires a montré une différence significative entre le début et après trois mois d'entraînement dans le groupe pratiquant la course sur tapis associée à la nage : les auteurs ont observé une augmentation des fibres à contraction rapide et forte oxygénation dès le deuxième mois et une diminution des fibres à contraction rapide et faible oxygénation au troisième mois. Cela suggère une amélioration de la capacité oxydative des fibres musculaires squelettiques lors d'un exercice nécessitant endurance et intensité. En effet, le développement de fibres oxydatives induit une quantité accrue de mitochondries permettant la production d'ATP à partir de l'oxygène. Un développement marqué des capillaires musculaires afin d'augmenter l'apport d'oxygène est également observé (Sherwood *et al.*, 2016). Le caractère aérobique du travail musculaire est confirmé par Galloux *et al.* (1992), ainsi que par la faible augmentation des lactates lors de la nage abordée dans la partie 4.A.a.

Murakami *et al.* (1976) n'ont dans leur étude pas montré d'augmentation des créatines kinases après la nage (sauf lors de l'exercice prolongé fixé à 60 minutes). La même étude n'a pas révélé d'augmentation des ASAT sauf pour la deuxième moitié de l'expérience 2 (après 15 et 20 minutes de nage). Ces résultats ont permis aux auteurs d'avancer que la nage, d'un point de vue musculaire, équivaut à une course au trot moyen. Cette activité ne serait pas dangereuse pour les muscles mais il est à noter que le développement musculaire diffère de celui développé sur le terrain. La nage en piscine aurait donc un intérêt musculaire lors d'un entraînement combiné incluant de la piste.

Figure 30 : Muscles superficiels d'un cheval (les muscles cutanés du cou et du tronc ont été enlevés), d'après Barone (2000)

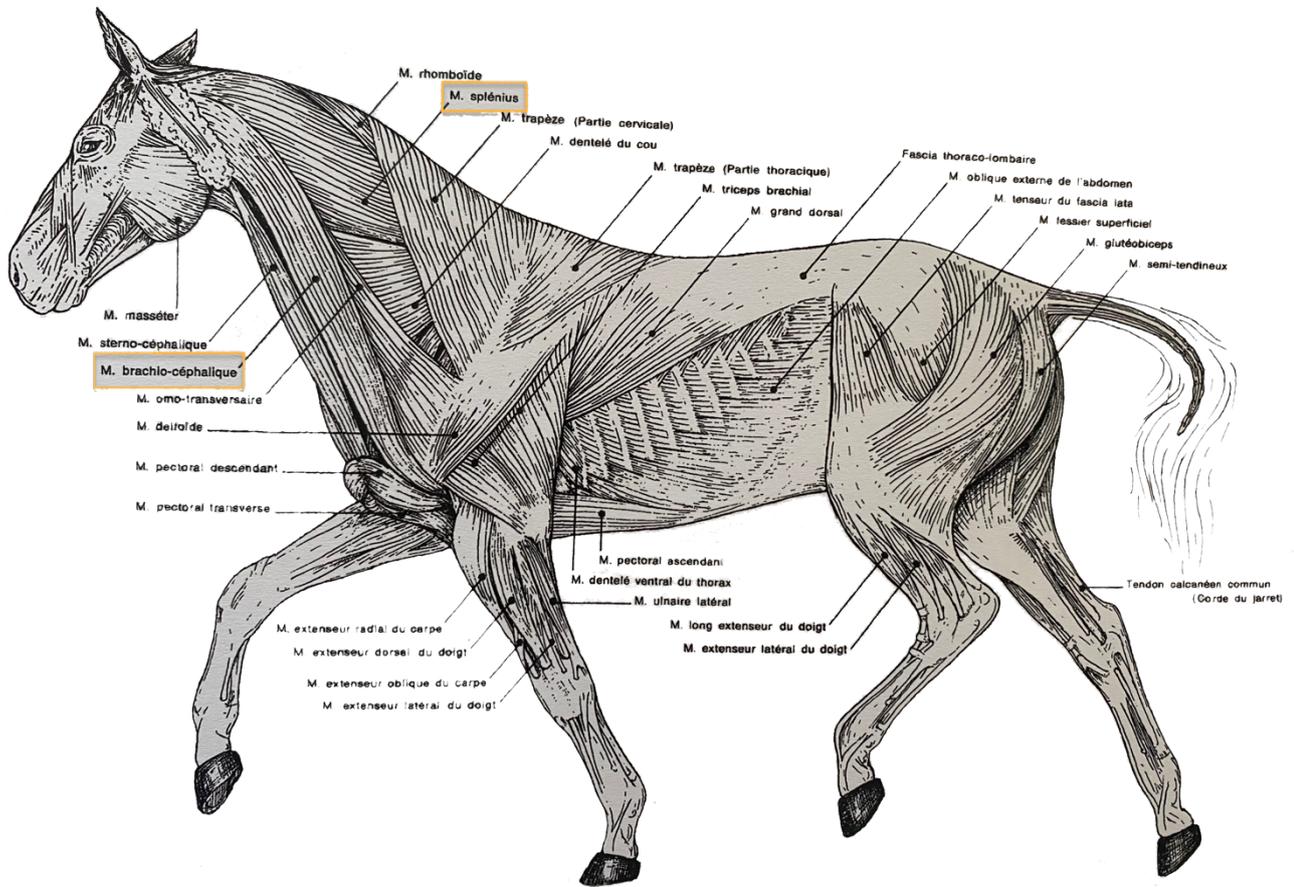


Figure 31 : Muscles fléchisseurs du doigt d'un cheval (membre gauche, vue médiale après ouverture large des gaines), d'après Barone (2000)

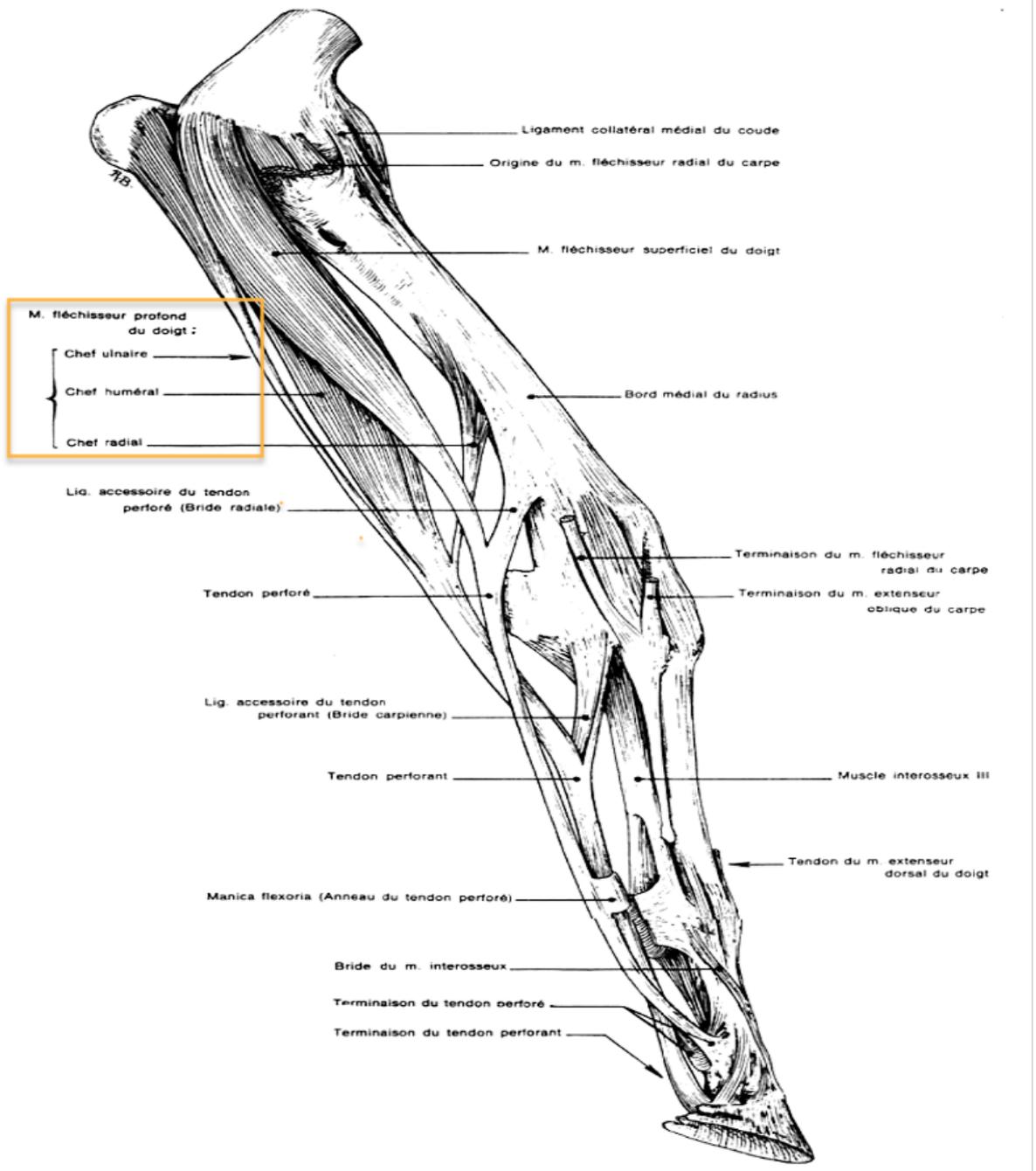


Figure 32 : Flexion du doigt et du carpe lors de la nage (crédit EnvA)



