



HAL
open science

Analyse biomécanique de la nage chez le Cheval

Pauline Gaulmin

► **To cite this version:**

Pauline Gaulmin. Analyse biomécanique de la nage chez le Cheval. Médecine vétérinaire et santé animale. 2024. dumas-04809970

HAL Id: dumas-04809970

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04809970v1>

Submitted on 28 Nov 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 2024

Analyse biomécanique de la nage chez le cheval

THÈSE

pour obtenir le diplôme d'État de
DOCTEUR VÉTÉRAIRE
présentée et soutenue publiquement devant
la Faculté de Médecine de Créteil (UPEC)
le 24 octobre 2024

par

Pauline Camille GAULMIN

sous la direction de

Henry CHATEAU

JURY

Président du jury :	M. Fabrice AUDIGIÉ	Professeur à l'EnvA
Directeur de thèse :	M. Henry CHATEAU	Professeur à l'EnvA
Examinatrice :	Mme Sandrine JACQUET	Ingénieur de recherche (IR-PH) à l'EnvA
Membre invité :	M. Frédéric MARIN	Professeur à l'UTC
Membre invitée :	Mme Chloé GIRAUDET	Post-Doctorante en Biomécanique à l'UTC

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



version Octobre 2024

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

M	Adjou	Karim	Professeur	DPASP
M	Audigié	Fabrice	Professeur	DEPEC
M	Bellier	Sylvain	Professeur	DSBP
Mme	Benchekroun	Ghita	Maître de conférences HDR	DEPEC
M	Blaga	Radu	Professeur	DSBP
M	Blot	Stéphane	Professeur	DEPEC
M	Boulouis	Henri-Jean	Professeur émérite	DSBP
Mme	Chahory	Sabine	Professeur	DEPEC
Mme	Chastant	Sylvie	Professeur	DPASP
M	Chateau	Henry	Professeur	DSBP
Mme	Chetboul	Valérie	Professeur	DEPEC
Mme	Crepeaux	Guillemette	Maître de conférences HDR	DSBP
Mme	Crevier-Denoix	Nathalie	Professeur	DSBP
M	Degueurce	Christophe	Professeur	DSBP
M	Denoix	Jean-Marie	Professeur émérite	DEPEC
M	Desquillbet	Loïc	Professeur	DSBP
Mme	Dufour	Barbara	Professeur émérite	DPASP
M	Fayolle	Pascal	Professeur émérite	DEPEC
M	Federighi	Michel	Professeur	DPASP
M	Fontbonne	Alain	Professeur	DEPEC
Mme	Gilbert	Caroline	Professeur	DSBP
Mme	Grimard-Ballif	Bénédictte	Professeur émérite	DPASP
Mme	Haddad-Hoang Xuan	Nadia	Professeur	DPASP
M	Jouvion	Gregory	Professeur	DSBP
M	Kohlhauer	Matthias	Professeur	DSBP
Mme	Le Poder	Sophie	Professeur	DSBP
Mme	Le Roux	Delphine	Professeur	DSBP
M	Manassero	Mathieu	Professeur	DEPEC
Mme	Maurey-Guénec	Christelle	Professeur	DEPEC
M	Millemann	Yves	Professeur	DPASP
M	Ponter	Andrew	Professeur	DPASP
Mme	Risco-Castillo	Véronica	Professeur	DSBP
Mme	Rivière	Julie	Professeur	DPASP
Mme	Robert	Céline	Professeur	DSBP
M	Tiret	Laurent	Professeur	DSBP
M	Tissier	Renaud	Professeur	DSBP
M	Verwaerde	Patrick	Professeur	DEPEC
Mme	Viateau	Véronique	Professeur	DEPEC

Liste des Maîtres de conférences et Ingénieurs de recherche DMV

M	Arné	Pascal	Maître de conférences	DPASP
Mme	Barassin	Isabelle	Maître de conférences	DPASP
Mme	Barbarino	Alix	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
M	Béguin	Jérémy	Maître de conférences	DEPEC
Mme	Bertal	Mileva	Maître de conférences associé	DEPEC
Mme	Bertoni	Lelia	Maître de conférences	DEPEC
Mme	Canonne-Guilbert	Morgane	Maître de conférences	DEPEC
Mme	Chevallier	Lucie	Maître de conférences	DSBP
Mme	Cochet-Faivre	Noëlle	Maître de conférences	DEPEC
Mme	Cordonnier-Lefort	Nathalie	Maître de conférences	DSBP
Mme	Coudry	Virginie	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
M	Crozet	Guillaume	Maître de conférences	DPASP
Mme	De Paula Reis	Aline	Maître de conférences	DPASP
M	Delsart	Maxime	Maître de conférences	DPASP
Mme	Denis	Marine	Ingénieur de recherche (DMV)	DPASP
M	Deshuillers	Pierre	Maître de conférences	DSBP
Mme	Goutchtat	Rebecca	Maître de conférences	DSBP
Mme	Guérin	Virginie	Maître de conférences	DSBP
Mme	Guétin-Poirier	Valentine	Maître de conférences	DPASP
Mme	Jacquet	Sandrine	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
M	Kurtz	Maxime	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
Mme	Lagré	Anne-Claire	Maître de conférences	DSBP
Mme	Le Dudal	Marine	Ingénieur de recherche (DMV)	DSBP
Mme	Legrand	Chantal	Maître de conférences associé	DSBP
M	Mammeri	Mohamed	Maître de conférences	DSBP
Mme	Manguin	Estelle	Maître de conférences	DEPEC
Mme	Marignac	Genevieve	Maître de conférences	DSBP
Mme	Marotto	Stéphanie	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
Mme	Maurice	Emeline	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
Mme	Mespoules-Rivière	Céline	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
M	Mortier	Jérémy	Maître de conférences associé	DEPEC
Mme	Mirmet	Narjès	Maître de conférences	DPASP
M	Munir	Muhammad Tanveer	Maître de conférences	DPASP
M	Nudelmann	Nicolas	Maître de conférences	DEPEC
M	Pignon	Charly	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
M	Polack	Bruno	Maître de conférences	DSBP
Mme	Quéré	Émilie	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
M	Radière	Guéric	Maître de conférences associé	DSBP
Mme	Ravary-Plumioën	Bérandère	Ingénieur de recherche (DMV)	DPASP
M	Reyes-Gomez	Edouard	Maître de conférences	DSBP
Mme	Rose	Hélène	Maître de conférences associé	DSBP
M	Tanquerel	Ludovic	Maître de conférences	DEPEC
Mme	Touzot-Jourde	Gwenola	Maître de Conférences	DEPEC

Remerciements

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

Qui m'a fait l'honneur d'avoir accepté la présidence du jury de cette thèse, veuillez recevoir mes plus respectueux hommages.

A M. Henry CHATEAU, Professeur à l'EnvA,

Pour m'avoir confié ce travail et m'avoir accompagné dans son élaboration, mes plus sincères remerciements.

A Mme Sandrine JACQUET, Ingénieur de recherche à l'EnvA,

Pour l'honneur que vous m'avez fait en acceptant de participer à ce jury, je vous exprime mes sincères remerciements.

A Mme Chloé GIRAUDET, Ingénieur de recherche au CIRALE,

Pour le temps consacré à l'encadrement de cette thèse, merci pour ta disponibilité, ta patience et ton aide dans l'élaboration de cette thèse.

A M. Frédéric MARIN, Professeur à l'UTC,

Pour avoir pris le temps de répondre à mes questions dans le cadre de cette thèse, sincères remerciements.

A Mme Claire MOIROUD et Audrey BEAUMONT, Praticiennes hospitalières à l'EnvA,

Pour l'aide apportée dans l'élaboration de ce travail, sincères remerciements.

Table des matières

Liste des figures.....	3
Liste des tableaux	5
Liste des abréviations.....	7
Avant-propos	11
Introduction générale.....	13
Première partie : travaux préalables à l'étude.....	15
1. Introduction du cheval en piscine.....	15
A. Les différents types de piscine	15
B. L'équilibre du cheval dans le milieu aquatique	16
a. La flottabilité	16
b. La pression hydrostatique	16
c. Résistances	17
C. Les indications actuelles de la nage.....	17
a. Indications locomotrices	18
b. Contres-indications locomotrices	19
2. Analyse cinématique de la nage	20
A. Description empirique de la nage	20
B. Description actuelle de la nage	21
C. Études articulaires lors de la nage	23
a. Mise en place des études.....	23
b. Résultats.....	26
3. Définition des débuts et fins de phase de propulsion et de ramené par cinématique.....	34
Deuxième partie : étude expérimentale - Article CAPT-ESE, analysant les différents styles de nage.....	39
1. Introduction	40
2. Matériels et méthodes.....	43
A. Population et protocole	43
B. Acquisition vidéo, définitions et détection des événements liés à la nage	44
C. Séquence des mouvements des membres pendant la nage et diagramme de coordination	45
3. Résultats	51
A. Stratégies de nage identifiées visuellement par des vétérinaires experts.....	51
B. Classification en catégories à l'aide du classificateur à deux étapes et des seuils de référence	52
C. Comparaison entre la segmentation basée sur l'observation visuelle (stratégies) et la segmentation basée sur l'ordinateur (catégories) des tours de nage	54
D. Description et exemples de graphiques de coordination pour chaque catégorie.	55
E. Variabilité inter- et intra-individuelle des schémas de nage	57
F. Paramètres spatio-temporels	57
4. Discussion.....	59
5. Conclusion	63
Troisième partie : comparaison entre les données aquatiques et terrestres.....	65
1. Analyse comparative temporelle des allures, terrestre et aquatique	66
A. Analyse séquentielle.....	66
a. Comparaison de la stratégie à 2 temps à recouvrement latéral avec les allures terrestres.....	66
b. Comparaison de la stratégie à 2 temps à recouvrement diagonal avec les allures terrestres	67
c. Comparaison des stratégies à 4 temps avec les allures terrestres.....	68
2. Analyse comparative cinésiologique du mouvement terrestre et aquatique	69
A. Antérieurs.....	69

a. Muscles mis en jeu lors de la locomotion terrestre	69
b. Interventions musculaires lors de la nage.....	70
<i>B. Postérieurs</i>	75
a. Muscles mis en jeu lors de la locomotion terrestre	75
b. Interventions musculaires lors de la nage	76
Conclusion et Perspectives	81
Liste des références bibliographiques	83
Annexe	89

Liste des figures

Figure 1 : représentations photographiques de la piscine en U du CIRALE (crédit photo : proximal equine lighting expert)	16
Figure 2 : représentation des angles des antérieurs et des postérieurs (d'après Santosuosso <i>et al.</i> 2021 et 2022)	23
Figure 3 : disposition des 6 caméras et champs de vision couvert (d'après Giraudet <i>et al.</i> 2023) .	24
Figure 4 : disposition des marqueurs anatomiques sur les antérieurs (épine scapulaire, épaule, coude, carpe, boulet, pied) et sur les postérieurs (tuber coxae, hanche, grasset, tarse, boulet, pied) (d'après Back <i>et al.</i> 2013)	25
Figure 5 : exemple de la reconstitution vidéo d'un passage à main droite	25
Figure 6 : exemple de reconstruction des angles articulaires en piscine pour les antérieurs et pour les postérieurs (d'après Giraudet <i>et al.</i> 2023)	26
Figure 7 : représentation de la phase de propulsion de l'antérieur gauche et du postérieur gauche	35
Figure 8 : exemple d'angles observés en début de phase de propulsion pour le coude et la hanche	36
Figure 9 : exemple d'angles observés en fin de phase de propulsion pour le coude et la hanche .	36
Figure 10 : description de la structure chronologique d'une séance de natation typique	44
Figure 11 : vue assemblée des 6 caméras GoPro pendant un tour à main droite du cheval #06 ..	44
Figure 12 : durée des phases de propulsion (PP) et de ramené (PR) des membres antérieurs et des membres postérieurs.....	45
Figure 13 : identification des différentes stratégies de nage, commençant par la phase de propulsion du membre antérieur gauche	47
Figure 14. : (a) exemple (cheval#02, tour #02) de la séquence de coordination pendant le cycle de nage (b) définition des paramètres quantitatifs exprimés en pourcentage de la durée du cycle	48
Figure 15 : description de l'algorithme utilisé pour classer les stratégies de nage	50
Figure 16 : résultats de l'algorithme du classificateur à deux étapes : 4 catégories ont été identifiées par l'algorithme k-means	52
Figure 17 : Matrice de confusion entre les stratégies identifiées visuellement par les vétérinaires experts et les catégories déterminées par les classificateurs à deux étapes pour tous les tours considérés	54
Figure 18 : correspondance entre les catégories A, B, C et D et les stratégies S1, S2 et S3.	56

Figure 19 : boîtes à moustaches des différents paramètres (en %) issus du graphique de coordination pour les quatre catégories (CatA - vert, CatB - jaune, CatC - violet et CatD - rouge)	58
Figure 20 : exemple d'un diagramme représentant la stratégie de nage à 2 temps à recouvrement latéral (les rectangles représentent la propulsion)	67
Figure 21 : exemple d'un diagramme représentant la stratégie de nage à 2 temps à recouvrement diagonal (les rectangles représentent la propulsion)	67
Figure 22 : exemple d'un diagramme représentant la stratégie de nage à 4 temps à faible recouvrement (les rectangles représentent la propulsion)	68
Figure 23 : exemple d'un diagramme représentant la stratégie de nage à 4 temps à recouvrement moyen (les rectangles représentent la propulsion)	68
Figure 24 : photographie comparative des antérieurs et des postérieurs lors de la phase de planer à l'obstacle (à gauche) et lors de la nage (à droite) (d'après Pr. J-M Denoix, 2014)	75
Figure 25 : photographie comparative des postérieurs lors de la phase de planer à l'obstacle (à gauche) et lors de la nage (à droite) (d'après Pr. J-M Denoix, 2014)	80

Liste des tableaux

Tableau 1 : répartition des styles de nage sur un effectif de 39 chevaux (d'après Grossi <i>et al.</i> , 2024)	22
Tableau 2 : répartition des variations de style de nage au cours de la ligne droite sur un effectif de 22 chevaux changeant de style au cours d'une même séance (d'après Grossi <i>et al.</i> , 2024)	22
Tableau 3 : comparaison des angles articulaires des antérieurs, obtenus lors de la natation, lors de la mobilisation passive et en locomotion terrestre. (d'après Back <i>et al.</i> , 2013 ; Santosuosso <i>et. al.</i> 2021 et Giraudet <i>et. al.</i> 2023).....	28
Tableau 4 : comparaison des angles articulaires des postérieurs, obtenus lors de la natation, lors de la mobilisation passive et en locomotion terrestre. (d'après Back <i>et al.</i> , 2013 ; Santosuosso <i>et. al.</i> 2022 ; Giraudet <i>et. al.</i> 2023).....	29
Tableau 5 : comparaison des amplitudes articulaires des antérieurs, obtenues lors de la mobilisation passive, lors de la natation (d'après Santosuosso <i>et. al.</i> 2021 ; Giraudet <i>et. al.</i> 2023) et lors de la locomotion terrestre aux différentes allures (Back <i>et al.</i> 2013)	31
Tableau 6 : comparaison des amplitudes articulaires des postérieurs, obtenues lors de la mobilisation passive et lors de la natation (d'après Santosuosso <i>et. al.</i> 2022).....	32
Tableau 7 : description de la population de chevaux inclus dans l'étude.....	43
Tableau 8 : nombre et pourcentage de tours identifiés comme appartenant à l'une des trois stratégies de nage identifiées visuellement par des vétérinaires experts, pour chaque cheval individuellement (lignes 1 à 11) et pour tous les chevaux combinés (dernière ligne)	51
Tableau 9 : nombre et pourcentage de tours identifiés comme appartenant à l'une des quatre catégories de nage identifiées par le classificateur à deux étapes, pour chaque cheval individuellement (lignes 1 à 11) et pour tous les chevaux combinés (dernière ligne).	53
Tableau 10 : résultats des métriques par catégorie	55
Tableau 11 : Moyenne et écart-type des paramètres quantitatifs par rapport aux catégories A à D.	59
Tableau 12 : action successive des groupes musculaires et type de contraction lors de la phase de propulsion de l'antérieur gauche	72
Tableau 13 : action successive des groupes musculaires et type de contraction lors de la phase de ramené de l'antérieur gauche.....	74
Tableau 14 : action successive des groupes musculaires et type de contraction lors de la phase de propulsion du postérieur gauche	77
Tableau 15 : action successive des groupes musculaires et type de contraction lors de la phase de ramené du postérieur gauche	79