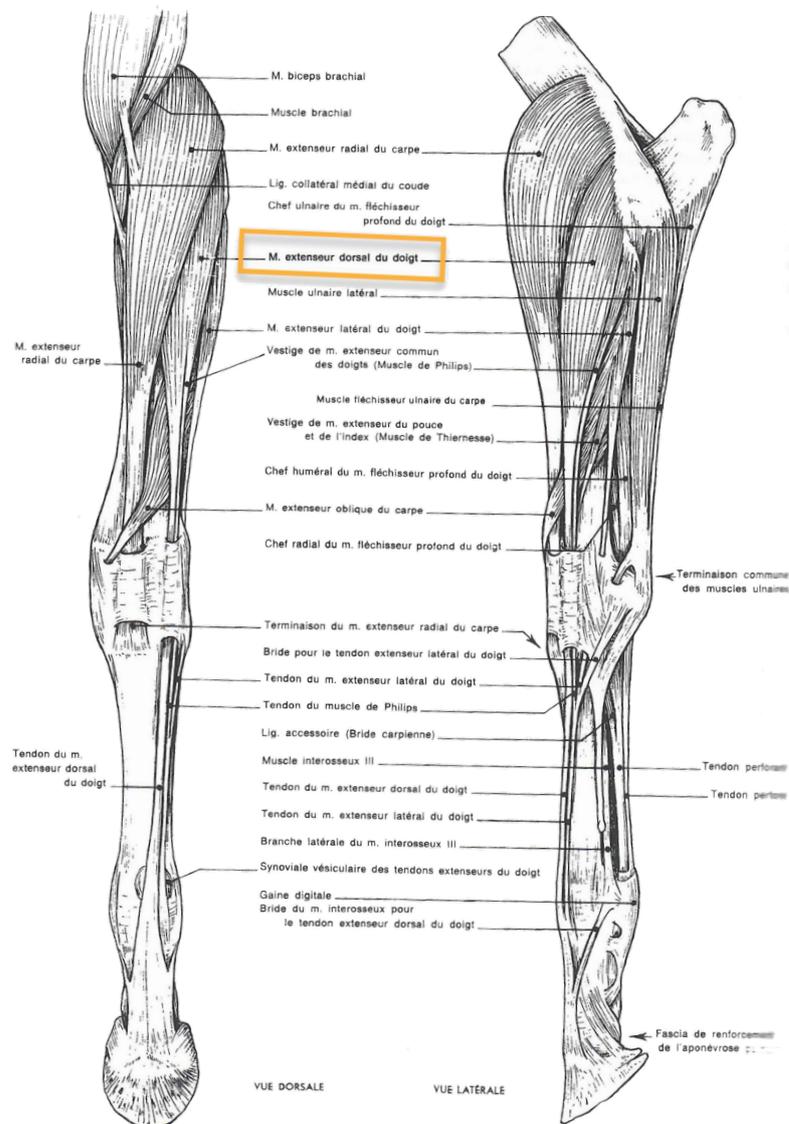
Figure 33 : Extension du coude lors de la nage (crédit EnvA)



b. Conséquences de la marche en tapis immergé

L'étude de Tokuriki *et al.* (2010) précédemment citée a également réalisé des EMG lors de la marche en tapis immergé (au pas et au trot). Cette étude a mis en évidence un fonctionnement accru de l'extenseur digital commun au pas et au trot, expliqué par une protraction contre la résistance de l'eau. De plus, le pas nécessite une utilisation accrue des muscles antérieurs contrairement au trot, car il y aurait un moindre effet du poids sur la force gravitationnelle. Le muscle brachiocephalique et le triceps brachial sont impliqués dans la marche et le trot en tapis immergé, mais de façon moindre que lors de la nage (figure 34). Enfin, l'étude a permis de mettre en évidence une activité intense du muscle extenseur dorsal du doigt lors de la marche en tapis immergé.

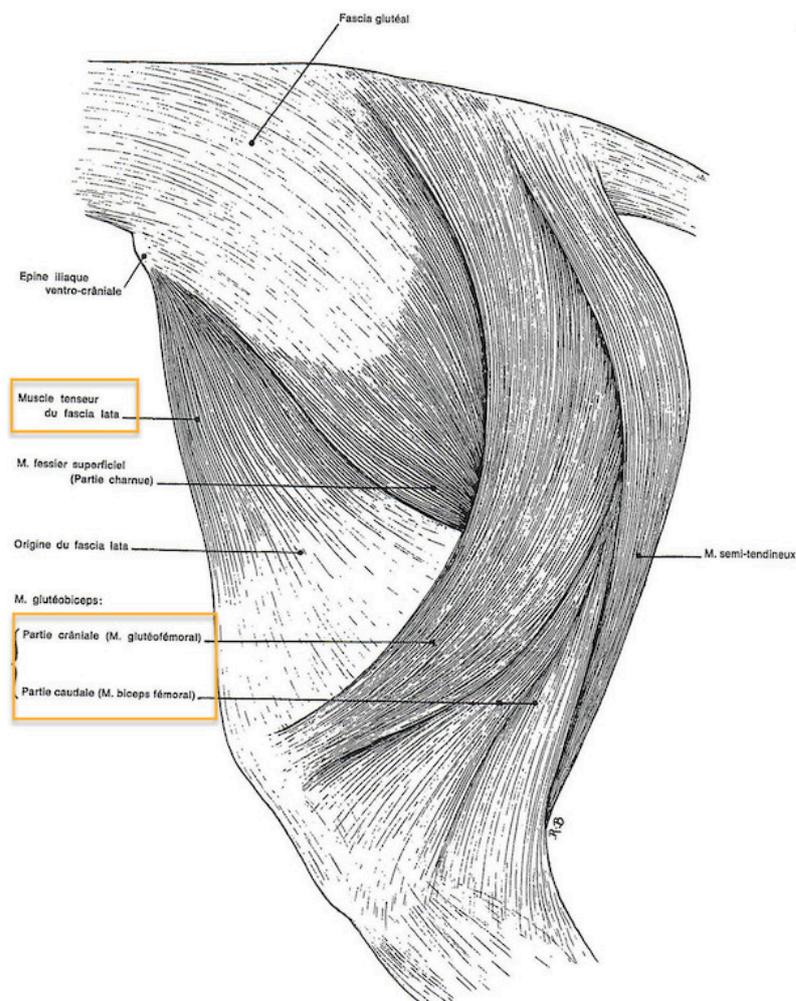
Figure 34 : Muscles de l'avant-bras d'un cheval (vues dorsales et latérales), d'après Barone (2000)



Murray *et al.* (2020) ont réalisé une étude observationnelle portant sur 44 chevaux s'entraînant régulièrement sur tapis (toutes les semaines ou toutes les deux semaines) et 23 chevaux ne l'utilisant pas, les deux groupes étant appariés par race et statut d'entraînement. Une comparaison du développement musculaire effectuée par un vétérinaire expérimenté et un assistant a été réalisée entre le début de l'étude et la vingtième semaine d'étude, en utilisant une grille de scoring précise et jugée reproductible. Ces observations concernaient l'encolure, le trapèze cervical, le trapèze thoracique, le thorax, la musculature lombo-sacrée, les fessiers, les ischio-jambiers, les adducteurs et abducteurs des membres postérieurs ainsi que la musculature abdominale. L'étude a conclu après 20 semaines à un développement significatif de toutes les zones sauf du trapèze cervical et de la région abdominale chez les chevaux utilisant le tapis immergé. Le développement le plus significatif était localisé aux fessiers et à la musculature des membres postérieurs.

Scott *et al.* (2010) concluent également que la marche en milieu aquatique peut accroître l'activité des muscles permettant la flexion de la hanche (muscle glutéal superficiel, muscle tenseur du *fascia lata*), du grasset (biceps fémoral caudal) et la protraction du postérieur (muscles iliopsoas et tenseur du *fascia lata*) (figure 35).

Figure 35 : Muscles du bassin et de la cuisse du cheval (membre gauche, plan superficiel, vue latérale) d'après Barone (2000)



Il semblerait donc que, contrairement à la nage, la marche en tapis immergé développerait plutôt les muscles postérieurs. Des études objectives et quantitatives sur l'effet de la marche en tapis immergé des muscles postérieurs seraient intéressantes pour confirmer ces hypothèses.

L'étude de Fleming *et al.* (2014) s'est intéressée à l'impact de la marche en tapis immergé (l'eau étant au niveau de l'articulation interphalangienne proximale ou au niveau du carpe) sur la circulation locale, le métabolisme tissulaire et le flux sanguin local via la mesure de la température cutanée par thermographie infrarouge en regard du muscle semi-tendineux. Cette étude a conclu à une différence significative de température à la surface de ce muscle entre la marche sur tapis sec et la marche en tapis immergé. La température en regard du muscle était en effet plus élevée lorsque le cheval marchait sur un tapis sec. Ceci peut s'expliquer par la température plus froide de l'eau qui, par les mécanismes de transfert thermique expliqués en partie 1.B. permet un refroidissement efficace du muscle contrairement à l'air qui est moins conducteur. De plus, bien que non significative, l'augmentation de température était plus importante lorsque le cheval marchait en immersion. Cela pourrait s'expliquer par une activité musculaire accrue et donc une production de chaleur plus importante lors de l'exercice. La hauteur de l'eau n'avait en revanche pas d'effet sur la température à la surface du muscle.

De même que pour la nage en piscine, la marche en tapis immergé ne semble pas affecter le système musculaire. En effet, Lindner *et al.* (2010) ont démontré dans leur étude que les créatines kinases sont en moyenne à 42,3 UI/l et que la valeur maximale atteint 82,3 UI/L. Ces valeurs augmentent de manière significative à l'issue de presque tous les exercices en tapis immergé mais restent dans les normes (100-300 UI/l) (Mcgowan et Hodgson, 2014). L'augmentation est également significative dans l'étude de Lindner *et al.* (2012) et il n'y a pas de différence entre les valeurs obtenues selon la hauteur de l'eau. Les créatines kinases de la deuxième expérience de cette étude (pour rappel 25 minutes de nage à vitesse constante avec une augmentation progressive de la hauteur d'eau) deviennent même stables après 15 minutes d'exercice. Ces observations sont confirmées par l'étude de Borgia *et al.* (2010), laquelle a noté une faible augmentation des CK (272,4 +/- 52,8 UI/l) quatre heures après exercice mais restant tout de même dans les normes usuelles. Vincze *et al.* (2013) n'ont eux pas montré de différence entre les valeurs de CK et ASAT avant, pendant et après l'exercice.

Vincze *et al.* (2013) et Vincze *et al.* (2016) sont partagés face à la conclusion de la plupart des études. En effet, leurs études affirment que la lactatémie ne suffit pas à conclure sur la difficulté de l'exercice en milieu aquatique, et les valeurs des CK et ASAT (bien que subnormales) obtenues dans leurs études laisseraient penser que « les chevaux sujets à un exercice régulier mais court et intense pourraient avoir des dommages musculaires chroniques se caractérisant par des valeurs de CK comprises entre 200 et 300 U/L ». Ces légères augmentations ne correspondraient pas à une rhabdomyolyse mais à une augmentation de perméabilité de la membrane cellulaire musculaire. Cette étude a également permis de montrer que l'alimentation n'a qu'une faible influence sur les paramètres mesurés (Vincze *et al.*, 2016).