Liste des abréviations

AD : Antérieur Droit

AG : Antérieur Gauche

ANR : Agence Nationale de la Recherche

ASAT : Aspartate Aminotransférase

BPLC : Biomécanique et Pathologie Locomotrice du Cheval

CatA : Catégorie A

CatB : Catégorie B

CatC : Catégorie C

CatD : Catégorie D

CAPT-ESE : Capteurs et instruments de monitoring en e-santé équine

cm : centimètre

CIRALE : Centre d'Imagerie et de Recherche sur les Affections Locomotrices Équines

DF : Duty Factor

DFAD : Duty Factor Antérieur Droit

DFAG : Duty Factor Antérieur Gauche

DFPD : Duty Factor Postérieur Droit

DFPG : Duty Factor Postérieur Gauche

DL : délai

DiagDL : délai diagonal

DiagDLgauche : délai diagonal gauche

DiagDLdroit : délai diagonal droit

LatDLdroit : délai latéral droit

LatDLgauche : délai latéral gauche

CoLatDLantérieurs : délai membres controlatéraux antérieurs

CoLatDLpostérieurs : délai membres controlatéraux postérieurs

MoyenneLatDL : délai latéral moyen

MoyenneDiagDL : délai diagonal moyen

EnvA : École Nationale Vétérinaire d'Alfort

IMU : unités de mesure inertielle

K : kilo

m : mètre

MD : Main Droite

MG : Main Gauche

mm : millimètre

MP4 : Moving Picture Experts Group Part 14

OL : recouvrement

DiagOL : recouvrement diagonal

DiagOldroit : recouvrement diagonal droit

DiagOLgauche : recouvrement diagonal gauche

LatOL : recouvrement latéral

LatOLdroit : recouvrement latéral droit

LatOLgauche : recouvrement latéral gauche

PD : Postérieur Droit

PG : Postérieur Gauche

PP : phase de propulsion

PR : phase de ramené

UMR : Unité Mixte de Recherche

S1 : Stratégie 1

S2 : Stratégie 2

S3 : Stratégie 3

SL : glissement

DiagSL : glissement diagonal

DiagSLdroit : glissement diagonal droit

DiagSLgauche : glissement diagonal gauche

LatSL : glissement latéral

LatSLgauche : glissement latéral gauche

LatSLdroit : glissement latéral droit

Tcycle : durée totale du cycle

2D : deux dimensions

3D : trois dimensions

° : degré

% : pourcent

Avant-propos

Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre du projet de recherche CAPT-ESE (Capteurs et instruments de monitoring en e-santé équine), lancé en 2020 et financé par l'ANR (ANR-20-CE19-0016). Le projet CAPT-ESE se distingue par une approche innovante dans les domaines technologiques (capteurs embarqués, cinématique aquatique), méthodologiques (études intégrant des données biomécaniques, physiologiques, cliniques et d'imagerie avancée), et physiopathologiques (protocoles de rééducation sportive), grâce à une équipe pluridisciplinaire composée de chercheurs en biomécanique du Laboratoire de Biomécanique et BioIngénierie de l'Université de Technologie de Compiègne, du Laboratoire de Biomécanique et Mécanique des Chocs de l'Université Lyon 1, de cliniciens vétérinaires et d'enseignants-chercheurs de l'École nationale vétérinaire d'Alfort (EnvA) et de développeurs de produits de l'entreprise LIM France. La recherche en milieu aquatique se déroule au centre Kinésia du CIRALE, pôle équin normand de l'École nationale vétérinaire d'Alfort et vise à approfondir les connaissances sur les mouvements des chevaux dans l'eau, notamment pour la rééducation fonctionnelle et l'adaptation de l'activité sportive en réponse aux lésions.

Ce travail de thèse m'a permis d'intégrer cette équipe multidisciplinaire et de participer à l'ensemble des recherches sur le milieu aquatique. Ceci a conduit à la rédaction d'un article, en tant que première autrice, portant sur les différents styles de nage employés par les chevaux. Ce manuscrit débutera par la présentation des recherches préliminaires qui ont permis de réaliser une synthèse bibliographique des connaissances actuelles sur la nage du cheval en piscine. L'article sera présenté dans la deuxième partie de ce manuscrit et sera suivi d'une réflexion sur ses apports.

Introduction générale

L'hydrothérapie, une pratique millénaire héritée des civilisations égyptienne et grecque, a connu une évolution remarquable au fil du temps (Levra, 2009). Initialement basée sur des observations empiriques, elle s'est d'abord imposée dans le domaine de la kinésithérapie humaine (Baruch, 1898), grâce à une compréhension approfondie des effets de l'eau sur le corps immergé. Son adaptation au monde équin apparaît comme une progression naturelle, particulièrement dans un contexte où l'optimisation des performances des chevaux athlètes est constamment recherchée.

L'introduction des chevaux dans un environnement aquatique s'est positionnée comme une solution thérapeutique innovante (Smith, 1981), aboutissant à la création de piscines spécialement conçues pour ces animaux. Cette pratique a été largement adoptée pour le maintien de la condition physique et la rééducation des chevaux (Imahara, 1976). Cependant, l'efficacité de la nage équine repose encore principalement sur des observations empiriques, malgré son intégration croissante dans les programmes d'entraînement.

Bien que les entraîneurs rapportent des résultats qu'ils jugent positifs (Steel *et al.*, 2019), la communauté scientifique n'a pas encore fourni de preuves concluantes de son efficacité. Pour le cheval, habitué à l'environnement terrestre, l'immersion représente un défi d'adaptation considérable. Confronté à un milieu aux lois physiques différentes, l'animal doit modifier son comportement, ce qui pourrait contribuer aux effets bénéfiques observés.

Afin de véritablement comprendre les avantages potentiels de la nage chez le cheval, il est nécessaire d'étudier en détail sa biomécanique et de décrire précisément la coordination des membres. Cette analyse approfondie pourrait fournir une base scientifique solide aux observations empiriques actuelles.

Il est important de souligner que la nage n'est qu'un moyen de faciliter la récupération, et non une fin en soi. L'objectif ultime est de permettre au cheval de retrouver progressivement ses conditions de travail sur la terre, l'immersion servant de transition pour un retour optimal à son environnement naturel.

En conclusion, l'hydrothérapie équine, bien que prometteuse, nécessite encore des études scientifiques rigoureuses pour valider son efficacité et optimiser son utilisation dans le cadre de l'entraînement et de la rééducation des chevaux.

Première partie : travaux préalables à l'étude

1. Introduction du cheval en piscine

A. Les différents types de piscine

Des milieux aquatiques naturels comme la mer et les rivières, aux piscines artificielles modernes, divers environnements ont été imaginés pour faire nager les chevaux. L'entraînement aquatique des chevaux repose sur la présence d'un meneur qui précède l'animal et le guide depuis un quai, en utilisant soit une perche rigide, soit une longe fixée à un licol ou à un caveçon pour l'aider à tourner dans les virages.

Il existe plusieurs modèles de piscines pour chevaux : circulaires, elliptiques, rectangulaires, et linéaires. Historiquement, le modèle circulaire a été développé aux États-Unis, tandis que les modèles elliptiques ou rectangulaires sont plus courants en Europe.

Les piscines circulaires ont généralement un diamètre de 11 à 15 mètres et une profondeur d'environ 3 mètres, créant un couloir de nage de 4 mètres de large et un parcours de 40 mètres par tour. Ces piscines incluent souvent un îlot central et des rampes d'accès en pente douce (Vial, 1991). Ce modèle a été popularisé dans les années 80 aux États-Unis et au Japon (Imahara, 1976 ; Murakami *et al.*, 1976), et adopté mondialement, notamment en Australie (Imahara, 1976) et en Afrique du Sud (Irwin et Howell, 1980). Malgré quelques variations, le principe fondamental reste inchangé : offrir un environnement de nage contrôlé et compact pour un entraînement efficace.

Les piscines elliptiques ou rectangulaires comportent deux lignes droites, reliées par des virages semi-circulaires, formant un parcours en U. Leur périmètre varie entre 50 et 60 mètres, avec une profondeur de 2 à 3 mètres. Ce modèle est répandu en Europe (Galloux *et al.*, 1992) et a été adopté à Hong Kong (Klomp *et al.*, 2014). Un système de passerelle permet d'isoler le bassin pour enchaîner plusieurs tours.

Des innovations récentes ont émergé, notamment une piscine linéaire de 100 mètres de long et de 3 m de profondeur, qui permettait une nage libre en ligne droite sur une distance de 70 mètres. Cette dernière est présente au Al Shaqab Equine Exercise Center (Santosuosso *et al.*, 2021, 2022). Pour nos expérimentations, nous avons utilisé la piscine en forme de U du CIRALE. Elle mesure 50 mètres de long et 3 mètres de profondeur, avec une entrée et une sortie indépendantes, présentant un angle d'environ 15 degrés. Elle est équipée d'une fosse centrale immergée, avec trois vitres, permettant d'observer les mouvements des chevaux sous l'eau (figure 1).

Figure 1 : représentations photographiques de la piscine en U du CIRALE (crédit photo : proximal equine lighting expert)



Dans tous les modèles, la conception des rampes d'accès est cruciale, avec une pente douce de 10 à 15% pour éviter les glissades, et des murs latéraux d'environ 1,50 mètre pour empêcher les chevaux de sauter. Les surfaces sont traitées pour être antidérapantes, assurant la sécurité des animaux.

Ces différents modèles de piscines pour chevaux témoignent de l'évolution constante des techniques d'entraînement et de rééducation équine, chaque modèle cherchant à optimiser les bénéfices de la nage pour ces animaux.

B. L'équilibre du cheval dans le milieu aquatique

Les différents mouvements en piscine sont régis par des principes de mécanique fondamentaux liés à l'immersion dans l'eau, qui expliquent l'équilibre statique et dynamique des chevaux en milieu aquatique. Plusieurs lois physiques régissent la nage.

a. La flottabilité

La flottabilité, qui concerne l'équilibre statique, est atteinte lorsque les forces (poussée d'Archimède et pesanteur) agissant sur le corps du cheval sont alignées. Immérgé, le cheval se stabilise à un niveau d'immersion variable, mais l'alignement des forces tend à le faire basculer vers une position verticale, nécessitant un mouvement de nage pour rester à flot. En se basant sur cette propriété, McClintock a prouvé que le poids apparent d'un cheval immergé est différent de son poids réel sur terre (Mc Clintock *et al.*, 1987). La flottabilité réduit donc le poids supporté par les membres, diminuant ainsi les forces verticales de mise en charge sur les structures musculo-squelettiques, ce qui est un avantage majeur de l'immersion (Mc Clintock *et al.*, 1987 ; King *et al.*, 2013a) dont nous verrons les utilisations pratiques dans le paragraphe suivant.

b. La pression hydrostatique

La pression hydrostatique lors de la nage joue un rôle crucial dans l'entraînement et la rééducation des chevaux. Cette pression est la force exercée par l'eau sur le corps immergé du cheval. Elle augmente avec la profondeur et agit uniformément sur toutes les surfaces du corps. Cette pression peut aider à réduire les œdèmes et à améliorer la circulation sanguine, car elle applique une compression douce sur les membres du cheval, favorisant ainsi le drainage lymphatique et la récupération après l'effort (King *et al.*, 2013a ; Steel *et al.*, 2019). La pression

hydrostatique stimule également la fonction neuromusculaire en activant les nerfs sensoriels et les mécanorécepteurs articulaires, ce qui permet un meilleur contrôle locomoteur (Miyoshi *et al.*, 2004). Elle permet donc une reprise d'activité plus précoce à la suite d'un accident locomoteur, tout en assurant la préservation du processus de guérison en améliorant la locomotion et l'amplitude articulaire et en atténuant la douleur et l'inflammation (King, 2016).

c. Résistances

Lors de la nage, plusieurs forces de résistance influencent le mouvement des chevaux dans l'eau, rendant l'entraînement aquatique plus exigeant que sur terre. Voici un aperçu des principales résistances rencontrées :

- Résistance au frottement : Cette résistance est due à l'écoulement de l'eau sur le corps du cheval. La texture du pelage peut augmenter cette résistance, car elle rend l'écoulement moins fluide qu'il ne le serait sur une surface lisse (Sherwood *et al.*, 2016).
- Résistance de forme : Elle est liée au profil hydrodynamique du cheval. Un profil moins hydrodynamique augmente la résistance, car l'eau doit contourner plus de surface, ce qui peut ralentir le mouvement (Tisba, 2006).
- Résistance frontale : Elle dépend de la surface que le cheval oppose à l'avancement dans l'eau. Cette résistance est plus importante que dans l'air, car l'eau est un milieu plus dense, ce qui nécessite un effort accru pour avancer (Richard *et al.*, 2015). La viscosité de l'eau permet une activation musculaire accrue et une stabilisation des articulations (King *et al.*, 2013b). S'ensuit alors un meilleur contrôle moteur (Miyoshi *et al.*, 2004).
- Résistance de vague : Créée par le mouvement du cheval dans l'eau, cette résistance est due aux vagues générées par la nage. Ces vagues opposent une force au mouvement du cheval, augmentant ainsi l'effort nécessaire pour avancer (Tor *et al.*, 2015).
- Résistance induite : Elle est due aux tourbillons et aux écoulements créés dans le sillage du cheval en mouvement. Cela crée une force de traînée importante dans la direction opposée au mouvement.

Ces résistances, combinées, augmentent l'intensité de l'exercice aquatique, ce qui peut être bénéfique pour renforcer les muscles, améliorer la condition physique générale et favoriser la rééducation des chevaux après une blessure.

Ainsi, l'ensemble des forces s'exerçant sur le cheval lors de la nage représente un défi à résoudre pour un déplacement aquatique efficace. La principale difficulté réside dans le maintien de l'équilibre corporel. L'absence de point d'appui fixe rend l'équilibration dynamique essentielle, nécessitant des mécanismes spécifiques pour maintenir la position quadrupède et récupérer les déséquilibres. En résumé, cette capacité à se stabiliser est la première tâche motrice à maîtriser pour nager, préalable aux autres aspects de la nage.

Dans le paragraphe suivant, nous explorerons les applications pratiques de ces principes dans le cadre des exercices de rééducation ou d'entraînement.

C. Les indications actuelles de la nage

L'hydrothérapie comprend deux principales catégories, l'exercice sur tapis roulant immergé et la nage en piscine. Dans la suite de cette étude nous nous intéresserons uniquement à la nage. La

nage représente une approche innovante dans le domaine de la rééducation et de l'entraînement des chevaux, tirant parti des propriétés uniques du milieu aquatique. Cette méthode repose sur un principe fondamental : l'immersion dans l'eau réduit de manière significative le poids apparent du cheval, sans pour autant modifier sa masse corporelle (Mc Clintock *et al.*, 1987). Ce phénomène, précédemment expliqué, offre un éventail d'avantages thérapeutiques considérables au niveau locomoteur.

a. Indications locomotrices

Les premières utilisations pratiques de la piscine ont été destinées au traitement des troubles locomoteurs.

L'utilisation de la poussée hydrostatique comme moyen de suspension et d'immobilisation en post-opératoire, chez le cheval a été initiée par Smith dès 1978 (Smith, 1981). Cette approche novatrice visait à éviter la surcharge des foyers de fracture, répondant ainsi aux défis posés par le poids important du cheval et la difficulté de le maintenir immobile ou couché. Smith a expérimenté avec succès son système en immergeant 6 chevaux fracturés dans des « caissons de flottaison » (Smith, 1981). En 1986, Hutchins, McClintock et Brown ont poursuivi ces travaux, appliquant cette méthode sur 7 cas de fracture, dont 2 fractures de l'humérus, avec des résultats prometteurs (Hutchins *et al.*, 1987). Leur protocole impliquait le placement des chevaux dans des caissons spéciaux (2,3 m x 0,9 m x 1,7 m) immergés dans une solution saline pendant 1 à 13 semaines après ostéosynthèse, permettant une réduction de 75 % du poids corporel tout en maintenant le cheval debout. Cependant, cette pratique avait des inconvénients, car selon la loi de Wolff, l'os se forme et se résorbe en fonction des contraintes mécaniques qu'il subit. L'immobilisation totale entraîne donc des problèmes tels que l'atrophie musculaire et une perte de qualité et de densité osseuse (Delguste *et al.*, 2007). Ainsi, dans les années qui ont suivi de nouvelles expériences menées sur des rats ostéoporotiques ont permis de démontrer que l'activité de natation permet de prévenir les effets délétères de l'inactivité sur la qualité osseuse et même de l'améliorer (augmentation significative de 43 % de la masse osseuse et de 29 % de la résistance osseuse) par rapport aux témoins immobilisés (Falcai *et al.*, 2015).