D'un point de vue local, l'effet biochimique d'un entraînement avec tapis immergé pendant quatre semaines sur les muscles fléchisseur superficiel du doigt et glutéal a été rapporté par Borgia *et al.* (2010). Cette étude n'a montré aucune différence significative avant et après entraînement des concentrations intra-musculaires en glycogène, ATP, glucose-6-phosphate, lactates et citrate synthase. De plus, aucune différence significative n'a été mise en évidence sur les types de fibres contenues dans chaque muscle. Les quatre semaines d'entraînement en milieu aquatique n'ont donc permis aucun changement des capacités oxydatives et glycolytiques des muscles étudiés, ni

aucun changement de concentrations des substrats et métabolites musculaires. Il apparait donc qu'un exercice suivant les caractéristiques imposées par cette étude (durée, vitesse, hauteur de l'eau) ne soit pas suffisant pour induire des changements microscopiques sur les muscles étudiés. Dans cette continuité, Firshman *et al.* (2015) ont montré lors de l'étude des mêmes muscles une absence de changement métabolique et un discret changement sur les fibres musculaire de type I, sans que celui-ci ne soit significatif. Il serait intéressant d'étudier ces mêmes paramètres dans des protocoles comprenant des exercices plus longs ou à une vitesse plus rapide, et d'étendre ce type d'étude à d'autres muscles considérés comme sollicités dans ce type d'exercice. Il est également important de préciser que pour des raisons pratiques lors de ces études, les biopsies musculaires pré-exercice ont été réalisées sur des chevaux « contrôle » différents de ceux ayant participé au protocole.

Tableau 16 : Tableau récapitulatif et comparatif des effets de la nage et de la marche en tapis immergé sur les paramètres musculaires

Paramètre musculaire		Nage	Marche en tapis immergé
CK	Variation	Stables	Augmentation
	Commentaire	Semblable à un trot moyen	Dans les normes
ASAT	Variation	Stables	Stables
Muscles		Développement antérieur surtout	Développement postérieur surtout et antérieur

E. Conséquences sur la température corporelle

a. Conséquences de la nage

Peu d'études se sont intéressées de manière exhaustive à l'évolution de la température corporelle du cheval lors de la nage.

Murakami *et al.* (1976) ont étudié ces changements pendant leurs deux premières expériences (augmentation brutale ou progressive du temps de nage ; voir tableau en partie 2.A.b. pour rappel). La première expérience montre que la température augmente avec le temps de nage (augmentation de 0,2 à 0,4°C après 5 minutes et de 0,7 à 1,7°C après 20 minutes). Le retour à la valeur initiale est constaté après une heure pour les 5 minutes de nage et deux heures pour les 20 minutes de nage. La deuxième expérience n'a quant à elle pas mis en évidence de lien entre la température et le temps de nage (augmentation de 0,3 °C après cinq minutes de nage et de 1°C après 10 ou 20 minutes).

Hobo *et al.* (1998) ont mesuré la température de l'artère pulmonaire lors de leur étude. Celle-ci était de 39 +/- 0,3°C après le 6^e tour de 50 mètres. Les auteurs ont alors conclu à une augmentation progressive, mais seule la température du sixième tour était significativement différente de la température pré-exercice.

Contrairement aux précédentes études, Jones *et al.* (2020) n'ont pas mis en évidence de différence significative entre les valeurs pré- et post-exercice de la température rectale.

L'impact de la nage sur la température corporelle dépend évidemment de la quantité de chaleur produite lors du travail musculaire et donc de l'intensité de ce travail, mais aussi de la capacité du cheval à évacuer cette chaleur. Elle dépend donc du travail imposé et de la température de l'eau dans laquelle le cheval est immergé ainsi que de l'hygrométrie et de la température de la pièce. Sachant que la convection est un mécanisme responsable de la thermorégulation, il serait intéressant dans ce contexte d'évaluer l'influence de la respiration sur cette régulation, puisque la nage provoque une modification du pattern respiratoire comme vu dans les parties précédentes.

b. Conséquences de la marche en tapis immergé

L'étude de Lindner *et al.* (2012) a montré une augmentation significative de la température rectale des chevaux dans ses deux expériences (faisant varier la vitesse et/ou la hauteur d'eau). En effet, la température rectale moyenne obtenue en fin de première expérience est de 38,4°C, et celle de la deuxième expérience est de 38,2 +/- 0,2°C. Dans cette même étude, la température rectale augmente plus dans l'eau à 10% de la hauteur au garrot contrairement aux hauteurs supérieures correspondant à 50 et 80 % de la hauteur au garrot. Cela pourrait être expliqué par la plus grande surface corporelle immergée permettant une plus grande déperdition de chaleur grâce à la conductivité de l'eau, plus importante que celle de l'air. Néanmoins, les études actuelles ne permettent pas de savoir clairement quels paramètres ont davantage d'effets sur la température rectale (hauteur de l'eau, vitesse, durée de l'exercice).

Bien que les conditions ne soient évidemment pas les mêmes (type d'exercice, durée, vitesse, présence d'eau...), les températures obtenues lors de l'étude précédente semblent être plus faibles que celles observées par Thomas et Fregin (1981) lors d'exercice sur tapis sec (de 38°C au repos à 39,3°C).

Une augmentation significative de la température rectale, quel que soit l'exercice en tapis immergé, a également été démontrée dans l'étude de Lindner *et al.* (2010). Il y a dans cette étude une influence du type d'effort sur cette augmentation. Notons tout de même que bien que significative, cette augmentation est très faible (entre 0,2 et 0,6°C, la température moyenne étant de 37,4°C).

Tableau 17 : Tableau récapitulatif et comparatif des effets de la nage et de la marche en tapis immergé sur la température corporelle

Température corporelle	Nage	Marche en tapis immergé
Variation	Augmentation discrète ou absente	Augmentation discrète

F. Conséquences sur les performances

a. Conséquences de la nage

Thomas *et al.* (1980) ont mis en évidence une corrélation entre la consommation d'O₂ (maximum 25-112 ml/kg/min) et le travail en piscine à partir d'un certain seuil de travail imposé lors de la nage attachée. Le taux d'extraction d'O₂ atteignant jusqu'à 9 % dans l'étude, une mobilisation intense des érythrocytes est nécessaire. La capacité aérobique du cheval correspond au double de celle de l'Homme. L'augmentation de la VO₂ (considérée comme étant la meilleure mesure de la capacité aérobique musculaire et cardiovasculaire) ne peut être seule expliquée par l'augmentation du débit cardiaque (comme vu dans la partie B.a.). Les adaptations physiologiques telles que l'augmentation de l'hématocrite, du taux d'hémoglobine, de l'extraction d'oxygène permettent un apport accru d'oxygène en parallèle.

L'étude de Leguillette *et al.* (2022) rapporte une VO₂ médiane de 37,1 ml/kg/min et des valeurs oscillant entre 26,7 et 47,5 ml/kg/min. Pour comparaison, la valeur de la VO₂ maximale lors d'exercice intense sur tapis sec dans l'étude de Ohmura *et al.* (2013) était comprise entre 224 et 239 ml/kg/min et la valeur contrôle sur piste était comprise entre 222 et 231 ml/kg/min.

Cette faible consommation en oxygène, associée à de faibles augmentations des lactates et de la FC, montre que la nage est un exercice d'intensité faible à moyenne. Nicholl *et al.* (1978) confirment dans leur publication que ce type d'entraînement correspond à un exercice d'intensité moyenne.

On peut donc conclure que la nage est un travail plutôt aérobique malgré la présence d'une hypoventilation, grâce à des mécanismes d'adaptation (augmentation du débit cardiaque, sollicitation et libération accrue de l'hémoglobine, augmentation de la myoglobine des cellules musculaires). Les mécanismes habituellement utiles sur le terrain comme la tachypnée, la tachycardie et la vasodilatation artérielle sont peu ou non retrouvés lors de la nage, probablement secondaire au réflexe d'immersion et à l'effet de la pression hydrostatique sur le cheval.

L'entraînement en piscine reste néanmoins plus intense que la pratique du dressage, aussi intense que le CSO et le trot rapide (sur le plan cardiovasculaire) et moins intense que le trot rapide (concernant le métabolisme) d'après l'étude de Knudsen et Jørgensen (2000).

b. Conséquences de la marche en tapis immergé

L'étude de Greco-Otto *et al.* (2017) s'est intéressée à la consommation d'oxygène (ou VO₂) lors de la marche en tapis immergé et a permis de conclure que similairement à la nage, l'exercice en tapis immergé correspondait à un exercice de faible intensité (faible augmentation de la VO₂). La VO₂ était significativement plus élevée à vitesse élevée qu'à faible vitesse, quelle que soit la hauteur de l'eau. Elle était également significativement plus élevée que lors de l'exercice « contrôle » (absence d'eau dans le tapis), quelle que soit la hauteur de l'eau et la vitesse du tapis (excepté à faible vitesse et faible hauteur d'eau). La VO₂ correspondant à la hauteur la plus importante (rotules) était significativement plus élevée que celle à des hauteurs plus basses, quelle que soit la vitesse. La consommation maximale d'oxygène est donc influencée par la hauteur de l'eau et la vitesse du tapis dans ce type de travail. La VO₂ dans cette étude était comprise entre 10,44 et 16,70 ml/kg/min.