Ces avancées ont ouvert la voie à l'utilisation du milieu aquatique pour traiter les problèmes locomoteurs liés à l'exploitation intensive des chevaux de sport. Ces problèmes incluent l'accumulation de microtraumatismes sur les articulations et sur les structures ostéoligamentaires et tendineuses. Ainsi la nage en piscine est décrite dans la littérature pour traiter les affections liées à une surextension du boulet, les tendinopathies des fléchisseurs (Kim *et al.*, 2010 ; Muñoz *et al.*, 2019b), pour des desmites du ligament suspenseur du boulet (Muñoz *et al.*, 2019a ; Santosuosso *et al.*, 2021) ou encore du ligament sésamoïdien distal. En locomotion terrestre, ces structures sont généralement soumises à une forte tension lors de l'extension du boulet, pendant la phase d'appui. La natation permet de réduire l'extension du boulet en l'absence de phase d'appui, diminuant ainsi la tension exercée sur ces structures. Son utilisation est également décrite dans le cas de fractures des os sésamoïdes car l'eau exerce une résistance à l'avancée des membres antérieurs, donc les extenseurs sont particulièrement sollicités, ce qui améliore la phase de soutien de la foulée lors de la reprise de l'activité terrestre (Irwin et Howell, 1980). Lors d'affections ostéoarticulaires juvéniles (Lafon, 2015) ou d'arthrose, la nage permettrait d'améliorer la qualité osseuse (Silva *et al.*, 2008). La nage aurait également un effet bénéfique sur des chevaux souffrant de blessure au sabot car ce dernier ne sera soumis à aucune charge axiale (Santosuosso *et al.*, 2021). Il est possible d'ajouter à ces indications, la rééducation de blessures impliquant la partie dorsale du carpe ou la perte de

flexion du carpe car lors de la nage le degré de flexion du carpe est plus important que lors de mobilisation passive (Santosuosso *et al.*, 2021). La nage peut alors servir pour la rééducation des chevaux qui ont besoin d'une extension modérée du carpe et du boulet (Santosuosso *et al.*, 2021). De plus, les chevaux atteints de lésions des ménisques ou d'arthrose de l'articulation du grasset peuvent bénéficier de la nage (Santosuosso *et al.*, 2022). Pour ceux souffrant d'un accrochement de rotule, la nage peut aider à développer rapidement la masse musculaire du quadriceps sans solliciter excessivement le grasset (Santosuosso *et al.*, 2022). En ce qui concerne les chevaux présentant une fibrose du grasset due à un hématome ou à un sérome périarticulaire important, la natation pourrait contribuer à étirer le tissu périarticulaire et à retrouver rapidement une amplitude de mouvement proche de la normale (Santosuosso *et al.*, 2022).

Pour étayer ces constatations, une enquête menée par Steel et son équipe (Steel *et al.*, 2019) a révélé que 79,2 % des entraîneurs utilisent la nage pour remplacer l'entraînement sur piste des chevaux blessés. Cependant, la nage est également utilisée à d'autres fins : 62,7 % des entraîneurs l'emploient pour améliorer ou maintenir la condition physique, et 40 % pour la stimulation mentale qu'elle procure.

b. Contres-indications locomotrices

Les bénéfices de la nage sont multiples, cependant, il existerait des contre-indications. Certains auteurs recommandent d'éviter de faire nager les chevaux souffrant de boiteries hautes, de certaines affections thoraco-lombaire telles que les conflits de processus épineux (Lafon, 2015 ; Muñoz *et al.*, 2019a) ou encore de raideurs dorsales et de certaines dorsalgies (Galloux *et al.*, 1992). En effet, lors de la nage les chevaux doivent assurer leurs échanges respiratoires en maintenant la tête hors de l'eau tout en s'équilibrant. Ils semblent alors adopter une posture qui se traduit par un rapprochement des processus épineux et une extension cervico-thoracique, thoraco-lombaire et pelvienne (King, 2016) qui pourraient être néfastes lors de ces affections.

En raison du travail musculaire accru, une attention particulière doit être également portée aux chevaux sujets aux myosites (King, 2016) et ce malgré le fait que Murakami et son équipe, en 1976 (Murakami *et al.*, 1976), n'ont pas noté 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 aspartates aminotransférases (ASAT) sauf 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 lors de la locomotion terrestre. Ce point sera évoqué ultérieurement.

Cependant ces contre-indications sont émises sur la base de suppositions car aucune publication ne rapporte d'aggravation objective de lésions initialement présentes ou de dorsalgie.

De nombreuses recherches ont été consacrées à l'évaluation de paramètres biochimiques, hématologiques, cardiaques ou encore respiratoires au cours de la nage (Murakami *et al.*, 1976 ; Nicholl *et al.*, 1978 ; Thomas *et al.*, 1980 ; Hobo *et al.*, 1998 ; Jones *et al.*, 2020 ; Leguillette *et al.*, 2024). Cependant, malgré l'utilisation répandue de cette technique, il est étonnant de constater que peu d'études ont exploré la biomécanique de la nage chez le cheval. Dans le paragraphe suivant, nous nous intéresserons à l'analyse cinématique de la nage, à sa description empirique, ainsi qu'aux travaux réalisés jusqu'à présent.

2. Analyse cinématique de la nage

A. Description empirique de la nage

La position du cheval immergé dans l'eau a été décrite pour la première fois en 1976 (Murakami *et al.*, 1976). Le mouvement de nage chez le cheval est caractéristique. Sa tête est maintenue horizontalement, près de la surface de l'eau avec les mâchoires presque au contact de celle-ci et la sphère oro-nasale hors de l'eau. Les lèvres sont souvent retroussées, exposant les incisives qui restent serrées. Le corps du cheval est généralement entièrement immergé, bien qu'il puisse parfois être partiellement exposé. En effet, la profondeur d'immersion de la croupe et du garrot peut varier légèrement selon les individus. Ces observations demeurent pertinentes à l'heure actuelle.

Des tentatives de description du mouvement ont également été faites au cours des décennies précédentes. Historiquement, les premières descriptions des mouvements réalisés par les membres lors de la nage ont été effectuées dans les années 80. Les auteurs admettaient que, bien que peu adapté à la vie aquatique (Murakami *et al.*, 1976), la plupart des chevaux sauraient nager naturellement dès qu'ils perdent pied (Irwin et Howell, 1980). Cependant, si le mouvement vers l'avant n'est pas maintenu, l'arrière du corps peut couler (Nicholl *et al.*, 1978).

Ils se sont ensuite intéressés aux rôles des antérieurs et des postérieurs au cours de la nage. Pour Nicholl, les chevaux nageaient principalement en utilisant leurs membres antérieurs afin d'assurer leur propulsion (Nicholl *et al.*, 1978). Cette observation n'a pas été confirmée par d'autres auteurs tels que Murakami, qui dissociait le rôle des membres antérieurs et postérieurs. Il supposait que les membres antérieurs servaient à l'équilibre et à la direction, tandis que les membres postérieurs assuraient la propulsion (Murakami *et al.*, 1976). En effet, lorsque les chevaux cessaient de nager, une perte de stabilité latérale était observée, le cheval flottant alors sur le côté (Nicholl *et al.*, 1978). Les chevaux reprenaient alors leur position initiale à l'aide du mouvement de leurs antérieurs (Nicholl *et al.*, 1978). Ces derniers sont alors apparus comme les membres qui permettaient au cheval d'éviter cette bascule latérale (Vial, 1991).