L'impact de la marche en tapis immergé sur les performances à l'entraînement a été étudié par Greco-Otto *et al.* (2020). Les paramètres mesurés pour traduire cette performance sont la VO₂

ainsi que la vitesse lors d'une course. L'étude vise à comparer les performances sur piste avant et après une période de 18 jours d'entraînement en tapis immergé. Il apparaît dans cette étude que le pic de VO_2 après entraînement en tapis immergé est significativement plus élevé que celui des chevaux entraînés sur tapis simple, cette valeur est augmentée de 16,1 %, ce qui signifie que l'entraînement en immersion permet une plus grande extraction d' O_2 . En revanche, cette étude n'a pas montré d'effet de l'entraînement immergé sur les paramètres ventilatoires (fréquence respiratoire, volume tidal, ventilation minute) et sur les paramètres cardiovasculaires (fréquence cardiaque, temps de récupération cardiaque et lactates). Bien que ce type d'entraînement n'ait pas permis une augmentation de la vitesse maximale instantanée, il existe une différence significative de 17,4 % entre la vitesse moyenne pré et post entraînement et le temps imparti pour les derniers 800 mètres est significativement plus court. La vitesse finale est également significativement plus rapide après l'entraînement aquatique, cela pourrait être expliqué par l'augmentation de la puissance des muscles responsables de la propulsion et une meilleure stabilité posturale. Il semble donc que ce type d'exercice améliore l'endurance sur piste. Les auteurs évoquent cependant que ce travail correspond à un travail faible (car il correspond à 21,7 % de la VO_2 max de l'entraînement sur piste) et ne peut remplacer des formes d'entraînements bien plus intenses.

Tableau 18 : Tableau récapitulatif et comparatif des effets de la nage et de la marche en tapis immergé sur la performance (VO_2)

Paramètre		Nage	Marche en tapis immergé	Comparaison tapis/nage
VO_2	Variation	Augmentation faible	Augmentation faible	Augmentation moindre en tapis qu'en piscine
	Influence (positive/négative)	Intensité de l'exercice (positive)	Vitesse (positive) Hauteur de l'eau (positive)	
	Commentaire	Faible par rapport aux valeurs observées sur le terrain		

Une influence négative dans ce tableau désigne le fait que le paramètre indiqué dans la case « influence » diminue le paramètre étudié. A l'inverse, une influence positive désigne le fait que le paramètre indiqué dans la case « influence » augmente le paramètre étudié.

Conclusion

L'utilisation du travail en milieu aquatique permet non seulement une réduction du poids du cheval lors de l'exercice grâce à la force d'Archimède et à la flottabilité (et donc une diminution de la charge sur les membres) mais aussi une force accrue de travail imposé grâce aux résistances qu'oppose l'eau aux mouvements du cheval. Il permettrait également une amélioration des capacités cardiovasculaires et musculaires en réduisant la charge sur le squelette axial, mais aussi une diminution des problèmes locomoteurs (y compris en préventif). A ces propriétés s'ajoutent les effets bénéfiques de la pression hydrostatique et de la température de l'eau. Ce type d'entraînement semble donc avoir un intérêt chez le cheval athlète.

Cette revue bibliographique montre une large diversité d'installations (taille, forme, profondeur, température de l'eau) mais aussi une grande variabilité d'utilisations (indications, protocoles). Il apparaît que les études sont peu comparables en pratique tant les protocoles diffèrent, mais certaines observations semblent cependant largement répandues.

L'utilisation du tapis immergé et de la nage en piscine ne sont pas décrites comme un substitut au travail sur piste, mais plutôt comme un exercice complémentaire dans un cadre d'entraînement mixte. Ce type d'entraînement pourrait être utile principalement pour des chevaux pratiquant le saut d'obstacle ou le dressage ou dans un contexte de réhabilitation de tous les chevaux, quelle que soit la discipline pratiquée. Des études supplémentaires sont nécessaires pour conclure sur l'impact de ce type d'entraînement seul par rapport à un entraînement classique ou mixte.

L'exercice en piscine induit des stress cardiovasculaires et métaboliques plus intenses que la marche en tapis immergé. Concernant la marche en tapis immergé, considérée comme étant à faible impact dans les protocoles actuellement décrits, il faudrait, pour observer un net changement sur la physiologie définir des protocoles plus poussés (en augmentant la vitesse, la hauteur de l'eau ou encore la durée d'exercice).

De manière générale, l'entraînement en milieu aquatique est considéré comme un exercice principalement aérobique d'intensité faible à modérée compte tenu des valeurs des paramètres sanguins obtenues lors des études présentées. Cependant, certaines études suggèrent que la seule observation de la lactatémie ne suffit pas à conclure une telle observation. L'analyse des CK et des ASAT, bien qu'en faible augmentation durant l'exercice pourrait donner des informations supplémentaires quant à la difficulté de l'exercice dans de futurs protocoles d'études.

Cette revue permet de mettre en évidence un manque de données concernant la marche en tapis immergé (plus particulièrement sur les paramètres sanguins et sur les conséquences sur les voies respiratoires inférieures). Les données en piscine sont davantage disponibles mais il serait intéressant d'apporter des informations complémentaires ou confirmer les conclusions de certaines études (par exemple sur la présence ou non d'HPIE et d'inflammation pulmonaire) mais aussi développer des protocoles permettant une comparaison entre l'utilisation de la piscine et du tapis immergé. Les facteurs influençant les paramètres étudiés comme la température de l'eau, la vitesse de nage ou du tapis immergé ainsi que la hauteur de l'eau en tapis immergé commencent à être décrits mais nécessitent d'être confirmés. Leur influence est d'autant plus importante qu'elle

permettrait d'adapter le travail imposé au cheval lors de chaque séance. En effet, il est certain que chaque protocole dépend du cheval, de ses potentielles affections et des objectifs à atteindre, mais il est à adapter à chaque instant de l'exercice afin d'assurer un cadre de travail sécuritaire et efficace.

Liste des références bibliographiques

- ALGAFLY, A.A., GEORGE, K.P. (2007) The effect of cryotherapy on nerve conduction velocity, pain threshold and pain tolerance. *British Journal of Sports Medicine* vol. 41, n° 6, p. 365-369; discussion 369. [<https://doi.org/10.1136/bjsem.2006.031237>]
- ALLAAM, M., ELSEADY, Y., NAYEL, M., *et al.* (2014) Physiological and hemato-chemical evaluation of thoroughbred race horses after exercise. -. *International Journal for Agro Veterinary and Medical Sciences* vol. 8, n° 3, p. 81-93.
- ARINEO (2022) La thermorégulation chez le cheval athlète. In *Arineo*. [<https://training.arineo.com/fr/blog-la-thermoregulation-chez-le-cheval-athlete/>] (consulté le 19/11/2023).
- BARONE, R. (2000) Anatomie comparée des mammifères domestiques. Tome 2 : Arthrologie et myologie. Paris, Éditions Vigot.
- BONELLI, F., SGORBINI, M., MEUCCI, V., *et al.* (2017) How swimming affects plasma insulin and glucose concentration in Thoroughbreds: A pilot study. *Veterinary Journal* vol. 226, p. 1-3. [<https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2017.06.006>]
- BORGIA, L.A., VALBERG, S.J., ESSEN-GUSTAVSSON, B. (2010) Differences in the metabolic properties of gluteus medius and superficial digital flexor muscles and the effect of water treadmill training in the horse. *Equine Veterinary Journal* vol. 42, n° S38, p. 665-670. [<https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.2010.00229.x>]
- BOUGAULT, V., BOULET, L.-P. (2012) Is there a potential link between indoor chlorinated pool environment and airway remodeling/inflammation in swimmers? *Expert Review of Respiratory Medicine* vol. 6, n° 5, p. 469-471. [<https://doi.org/10.1586/ers.12.51>]
- BUCHNER, H.H., OBERMÜLLER, S., SCHEIDL, M. (2000) Body centre of mass movement in the sound horse. *Veterinary Journal* vol. 160, n° 3, p. 225-234. [<https://doi.org/10.1053/tvjl.2000.0507>]
- BUCHNER, H.H.F., SCHILDBOECK, U. (2006) Physiotherapy applied to the horse: a review. *Equine Veterinary Journal* vol. 38, n° 6, p. 574-580. [<https://doi.org/10.2746/042516406x153247>]
- BURNS, S.B., BURNS, J.L. (1997) Hydrotherapy. *Journal of Alternative and Complementary Medicine* vol. 3, n° 2, p. 105-107. [<https://doi.org/10.1089/acm.1997.3.105>]
- CHOUKROUN, M.L., VARENE, P. (1990) Adjustments in oxygen transport during head-out immersion in water at different temperatures. *Journal of Applied Physiology* vol. 68, n° 4, p. 1475-1480. [<https://doi.org/10.1152/jappl.1990.68.4.1475>]
- COLLIER, R.J., GEBREMEDHIN, K.G. (2015) Thermal Biology of Domestic Animals. *Annual Review of Animal Biosciences* vol. 3, n° 1, p. 513-532. [<https://doi.org/10.1146/annurev-animal-022114-110659>]
- CORUZZI, P., RAVANETTI, C., MUSIARI, L., *et al.* (1988) Circulating opioid peptides during water immersion in normal man. *Clinical Science* vol. 74, n° 2, p. 133-136. [<https://doi.org/10.1042/cs0740133>]
- DAVIE, A.J., SAVAGE, C.J., FENNELL, L. (2008) The effect of swimming training on the cardiac dimensions in thoroughbred horses. Barton, A.C.T., Rural Industries Research and Development Corporation.

- FIRSHMAN, A.M., BORGIA, L.A., VALBERG, S.J. (2015) Effects of training at a walk on conventional and underwater treadmills on fiber properties and metabolic responses of superficial digital flexor and gluteal muscles to high-speed exercise in horses. *American Journal of Veterinary Research* vol. 76, n° 12, p. 1058-1065. [<https://doi.org/10.2460/ajvr.76.12.1058>]
- FLEMING, J., STRATTON, T.D., BRASSINGTON, R. (2014) Monitoring changes in skin temperature associated with exercise in horses on a water treadmill by use of infrared thermography. *Journal of Thermal Biology* vol. 45, p. 110-116. [<https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2014.08.003>]
- FREGIN, G.F., NICHOLL, T.K. (1977) Swimming: its influences on heart rate, respiration rate, and some hematological values in the horse. *Journal of Equine Medicine and Surgery* vol. 1, n° 9, p. 288-292.
- FUTURA-SCIENCES (2023) Flottabilité : qu'est-ce que c'est ?. In *Futura sciences*. [<https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-flottabilite-13184/>] (consulté le 19/11/2023).
- GALLOUX, P., VIAL, C., AUVINET, B., *et al.* (1992) Adaptation à l'effort du cheval en piscine. *Equathlon* vol. 4, n° 15, p. 22-27.
- GARCIA, M.C., BEECH, J. (1986) Endocrinologic, hematologic, and heart rate changes in swimming horses. *American Journal of Veterinary Research* vol. 47, n° 9, p. 2004-2006.
- GRECO-OTTO, P., BOND, S., SIDES, R., *et al.* (2020) Conditioning equine athletes on water treadmills significantly improves peak oxygen consumption. *The Veterinary Record* vol. 186, n° 8, p. 250. [<https://doi.org/10.1136/vr.104684>]
- GRECO-OTTO, P., BOND, S., SIDES, R., *et al.* (2017) Workload of horses on a water treadmill: effect of speed and water height on oxygen consumption and cardiorespiratory parameters. *BMC Veterinary Research* vol. 13, n° 1, p. 360. [<https://doi.org/10.1186/s12917-017-1290-2>]
- GRÜNIG, H., NIKOLAIDIS, P.T., MOON, R.E., *et al.* (2017) Diagnosis of Swimming Induced Pulmonary Edema—A Review. *Frontiers in Physiology* vol. 8, p. 652. [<https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00652>]
- HENKIN, S.D., SEHL, P.L., MEYER, F. (2010) Sweat rate and electrolyte concentration in swimmers, runners, and nonathletes. *International Journal of Sports Physiology and Performance* vol. 5, n° 3, p. 359-366. [<https://doi.org/10.1123/ijsp.5.3.359>]
- HINCHCLIFF, K.W., COUETIL, L.L., KNIGHT, P.K., *et al.* (2015) Exercise Induced Pulmonary Hemorrhage in Horses: American College of Veterinary Internal Medicine Consensus Statement. *Journal of Veterinary Internal Medicine* vol. 29, n° 3, p. 743-758. [<https://doi.org/10.1111/jvim.12593>]
- HOBO, S., YOSHIDA, K., YOSHIHARA, T. (1998) Characteristics of respiratory function during swimming exercise in thoroughbreds. *The Journal of Veterinary Medical Science* vol. 60, n° 6, p. 687-689. [<https://doi.org/10.1292/jvms.60.687>]
- HODGSON, D.R., DAVIS, R.E., MCCONAGHY, F.F. (1994) Thermoregulation in the horse in response to exercise. *British Veterinary Journal* vol. 150, n° 3, p. 219-235. [[https://doi.org/10.1016/S0007-1935\(05\)80003-X](https://doi.org/10.1016/S0007-1935(05)80003-X)]
- HOHMANN, E., GLATT, V., TETSWORTH, K. (2018) Swimming induced pulmonary oedema in athletes – a systematic review and best evidence synthesis. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation* vol. 10, n° 1, p. 18. [<https://doi.org/10.1186/s13102-018-0107-3>]

- HÖRNICKE, H., VON ENGELHARDT, W., EHRLEIN, H.J. (1977) Effect of exercise on systemic blood pressure and heart rate in horses. *Pflugers Archiv* vol. 372, n° 1, p. 95-99. [<https://doi.org/10.1007/BF00582212>]
- IRWIN, D.H., HOWELL, D.W. (1980) Some thoughts on swimming horses in a pool. *Journal of the South African Veterinary Association* vol. 51, n° 3, p. 189-191.
- JONES, J.H., COX, K.S., TAKAHASHI, T., *et al.* (2002) Heterogeneity of intrapleural pressures during exercise. *Equine Veterinary Journal. Supplement* n° 34, p. 391-396. [<https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.2002.tb05454.x>]
- JONES, J.H., HIRAGA, A. (2006) Metabolic, cardiovascular and respiratory responses to swimming in horses. Présenté à Exercice-induced pulmonary haemorrhage : state of current knowledge, Vancouver, Havemeyer Foundation Monograph Series, p. 34-36.
- JONES, M.W., BRETT, K., HAN, N., *et al.* (2023) Hyperbaric Physics. In *StatPearls*. Treasure Island (FL), StatPearls Publishing.
- JONES, S., FRANKLIN, S., MARTIN, C., *et al.* (2020) Complete upper airway collapse and apnoea during tethered swimming in horses. *Equine Veterinary Journal* vol. 52, n° 3, p. 352-358. [<https://doi.org/10.1111/evj.13177>]
- KANG, O.-D., RYU, Y.-C., YUN, Y.-M., *et al.* (2012) Physiological changes in jeju crossbred riding horses by swim training. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* vol. 25, n° 2, p. 200-206. [<https://doi.org/10.5713/ajas.2011.11318>]
- KANIKOWSKA, A., NAPIÓRKOWSKA-BARAN, K., GRACZYK, M., *et al.* (2018) Influence of chlorinated water on the development of allergic diseases - An overview. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine* vol. 25, n° 4, p. 651-655. [<https://doi.org/10.26444/aaem/79810>]
- KATO, T., OHMURA, H., HIRAGA, A., *et al.* (2003) Changes in heart rate variability in horses during immersion in warm springwater. *American Journal of Veterinary Research* vol. 64, n° 12, p. 1482-1485. [<https://doi.org/10.2460/ajvr.2003.64.1482>]
- KING, M.R. (2016) Principles and Application of Hydrotherapy for Equine Athletes. *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice, Rehabilitation of the Equine Athlete* vol. 32, n° 1, p. 115-126. [<https://doi.org/10.1016/j.cveq.2015.12.008>]
- KING, M.R., HAUSSLER, K.K., KAWCAK, C.E., *et al.* (2017) Biomechanical and histologic evaluation of the effects of underwater treadmill exercise on horses with experimentally induced osteoarthritis of the middle carpal joint. *American Journal of Veterinary Research* vol. 78, n° 5, p. 558-569. [<https://doi.org/10.2460/ajvr.78.5.558>]
- KING, M.R., HAUSSLER, K.K., KAWCAK, C.E., *et al.* (2013) Mechanisms of aquatic therapy and its potential use in managing equine osteoarthritis. *Equine Veterinary Education* vol. 25, n° 4, p. 204-209. [<https://doi.org/10.1111/j.2042-3292.2012.00389.x>]
- KLOMP, M., MUNSTERS, C.C.B.M., SLOET VAN OLDRUITENBORGH-OOSTERBAAN, M.M. (2014) Swimming exercise and race performance in Thoroughbred racehorses: *Pferdeheilkunde Equine Medicine* vol. 30, n° 4, p. 403-406. [<https://doi.org/10.21836/PEM20140405>]

- KNUDSEN, D.M., JØRGENSEN, P.F. (2000) Swimming training in horses compared with racing or riding training. *Dansk Veterinærtidsskrift* vol. 83, n° 23, p. 6-10.
- LAFON, M. (2015) Balnéothérapie : médecine douce, principes actifs. *Jours de Cheval* p. 84-87.
- LEGUILLETTE, R., DAVID, F., MCCRAE, P., *et al.* (2022) Workload associated with untethered swimming in horses. In *Comparative Exercise Physiology*. Présenté à 11th International Conference on Equine Exercise Physiology, 26 juin-1e juillet 2022, Sweden, p. S34.
- LINDNER, A., WÄSCHLE, S., SASSE, H.H.L. (2012) Physiological and blood biochemical variables in horses exercising on a treadmill submerged in water. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition* vol. 96, n° 4, p. 563-569. [<https://doi.org/10.1111/j.1439-0396.2011.01179.x>]
- LINDNER, A., WÄSCHLE, S., SASSE, H.H.L. (2010) Effect of exercise on a treadmill submerged in water on biochemical and physiological variables of horses: *Pferdeheilkunde Equine Medicine* vol. 26, n° 6, p. 781-788. [<https://doi.org/10.21836/PEM20100603>]
- MARR, C.M., BOWEN, I.M. (2010) *Cardiology of the horse*, 2ème édition. Edinburgh, Saunders.
- MCCLINTOCK, S.A., HUTCHINS, D.R., BROWNLOW, M.A. (1987) Determination of weight reduction in horses in flotation tanks. *Equine Veterinary Journal* vol. 19, n° 1, p. 70-71. [<https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.1987.tb02586.x>]
- MCGOWAN, C.M., HODGSON, D.R. (2014) Hematology and biochemistry. In *The Athletic Horse*, 2ème édition. Philadelphia, Elsevier, p. 56-68. [<https://doi.org/10.1016/B978-0-7216-0075-8.00014-9>]
- MISUMI, K., SAKAMOTO, H., SHIMIZU, R. (1995) Changes in skeletal muscle composition in response to swimming training for young horses. *The Journal of Veterinary Medical Science* vol. 57, n° 5, p. 959-961. [<https://doi.org/10.1292/jvms.57.959>]
- MISUMI, K., SAKAMOTO, H., SHIMIZU, R. (1994a) The Validity of Swimming Training for Two-Year-Old Thoroughbreds. *Journal of Veterinary Medical Science* vol. 56, n° 2, p. 217-222. [<https://doi.org/10.1292/jvms.56.217>]
- MISUMI, K., SAKAMOTO, H., SHIMIZU, R. (1994b) Changes in blood lactate and heart rate in thoroughbred horses during swimming and running according to their stage of training. *The Veterinary Record* vol. 135, n° 10, p. 226-228. [<https://doi.org/10.1136/vr.135.10.226>]
- MIYOSHI, T., SHIROTA, T., YAMAMOTO, S., *et al.* (2004) Effect of the walking speed to the lower limb joint angular displacements, joint moments and ground reaction forces during walking in water. *Disability and Rehabilitation* vol. 26, n° 12, p. 724-732. [<https://doi.org/10.1080/09638280410001704313>]
- MOOIJ, M.J.W., JANS, W., DEN HEIJER, G.J.L., *et al.* (2013) Biomechanical responses of the back of riding horses to water treadmill exercise. *The Veterinary Journal* vol. 198, n° S1, p. e120-e123. [<https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2013.09.045>]
- MUÑOZ, A. (2018) Exercise in water in the horse: physiological adaptations and potential benefits for training and rehabilitation. Proceeding of Veterinary and Animal Science Days, 6th-8th June, Milan. [<https://riviste.unimi.it/index.php/haf/article/download/10268/9677>]