À la suite de ces observations, les auteurs ont cherché à comparer le schéma de nage avec leurs connaissances de la locomotion terrestre, mais ils n'étaient pas unanimes quant aux schémas observés. Murakami, par exemple, a trouvé que le schéma de nage ressemblait à celui de l'amble et parfois à celui du trot (Murakami *et al.*, 1976). En revanche, aucune allure à trois temps n'a été observée lors de ces expériences, contrairement à Swanstrom et Lindy, qui décrivaient divers schémas de nage, y compris une allure à trois temps (Swanstrom et Lindy, 1973). Ils affirmaient également que de nombreux chevaux Trotteurs Français adoptaient un schéma de nage similaire au trot et que certains pouvaient occasionnellement suivre un schéma ressemblant à l'amble ou au pas. Malgré les divergences observées dans le schéma de nage, les auteurs s'accordaient sur le fait que la conception de la piscine dans laquelle les chevaux nageaient influençait probablement le schéma adopté.

Dans les expériences de Murakami *et al.* (1976), la piscine était circulaire, ce qui a conduit les auteurs à faire plusieurs constatations, renforçant l'hypothèse émise précédemment. Les chevaux tournaient toujours dans le même sens, et ils ont observé que les masses musculaires étaient plus développées du côté externe du cercle, phénomène particulièrement marqué au niveau de l'arrière-main. Murakami *et al.* (1976) ont également noté que le coup de pied du membre postérieur extérieur

était plus puissant que celui du membre postérieur intérieur, ce qui indiquait une adaptation des mouvements dans une piscine circulaire et une plus grande sollicitation des muscles situés du côté externe au cercle. Ces observations suggèrent que le schéma de nage est spécifiquement adapté à la configuration de la piscine. Pour renforcer leurs conclusions, Les auteurs ont remarqué que le dos jouait un rôle actif lors des virages, avec une légère torsion de l'axe rachidien, les membres postérieurs passant sous le cheval vers l'extérieur tandis que l'avant-main restait fixe, stabilisée par un mouvement latéral interne-externe (Murakami *et al.*, 1976). Toutes ces observations indiquent clairement que le cheval adapte son schéma de nage en fonction de la conception de la piscine.

Concernant l'évolution de ce schéma de nage, les expériences répétées de Nicholl ont permis de montrer que le cheval améliorait sa technique au cours des séances, prouvant un éventuel effet positif de l'entraînement sur la façon de nager (Nicholl *et al.*, 1978).

En résumé, les études précédentes sur la nage chez le cheval ont fourni des informations précieuses sur les schémas de mouvement, l'influence de la conception de la piscine et le rôle des membres dans la propulsion et l'équilibre. Cependant, ces observations, bien que pertinentes, ne sont pas exemptes de limitations. Des recherches récentes sur la biomécanique de la nage remettent en question certaines de ces conclusions, offrant une perspective nouvelle et potentiellement plus précise sur le comportement aquatique des chevaux.

B. Description actuelle de la nage

Grossi et son équipe ont réalisé une étude rétrospective entre 2019 et 2021 (Grossi *et al.*, 2024). Cette dernière portait sur 39 chevaux, nageant dans une piscine ovale avec une entrée et une sortie unique. Ils ont utilisé une caméra GoPro Hero8 immergée.

L'analyse du style de nage a été effectuée sur la ligne droite de la piscine. Le style dominant a été relevé. Trois styles de nages principaux ont été définis et décrits (tableau 1) :

- Connected pacer : ce style correspond à un mouvement synchronisé des antérieurs avec les membres postérieurs ipsilatéraux, qui alternent avec les mouvements synchronisés du bipède controlatéral. Cela signifie que les bipèdes latéraux droit et gauche sont synchronisés en extension durant la phase de rétraction et en flexion durant la phase de protraction. Il arrive que les postérieurs présentent un léger décalage avec les antérieurs lors de la rétraction et de la protraction.
- Disconnected pacer : ce style de nage correspond au mouvement des quatre membres successivement. Antérieur droit suivi du postérieur droit puis de l'antérieur gauche et enfin du postérieur gauche. La phase de rétraction du postérieur et de l'antérieur est cette fois-ci très décalé.
- Rear engine : ce style de nage correspond selon les auteurs à l'unique mouvement des postérieurs, sans aucun mouvement de la part des antérieurs. Les antérieurs sont alors maintenus en position semi-fléchie.

Tableau 1 : répartition des styles de nage sur un effectif de 39 chevaux (d'après Grossi et al., 2024)

	Connected pacer	Disconnected pacer	Rear engine
Pourcentage de chevaux présentant ce style de nage	18 / 39 = 46,2 %	19 / 39 = 48,7 %	2 / 39 = 5,1 %

Dix-sept chevaux (43,6 %) maintenaient le même schéma tout au long de la séance. Cependant, les auteurs ont remarqué que 22 chevaux (56,4 %) avaient tendance à changer de style de nage, au cours d'une même séance sur la ligne droite. Ces changements étaient plus marqués au début et à la fin de la ligne droite et notamment à l'approche du virage. Des sous-catégories ont été établies pour tenter de décrire au mieux les schémas adoptés par les chevaux changeant de style de nage au cours de la ligne droite. Certains changeaient pour un des trois styles décrit précédemment, tandis que d'autres, adoptaient un schéma ressemblant au trot ou encore au galop. Parmi ces derniers, trois sous types de galop ont été visiblement identifiés mais non décrits (le canter désuni, le galop rotatoire et le galop transverse).

Ainsi, il est possible de retrouver la répartition présentée dans le tableau 2.

Tableau 2 : répartition des variations de style de nage au cours de la ligne droite sur un effectif de 22 chevaux changeant de style au cours d'une même séance (d'après Grossi et al., 2024)

Allure décrite	Nombre de chevaux présentant cette variation
Chevaux changeant de style pour une des trois styles décrits précédemment	14 (63,6 %)
Chevaux changeant de style pour un schéma ressemblant au trot (synchronisation diagonale)	3 (13,6 %) dont 2 chevaux qui poussent simultanément avec les postérieurs
Chevaux changeant de style pour un schéma ressemblant au galop	5 (22,7 %) dont 1 cheval qui pousse simultanément avec les postérieurs

Ils ont également analysé si des facteurs intrinsèques ou extrinsèques pouvaient influencer le style de nage. Ils n'ont mis en évidence aucune différence significative sur le style de nage en fonction de l'âge, du sexe, de la race, du poids, de la discipline ou encore de la conformation anormale des membres. De même, aucune différence significative n'a été mise en évidence sur le critère expérience de nage ou sur les raisons pour lesquels les chevaux avaient été emmenés à nager (rééducation ou entraînement physique).

D'autres paramètres ont été analysés comme la position du carpe à la fin de la protraction des antérieurs ou encore la position de la croupe. En ce qui concerne la position du carpe, 21 chevaux le gardaient fléchi (53,8 %) à la fin de la phase de protraction et 18 chevaux (46,2 %) l'étendaient. Pour la position de la croupe, 18 chevaux (46,2 %) maintenaient la croupe horizontale, 14 (35,9 %) la conservaient dans une position plus basse que le garrot et sept (17,9 %) plus haute que le garrot. Ces paramètres ne semblent pas prédisposer à un style de nage particulier.

L'adduction et l'abduction ont également été observées. Vingt-quatre chevaux (63,2 %) nageaient avec leurs membres dans l'axe, huit (21,1 %) nageaient avec les deux postérieurs en abduction, trois (7,9 %) nageaient avec les antérieurs en adduction, deux chevaux (5,3 %) nageaient seulement avec leur postérieur intérieur en abduction et un cheval (2,6 %) nageait seulement avec son antérieur intérieur en abduction.

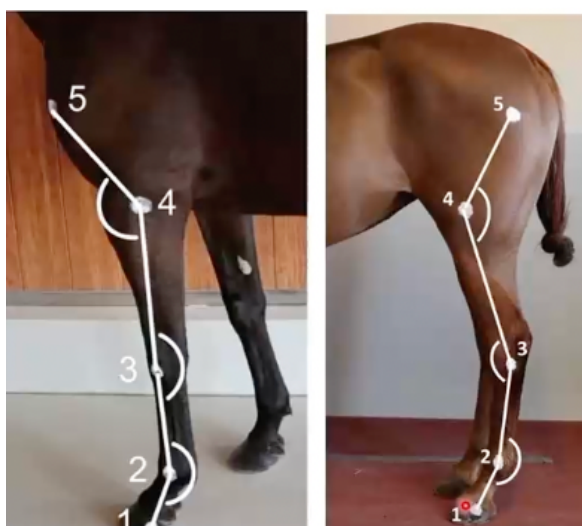
Ces travaux récents soulignent l'importance d'une réévaluation des modèles établis, ouvrant la voie à une compréhension plus approfondie de la dynamique de la nage chez le cheval.