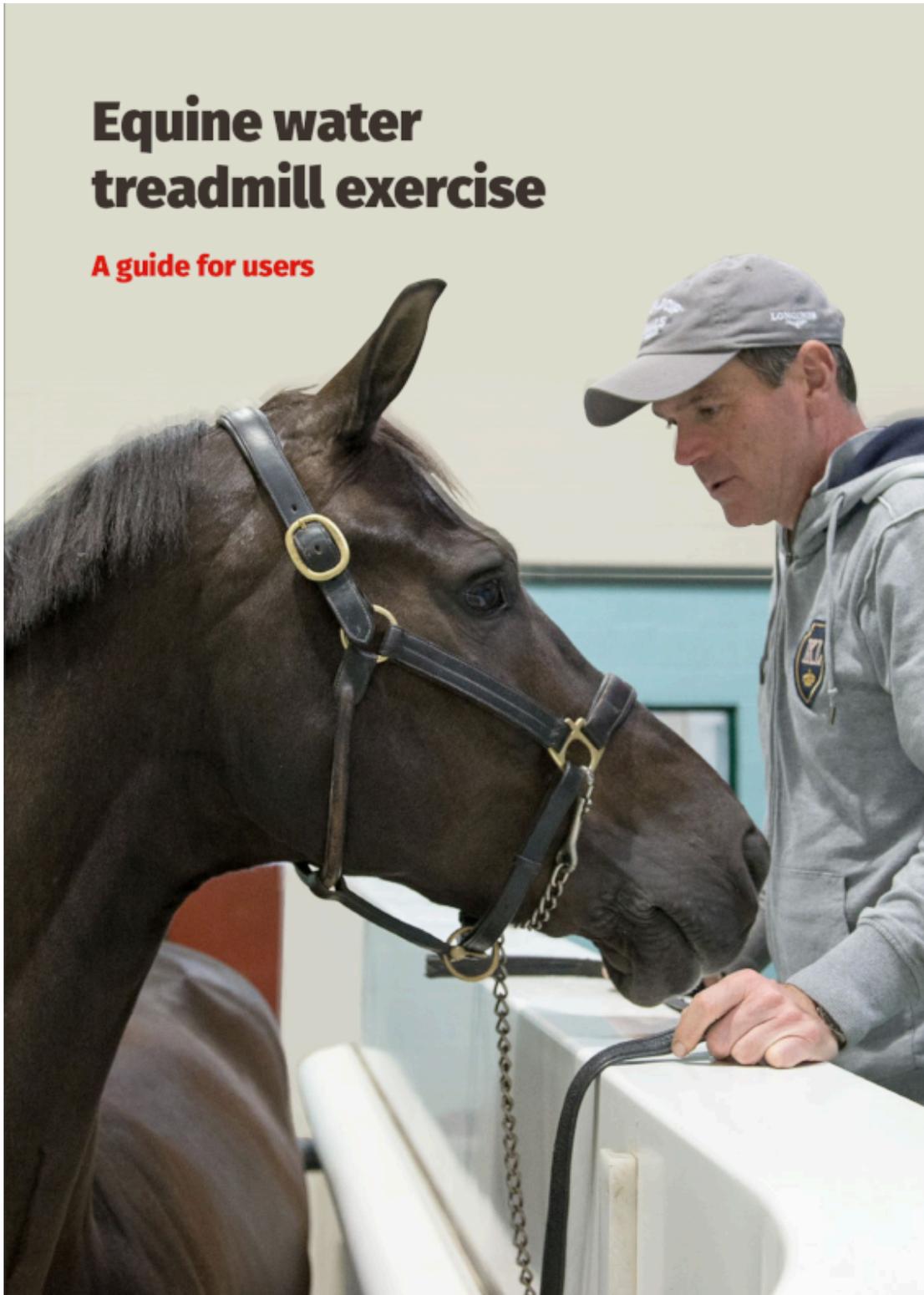
- MUÑOZ, A., BECERO, M., SAITUA, A., *et al.* (2019a) Exercise in the water: should we incorporate it into training and rehabilitation programs for the sport horse? *Atti della Accademia Peloritana dei Pericolanti* vol. 107, p. 1-11.
- MUÑOZ, A., SAITUA, A., BECERO, M., *et al.* (2019b) The Use of the Water Treadmill for the Rehabilitation of Musculoskeletal Injuries in the Sport Horse. *Journal of Veterinary Research* vol. 63, n° 3, p. 439-445. [<https://doi.org/10.2478/jvetres-2019-0050>]
- MURAKAMI, M., IMAHARA, T., INUI, T., *et al.* (1976) Swimming Exercises in Horses. *Experimental Reports of Equine Health Laboratory* vol. 1976, n° 13, p. 27-49. [<https://doi.org/10.11535/jes1961.1976.27>]
- MURRAY, R.C., HOPKINS, E., TACEY, J.B., *et al.* (2020) Change in muscle development of horses undergoing 20 weeks of water treadmill exercise compared with control horses. *Equine Veterinary Journal* vol. 52, n° S54, p. 9-9. [https://doi.org/10.1111/evj.09_13365]
- NANKERVIS, K., TRANQUILLE, C., MCCRAE, P., *et al.* (2021) Consensus for the General Use of Equine Water Treadmills for Healthy Horses. *Animals* vol. 11, n° 2, p. 305. [<https://doi.org/10.3390/ani11020305>]
- NANKERVIS, K., TRANQUILLE, C., YORK, J., *et al.* (2020) Equine water treadmill exercise A guide for users. Hartpury, Hartpury University.
- NANKERVIS, K.J., FINNEY, P., LAUNDER, L. (2016) Water depth modifies back kinematics of horses during water treadmill exercise. *Equine Veterinary Journal* vol. 48, n° 6, p. 732-736. [<https://doi.org/10.1111/evj.12519>]
- NANKERVIS, K.J., LAUNDER, E.J., MURRAY, R.C. (2017) The Use of Treadmills Within the Rehabilitation of Horses. *Journal of Equine Veterinary Science* vol. 53, p. 108-115. [<https://doi.org/10.1016/j.jevs.2017.01.010>]
- NANKERVIS, K.J., LEFRANCOIS, K. (2018) A Comparison of Protraction-Retraction of the Distal Limb During Treadmill and Water Treadmill Walking in Horses. *Journal of Equine Veterinary Science* vol. 70, p. 57-62. [<https://doi.org/10.1016/j.jevs.2018.08.005>]
- NANKERVIS, K.J., THOMAS, S., MARLIN, D.J. (2008) Effect of water temperature on heart rate of horses during water treadmill exercise. *Comparative Exercise Physiology* vol. 5, n° 3-4, p. 127-131. [<https://doi.org/10.1017/S1478061509342358>]
- NANKERVIS, K.J., WILLIAMS, R.J. (2006) Heart rate responses during acclimation of horses to water treadmill exercise. *Equine Veterinary Journal. Supplement* vol. 38, n° 36, p. 110-112. [<https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.2006.tb05524.x>]
- NICHOLL, T.K., FREGIN, G.F., GERBER, N.H. (1978) Swimming--a method to study the physiologic response of the horse to exercise. *Journal of the South African Veterinary Association* vol. 49, n° 4, p. 313-315.
- OHMURA, H., MATSUI, A., HADA, T., *et al.* (2013) Physiological responses of young thoroughbred horses to intermittent high-intensity treadmill training. *Acta Veterinaria Scandinavica* vol. 55, n° 1, p. 59. [<https://doi.org/10.1186/1751-0147-55-59>]
- ONDOLO, C., AVERSA, S., PASSALI, F., *et al.* (2009) Nasal and lung function in competitive swimmers. *Acta Otorhinolaryngologica Italica* vol. 29, n° 3, p. 137-143.

- PATIGNY, E. (2023) Sciences équestres. *In Association des moniteurs d'équitation brevetés*. [<https://www.ameb.be/index.php/2-uncategorised/36-se1>] (consulté le 31/08/2023).
- PETROV, R., MACDONALD, M.H., TESCH, A.M., *et al.* (2003) Influence of topically applied cold treatment on core temperature and cell viability in equine superficial digital flexor tendons. *American Journal of Veterinary Research* vol. 64, n° 7, p. 835-844. [<https://doi.org/10.2460/ajvr.2003.64.835>]
- PHYSICK-SHEARD, P. W., MCGURRIN, M. K. J. (2010) Ventricular Arrhythmias during Race Recovery in Standardbred Racehorses and Associations with Autonomic Activity. *Journal of Veterinary Internal Medicine* vol. 24, n° 5, p. 1158-1166. [<https://doi.org/10.1111/j.1939-1676.2010.0553.x>]
- PICCIONE, G., MESSINA, V., CASELLA, S., *et al.* (2010) Blood lactate levels during exercise in athletic horses. *Comparative Clinical Pathology* vol. 19, n° 6, p. 535-539. [<https://doi.org/10.1007/s00580-010-0965-x>]
- RICHARD, G., TISSEBRE, E., RUSHENAS, A. (2015) Les forces appliquées aux nageurs. *In Natation, vers la fin des records*. [<https://gregoirerichard99.wixsite.com/performancesnatation/blank-kr699>] (consulté le 19/11/2023).
- ROUSSEL, J. (2014) Transfert thermique. [https://femto-physique.fr/physique_statistique/transfert-thermique.php] (consulté le 29/08/2023).
- SANTOSUOSSO, E., DAVID, F., MASSIE, S., *et al.* (2022) Frequency of cardiac arrhythmias in horses during straight and untethered swimming. *Equine Veterinary Journal*. [<https://doi.org/10.1111/evj.13895>]
- SANTOSUOSSO, E., LEGUILLETTE, R., VINARDELL, T., *et al.* (2021a) Kinematic Analysis During Straight Line Free Swimming in Horses: Part 1 - Forelimbs. *Frontiers in Veterinary Science* vol. 8, p. 752375. [<https://doi.org/10.3389/fvets.2021.752375>]
- SANTOSUOSSO, E., LEGUILLETTE, R., VINARDELL, T., *et al.* (2021b) Kinematic Analysis During Straight Line Free Swimming in Horses: Part 2 - Hindlimbs. *Frontiers in Veterinary Science* vol. 8, p. 761500. [<https://doi.org/10.3389/fvets.2021.761500>]
- SCOTT, R., NANKERVIS, K., STRINGER, C., *et al.* (2010) The effect of water height on stride frequency, stride length and heart rate during water treadmill exercise. *Equine Veterinary Journal. Supplement* vol. 42, n° 38, p. 662-664. [<https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.2010.00194.x>]
- SHERWOOD, L., KLANDORF, H., YANCEY, P.H., *et al.* (2016) *Physiologie animale*. Louvain-la-Neuve, De Boeck supérieur.
- STEEL, C., BOND, B., MORRICE-WEST, A. (2019) Survey of trainers on the use of swimming exercise for Standardbred racehorses in Australia. *Australian Veterinary Journal* vol. 97, n° 3, p. 61-67. [<https://doi.org/10.1111/avj.12786>]
- SULTANA, R. (1977) Hydrostatique, hydrodynamique et optique utile en kinébalnéothérapie. *Annales de kinésithérapie* vol. 4/10, p. 403-416.
- THOMAS, D.P., FREGIN, F., GERBER, N.H., *et al.* (1980) Cardiorespiratory adjustments to tethered-swimming in the horse. *Pflügers Archiv* vol. 385, n° 1, p. 65-70. [<https://doi.org/10.1007/BF00583916>]
- THOMAS, D.P., FREGIN, G.F. (1981) Cardiorespiratory and metabolic responses to treadmill exercise in the horse. *Journal of Applied Physiology* vol. 50, n° 4, p. 864-868. [<https://doi.org/10.1152/jappl.1981.50.4.864>]

- TISBA, A. (2006) Les bases biomécaniques de la natation. In *Tisba Andy*. [<http://tisba.andy.free.fr/Fac/Cours/S6/Cours%20Guigui/natation/base%2520biom%25E9ca2006.pdf>] (consulté le 29/08/2023).
- TOKURIKI, M., OHTSUKI, R., KAL, M., *et al.* (2010) EMG activity of the muscles of the neck and forelimbs during different forms of locomotion. *Equine Veterinary Journal* vol. 31, n° S30, p. 231-234. [<https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.1999.tb05224.x>]
- TOR, E., PEASE, D.L., BALL, K.A. (2015) How does drag affect the underwater phase of a swimming start? *Journal of Applied Biomechanics* vol. 31, n° 1, p. 8-12. [<https://doi.org/10.1123/jab.2014-0081>]
- TRANQUILLE, C.A., TACEY, J.B., WALKER, V.A., *et al.* (2018) International Survey of Equine Water Treadmills—Why, When, and How? *Journal of Equine Veterinary Science* vol. 69, p. 34-42. [<https://doi.org/10.1016/j.jevs.2018.05.220>]
- UNIVERSITE DE RENNES (2023) Equilibration. In *Apprendre à nager*. [<https://apprendre-a-nager.univ-rennes.fr/equilibration>] (consulté le 19/11/2023).
- VERMEULEN, A.D., EVANS, D.L. (2006) Measurements of fitness in thoroughbred racehorses using field studies of heart rate and velocity with a global positioning system. *Equine Veterinary Journal. Supplement* n° 36, p. 113-117. [<https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.2006.tb05525.x>]
- VINARDELL, T., DAVID, F., GALEZOWSKI, A.M., *et al.* (2023) Free Swimming and Exercise-Induced Pulmonary Hemorrhage in Endurance Horses: A Preliminary Study. *Journal of Equine Veterinary Science* vol. 120, p. 104182. [<https://doi.org/10.1016/j.jevs.2022.104182>]
- VINCZE, A., SZABÓ, C., BAKOS, Z., *et al.* (2016) Effect of dietary energy source on the plasma parameters of equine athletes trained in a deep water aqua treadmill. *Italian Journal of Animal Science* vol. 15, n° 1, p. 137-143. [<https://doi.org/10.1080/1828051X.2015.1128688>]
- VINCZE, A., SZABO, C., SZABÓ, V., *et al.* (2013) The Effect of Deep Water Aqua Treadmill Training on the Plasma Biochemical Parameters of Show Jumpers. *Agriculturae Conspectus Scientificus* vol. 78, p. 289-293.
- VOSS, B., MOHR, E., KRZYWANIEK, H. (2002) Effects of aqua-treadmill exercise on selected blood parameters and on heart-rate variability of horses. *Journal of Veterinary Medicine. A, Physiology, Pathology, Clinical Medicine* vol. 49, n° 3, p. 137-143. [<https://doi.org/10.1046/j.1439-0442.2002.00420.x>]
- WALMSLEY, E., STEEL, C., HAINES, G., *et al.* (2011) Colic after swimming exercise in racehorses: an investigation of incidence, management, surgical findings and outcome. *Australian Veterinary Journal* vol. 89, n° 5, p. 180-183. [<https://doi.org/10.1111/j.1751-0813.2011.00709.x>]

Annexe 1

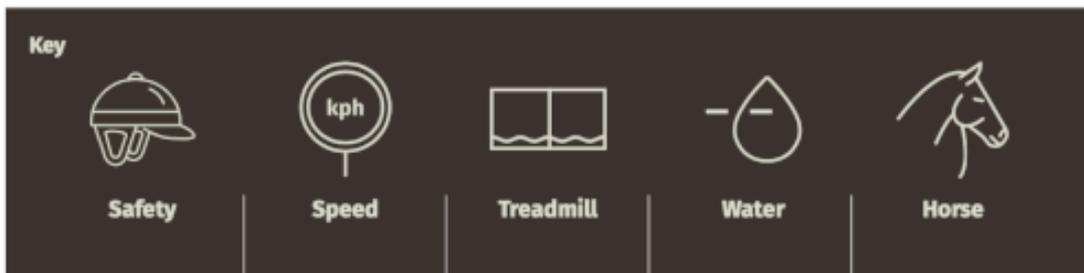
Guide de bonnes pratiques du tapis immergé





Why use a water treadmill?

Water treadmill exercise has many potential benefits when integrated into a training or rehabilitation programme, including an increase in range of movement of lower limbs, increased lumbar flexion, decreased impact shock, and an opportunity to cross train (thereby reducing injury risk) in a controlled environment. The purpose of these guidelines is to help users achieve these benefits for their horses, whether they are using a water treadmill for training or to support a rehabilitation programme. The guidelines provide a consensus based on a combination of research studies and skilled user experience.



General guidelines for new water treadmill users



Manufacturers will usually provide training regarding correct operation and cleaning of their machines, and may provide initial 'day 1' training regarding the introduction of horses. The best method of introducing horses to the machine can vary depending upon the type of horses being exercised, the type of machine and the environment in which the machine is used. It is good practice to seek help from an experienced user to supplement the manufacturer's training.



Horses should be suitably controlled. Horses can be worked in a headcollar or with a bit, either on a slip head or on a bridle. Whatever you choose to use should give adequate control of the horse overland whilst allowing the horse to work comfortably on the treadmill without restricting the natural movement of the head and neck.



Protective boots such as brushing boots or over reach boots are not commonly used for water treadmill exercise unless the entry/exit doors or ramps present potential hazards. Note that any equipment attached to the limbs has the potential to slip or become detached and spook the horse.



Most users wrap up the tail to keep it out of the water during exercise. This makes aftercare easier and may help keep the water clean.



It is recommended that all handlers wear appropriate Personal Protective Equipment for handling horses.



Loading and unloading procedures should be devised that either avoid or minimise the need for handlers to be in front or behind the horse whilst it is on the treadmill belt. Where possible, accustom horses to be led on and off the belt from the side.



A minimum of two handlers is recommended for safety. One person should be designated 'in charge' and this person should be responsible for the controls and keep the controls in reach throughout the session.



Ensure the horse remains straight. Be aware that horses handled from one side only will tend to bend towards the side of the handler. Keep an eye on straightness to optimise the quality of the session.



Appropriate belt speed varies according to the horse's size, stride length; joint ranges of movement, experience and capability. A good belt speed is one where the horse maintains position in the middle of the treadmill and has room for the head, neck and forelimbs to move without limitation. Ensure free movement of head, neck and forelimbs regardless of whether or not the treadmill is fitted with a breast bar or breast strap. Most horses will be comfortable walking in water at a speed below that of their walk speed overland. Find a comfortable walk speed for the horse on the dry belt (or with water below the fetlock) and as a general guide expect to reduce belt speed as water depth increases.

Introducing a horse to the water treadmill for the first time



All 'new' horses benefit from a structured period of habituation. The ideal scenario is three, short (up to 15 minute) sessions over three consecutive days. Aim to have the second session within the same week as the first session. Avoid introducing a horse if they will not be able to repeat the exercise within 14 days.



Always load according to the centre's standard operating procedures. A horse can be prepared for the first movement of the belt by gently asking them to step back and forth within the chamber; the belt can then be started as the horse is being asked to step forward.



Be aware that a horse may only notice the introduction of water once the water reaches above the level of the coronary band.



Most horses enjoy their session on the water treadmill but it is a new experience for the horse, so plenty of time should be allowed for the first session. If an owner has a highly strung horse there may be benefit to consulting a veterinary surgeon about potentially using light sedation to give the horse a relaxed first experience of the water treadmill without affecting its locomotion. Decisions regarding optimal management of the horse's first session on the water treadmill should be made following individual risk assessment for the specific horse.



For most horses, water depth can be increased slowly over the course of the first three sessions depending on the individual horse and its requirements for exercise. It would not be unusual for horses to only walk in fetlock depth water in the first session.



10-15 minutes walking in the water is sufficient for the first time. Try and finish the first session once the horse has achieved a period of relaxed, stable, rhythmical walking.



General good practice for water treadmill exercise



Ensure the horse is as clean as possible before exercise (either by brushing or washing) to help keep the water clean, paying particular attention to limbs and feet. Pick out the feet. Wash limbs off after exercise. Many users use a veterinary approved mild disinfectant to wash limbs off post exercise.



Dry the legs as much as possible after water treadmill exercise.



Horses can work shod or unshod on a water treadmill. Where fitted, check shoes are secure. Road nails may damage a treadmill belt. Any significant extensions to a shoe have the potential to influence the flight of the foot in water. If in doubt regarding suitability of shoeing, seek advice from your veterinary surgeon and farrier before exercising the horse. Pay particular attention to the condition of the feet if water treadmill exercise is used daily and/or the horse has pads fitted. Foot problems can occur if the frequency of sessions is such that the feet are never fully dry between sessions.



Check the horse for any cuts/abrasions as even water which looks clean may carry microbes which could lead to infection. For this reason horses should not undergo water treadmill exercise within four days of joint injection. Examine limbs closely for any signs of conditions such as mud fever which might be exacerbated by submersion. Daily immersion in water may also reduce the integrity of the skin and delay wound healing.