C. Études articulaires lors de la nage

a. Mise en place des études

Santosuosso *et al.* (2021) ont été les premiers, en 2021, à s'être intéressés à la cinématique des membres antérieurs et postérieurs pendant la nage libre en ligne droite. Onze chevaux d'endurance ont été inclus dans l'étude. Ils ont utilisé une piscine linéaire de 100 mètres, deux caméras immergées à 50 cm de profondeur et des marqueurs de 2 cm de diamètre, disposés sur des repères anatomiques précis sur les antérieurs et sur les postérieurs (figure 2). Ce protocole a permis une reconstruction du mouvement en deux dimensions. Les mouvements des membres antérieurs et postérieurs ont été étudiés séparément.

Figure 2 : représentation des angles des antérieurs et des postérieurs (d'après Santosuosso *et al.* 2021 et 2022)



L'équipe de recherche impliquée dans le projet CAPT-ESE, mené au CIRALE, a souhaité améliorer le système de capture afin de permettre l'enregistrement tridimensionnel des mouvements. Six chevaux de saut d'obstacle ont été inclus dans l'étude. Pour permettre la reconstruction du mouvement sous-marin en 3D, plusieurs défis ont été relevés. Les principaux

enjeux concernaient les caméras sous-marines et leurs dispositions (figure 3) ainsi que le système de marqueurs (figure 4). Au total, vingt-quatre marqueurs anatomiques, appliqués avec des crayons marqueurs à bovins, ont été placés sur les membres des chevaux, selon la configuration illustrée dans la figure 4.

Figure 3 : disposition des 6 caméras et champs de vision couvert (d’après Giraudet et al. 2023)

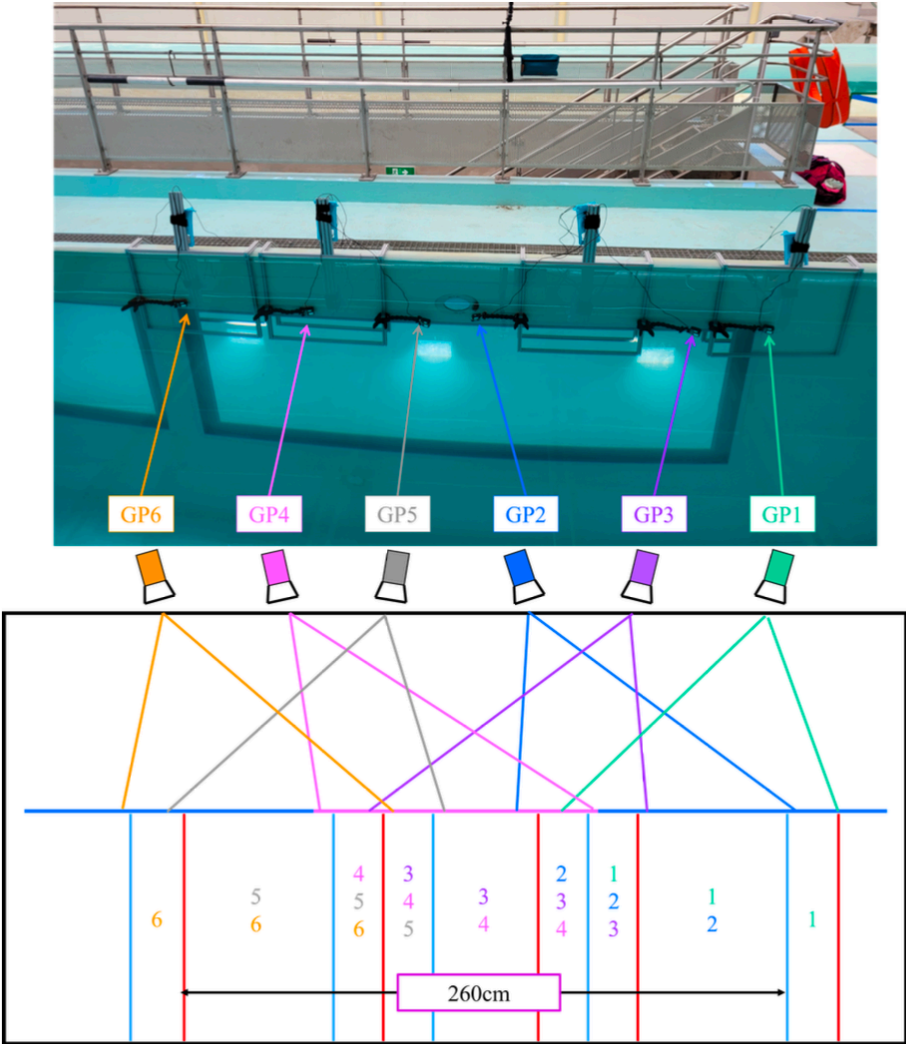
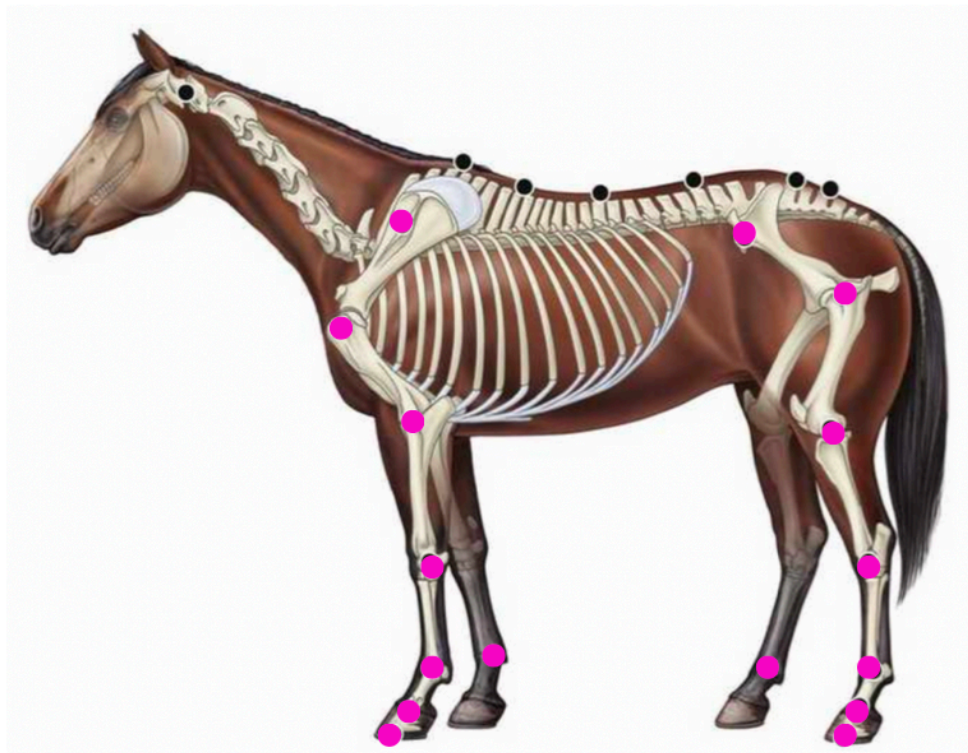
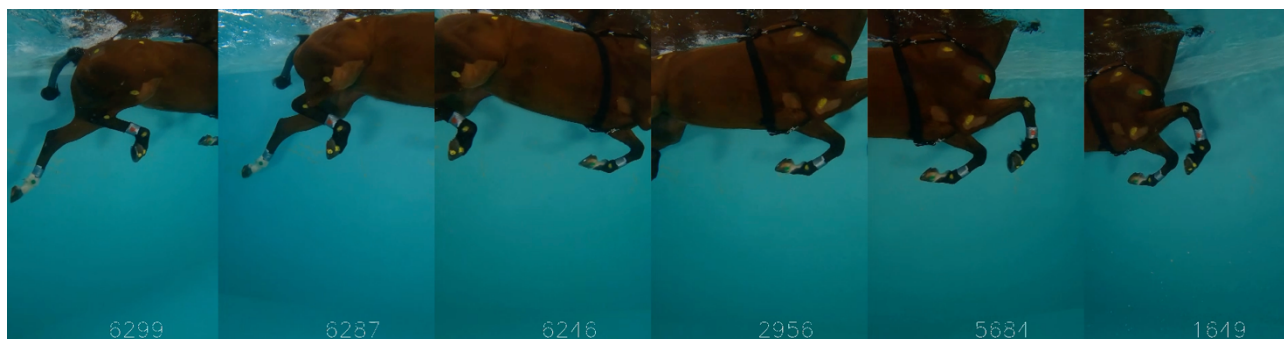


Figure 4 : disposition des marqueurs anatomiques sur les antérieurs (épine scapulaire, épaule, coude, carpe, boulet, pied) et sur les postérieurs (tuber coxae, hanche, grasset, tarse, boulet, pied) (d'après Back *et al.* 2013)



Le traitement vidéo réalisé par Giraudet *et al.* (2023) a permis d'obtenir pour chaque cheval des reconstitutions des passages à main droite et des reconstitutions des passages à main gauche sur un cycle complet de nage, avec le corps du cheval entièrement visible. Un exemple est présenté dans la figure 5 ci-dessous.