Throughout the session, keep your attention on the horse and note the movement pattern and changes in movement pattern as far as possible/practical during exercise. Base your decisions regarding speed and water depth based on the responses of the individual horse.



Even small adjustments in speed and/or depth may have a significant effect on the horse's movement. Be prepared to make alterations within an exercise session depending on the horse's responses.



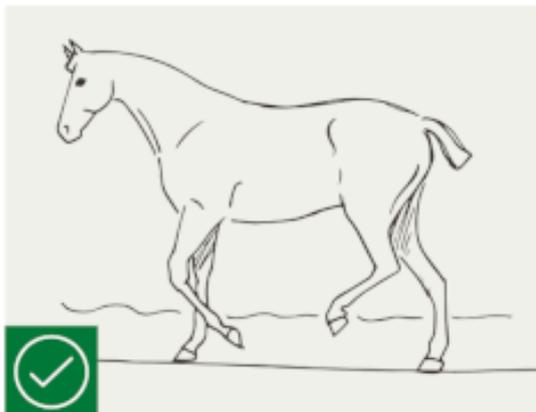
Best practice for water management is specific to each model of water treadmill. Follow your manufacturer's advice regarding water cleanliness. Where chlorinated water is used, operators should consider undertaking specific training in pool water management.



Monitoring movement on the water treadmill

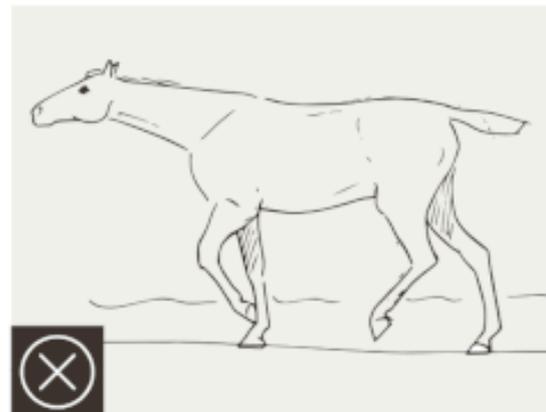
- The horse should move with a similar posture to overland locomotion; the face should be slightly in front of the vertical, with a ventroflexed (rounded) lumbar spine and the hind limbs stepping well underneath the body.
- There should be a regular rhythm to the footfalls.
- The head should be relatively still, with no excessive horizontal or vertical movements of the head or head tossing.
- The horse should be straight and not 'hanging' to one side or rolling from side to side.
- The hind limbs should be placed in the path of the forelimbs, and not increasingly to the midline of the body as the water depth is increased.
- The horse should be able to easily maintain position on the belt.
- A flat or overly extended posture – nose poking, neck outstretched, lumbar spine lowered with hind limbs trailing should be avoided.

Aim for quality of movement as indicated above. If movement quality is not attained or reduces within a session, you should consider decreasing the speed, water depth, or duration of the session.



General comments for integrating water treadmill exercise into your training or rehabilitation programme

- Water treadmill exercise provides straight line, unridden, controlled exercise and these features alone may complement your horse's normal training programme.
- Water treadmill exercise is not recommended as the sole or primary means of exercising a horse unless the horse has a specific injury that warrants it. In such instances this will normally be for a limited time period only.
- As water depth increases, drag force (limiting forward movement of the limbs) increases. Drag will also increase the faster the horse swings the limb, i.e. as stride frequency increases.
- As water depth increases, the impact shock of the limbs is reduced. As a rough guide, water up to the level of the stifle reduces impact shock by 30%.
- Water treadmill exercise in walk or trot does not normally produce high heart rates in the horse (i.e. heart rates above 150 beats/min) and does not normally make horses 'blow' or sweat in the same way fast work would. Oxygen consumption has been found to reach approximately 20% of maximum oxygen consumption with water at the height of the stifle. This does not mean the horse has not 'worked'. Whilst the heart rates observed may be similar to overland walking (or trotting in water), horses may still experience fatigue in certain muscle groups. Think of a water treadmill exercise session as equivalent to a challenging ground schooling session.



Guidelines produced by the Equine Hydrotherapy Working Group.
Corresponding author: Kathryn.nankervis@hartpury.ac.uk

Hartpury University

Hartpury, Gloucestershire, GL19 3BE, United Kingdom

This document provides guidelines to assist in the use of Equine Water Treadmills.
It is the responsibility of the user to ensure they have taken appropriate advice from the manufacturer and utilise their professional judgement and experience when using a water treadmill. None of the contributors take any responsibility for the application of these guidelines by users.



With thanks to:



LOTTERY FUNDED

[View publication stats](#)

Annexe 2

Grades de mucus et HPIE retrouvés dans la publication de Jones *et al.* (2020)



Supplementary Item 6: Grading scales for mucus and EIPH

Mucus Grading Scale (from Gerber *et al.* [10])

- Grade 0 – no mucus; clean or a single small blob of mucus
- Grade 1 – little; multiple small blobs of mucus
- Grade 2 – moderate; larger blobs of mucus
- Grade 3 – marked; confluent or stream forming mucus accumulation
- Grade 4 – large; pool-forming mucus
- Grade 5 – extreme; profuse amounts of mucus

EIPH Grading Scale (from Hinchcliff *et al.* [11])

grade 0 = no blood detected in the pharynx, larynx, trachea, or mainstem bronchi

grade 1 = one or more flecks of blood or 2 or fewer short (less than one quarter the length of the trachea), narrow (< 10% of the tracheal surface area) streams of blood in the trachea or mainstem bronchi visible from the tracheal bifurcation

grade 2 = one long stream of blood (greater than half the length of the trachea) or more than 2 short streams of blood occupying less than a third of the tracheal circumference

grade 3 = multiple, distinct streams of blood covering more than a third of the tracheal circumference, with no blood pooling at the thoracic inlet

grade 4 = multiple, coalescing streams of blood covering more than 90% of the tracheal surface, with blood pooling at the thoracic inlet

ENTRAÎNEMENT EN PISCINE ET SUR TAPIS IMMERGÉ : EFFETS PHYSIOLOGIQUES CHEZ LE CHEVAL

AUTEUR : Valentine HAOUT

RÉSUMÉ :

Cette étude bibliographique des effets physiologiques de la nage en piscine et de la marche en tapis immergé chez le cheval s'intéresse non seulement aux principes physiques de l'hydrothérapie mais aussi à ses diversités d'utilisation. Sont rassemblés dans ce manuscrit différents critères d'évaluation des effets physiologiques des exercices étudiés tels que les paramètres sanguins (lactatémie, glycémie, insulinémie, hémocrite, protéinémie, gaz sanguins, cortisol), cardiovasculaires (fréquence et débit cardiaques, rythme cardiaque, pression artérielle), respiratoires (fréquence et pattern respiratoires, pression intrathoracique, inflammation pulmonaire, hémorragies pulmonaires induites à l'exercice), musculaires (créatine kinases, ASAT, fibres musculaires, volume musculaire), la température corporelle et les paramètres de performance (VO_2 max).

Cette revue permet de comprendre que ce type d'exercice possède de nombreuses indications, notamment dans la réhabilitation des chevaux de sport mais aussi dans l'entraînement des chevaux de course et de sport, en complément de l'entraînement de base. L'utilisation est donc tantôt curative, tantôt préventive. Il semble que ce type de travail aquatique équivaut à un effort faible à modéré. La nage en piscine correspond à un travail plus intense que la marche en tapis immergé.

Les protocoles utilisés dans les publications ou sur le terrain varient et pourraient être adaptés à chaque cheval et à chaque situation. Les facteurs modulables sont la vitesse de nage ou de défilement du tapis immergé, la hauteur de l'eau sur tapis immergé, la durée et la fréquence de l'exercice. Ces facteurs sont pour certains suspectés d'avoir une influence sur les paramètres physiologiques, il est donc important de connaître leur impact.

MOTS CLÉS :

CHEVAL, ENTRAÎNEMENT, HYDROTHÉRAPIE, NAGE, PHYSIOLOGIE, PISCINE, RÉHABILITATION, TAPIS IMMERGÉ

JURY :

Président : Pr AUDIGIÉ Fabrice

Directrice de thèse : Dr MANGUIN Estelle

Examinateur : Dr TANQUEREL Ludovic

Invitées : Dr BEAUMONT Audrey, Dr MOIROUD Claire

TRAINING IN SWIMMING POOL AND ON UNDERWATER TREADMILL: PHYSIOLOGICAL EFFECTS ON HORSES

AUTHOR: Valentine HAOUIT

SUMMARY:

This bibliographical study of the physiological effects of swimming in a pool and walking on an underwater treadmill in horses focuses not only on the physical principles of hydrotherapy, but also on the variety of ways in which it can be used. This manuscript contains various criteria for evaluating the physiological effects of the exercises studied, such as blood parameters (lactatemia, glycaemia, insulinemia, haematocrit, proteinemia, blood gases, cortisol), cardiovascular parameters (heart rate and output, heart rhythm, arterial pressure), respiratory (respiratory rate and pattern, intrathoracic pressure, pulmonary inflammation, exercise-induced pulmonary haemorrhage), muscular (creatine kinases, ASAT, muscle fibers, muscle volume), body temperature and performance parameters (VO₂ max).

This review shows that this type of exercise has many indications, particularly in the rehabilitation of sport horses, but also in the training of racehorses and sport horses, as a complement to basic training. It can therefore be used for both curative and preventive purposes. It seems that this type of aquatic work is equivalent to light to moderate effort. Swimming in a pool involves more intense work than walking on an underwater treadmill.

The protocols used in publications or in the field vary and could be adapted to each horse and each situation. The factors that can be modified are the speed at which the horse swims or runs on the underwater treadmill, the height of the water on the underwater treadmill, and the duration and frequency of the exercise. Some of these factors are suspected of having an influence on physiological parameters, so it's important to be aware of their impact.

KEYWORDS:

HORSE, HYDROTHERAPY, PHYSIOLOGY, POOL, REHABILITATION, SWIMMING, TRAINING, UNDERWATER TREADMILL

JURY:

Chairperson: Pr AUDIGIÉ Fabrice

Thesis Director: Dr MANGUIN Estelle

Reviewer: Dr TANQUEREL Ludovic

Guests: Dr BEAUMONT Audrey, Dr MOIROUD Claire