Figure 5 : exemple de la reconstitution vidéo d'un passage à main droite



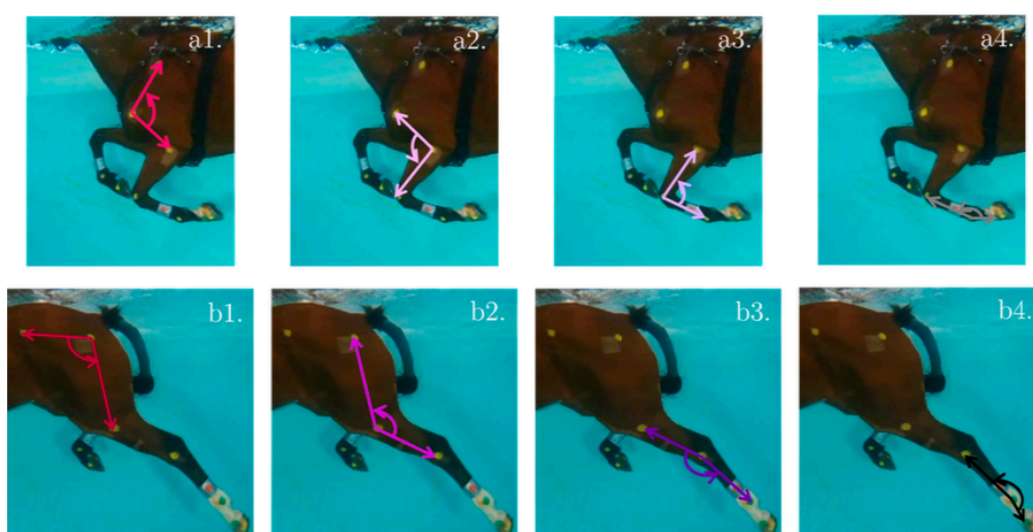
L'objectif de ces études était de comparer les angles articulaires et l'amplitude des mouvements des chevaux dans diverses conditions. Santosuosso *et al.* (2021) ont comparé

l'amplitude en piscine à celle lors de mobilisation passive, tandis que Giraudet *et al.* (2023) ont confronté l'amplitude en piscine à celle observée durant la locomotion terrestre.

b. Résultats

Ces études se sont toutes les deux concentrées sur les articulations du coude, du carpe et du boulet au niveau des antérieurs et sur celles du grasset, du tarse et du boulet pour les postérieurs. L'étude CAPT-ESE a élargi son champ d'investigation en intégrant l'examen des articulations de l'épaule et de la hanche. Les reconstructions ont permis de modéliser les segments anatomiques (Figure 6) et de calculer les angles articulaires formés entre les segments proximaux et distaux de chaque articulation.

Figure 6 : exemple de reconstruction des angles articulaires en piscine pour les antérieurs et pour les postérieurs (d'après Giraudet *et al.* 2023)



Les tableaux 3 à 6 ci-dessous présentent les valeurs obtenues pour la flexion maximale, l'extension maximale et l'amplitude articulaire des chevaux étudiés. Dans le cadre de l'étude CAPTE-ESE, une estimation de l'erreur a été réalisée, indiquant qu'elle est inférieure à 10 mm par segment de 10 cm et à 1 degré par angle de 10 degrés. En revanche, dans les études menées par Santosuosso *et al.* (2021, 2022), aucune évaluation de la précision des mesures n'a été rapportée.

- *Flexion / Extension*

Dans un premier temps, Santosuosso *et al.* (2021, 2022) se sont concentrés sur la séquence dans laquelle les articulations atteignent leur flexion et extension maximales lors de la nage. Pour les membres antérieurs, la flexion maximale débutait par le carpe, suivie du coude et du boulet, tandis que pour les membres postérieurs, le grasset atteignait en premier une flexion maximale, suivi du boulet et du tarse. À l'inverse, l'extension maximale se produisait dans un ordre inverse. Il est à noter que la flexion maximale de toutes les articulations a été observée pendant la phase de protraction, alors que l'extension maximale se produisait à la fin de la phase de rétraction.

Par la suite, Santosuosso *et al.* (2021, 2022) et Giraudet *et al.* (2023) ont identifié l'articulation présentant le plus grand degré de flexion et celle ayant le plus grand degré d'extension en piscine (tableau 3). Ils ont constaté que pour les membres antérieurs, le coude était l'articulation la plus sollicitée en flexion, tandis que pour les membres postérieurs, le tarse était le plus sollicité en flexion. En ce qui concerne l'extension, le boulet était l'articulation la plus sollicitée tant pour les membres antérieurs que postérieurs.

L'équipe de Santosuosso *et al.* (2021) a ensuite comparé ces degrés de flexion et d'extension avec ceux obtenus lors de la mobilisation passive (tableau 3), révélant que la nage semble réduire l'extension des membres antérieurs, particulièrement au niveau du boulet et du carpe, tandis que la flexion de toutes les articulations est augmentée lors de la nage comparativement à une mobilisation passive, sauf pour le carpe, dont la flexion est significativement inférieure (- 50,5 %). Les auteurs expliquent ces constats de manière logique par le fait que la locomotion aquatique ne comporte pas de phase de contact au sol, ce qui empêche l'effet de mise en charge et, par conséquent, limite l'extension passive du carpe et du boulet.

L'équipe de Giraudet *et al.* (2023) a relié ces données aux angles articulaires observés en locomotion terrestre (tableau 3), montrant que, dans l'eau, les articulations sont généralement moins étendues et plus fléchies que lors de la locomotion terrestre. Les angles pris pour référence en locomotion terrestre sont tirés des études de Back *et al.* (1996, 1997, 2013).

Tableau 3 : comparaison des angles articulaires des antérieurs, obtenus lors de la natation, lors de la mobilisation passive et en locomotion terrestre. (d'après Back *et al.*, 2013 ; Santosuosso *et. al.* 2021 et Giraudet *et. al.* 2023)

Les valeurs **en orange** correspondent aux résultats de Santosuosso *et al.* (2021), les valeurs en gris à celles obtenues par Giraudet *et al.* (2023) et les valeurs **en bleu** au résultats reportés par Back *et al.* (2013). Plus l'angle est petit, plus la flexion est grande, plus l'angle est grand, plus l'extension est grande.

	Épaule	Coude	Carpe	Boulet
ANTÉRIEURS				
Extension maximale pendant la natation (°)	119 /	133 125,9	168 156,7	197 188,3
Extension maximale en mobilisation passive (°)	/ /	/ 129,8	/ 184,1	/ 218,2
Extension maximale en locomotion terrestre (°)	Pas : 126,2 Trot : 125,4	Pas : 156,6 Trot : 155,5 Canter : 158,2	Pas : 178,7 Trot : 182,9 Canter : 185,6	Pas : 221,1 Trot : 253,9 Canter : 240,7
Flexion maximale pendant la natation (°)	102 /	58 52,8	69 60,9	129 111,4
Flexion maximale pendant la mobilisation passive (°)	/ /	/ 58,1	/ 30,6	/ 120,4
Flexion maximale en locomotion terrestre (°)	Pas : 125,4 Trot : 110,1	Pas : 104,8 Trot : 95,3 Canter : 93,5	Pas : 110,1 Trot : 92,1 Canter : 92,9	Pas : 163,5 Trot : 158,7 Canter : 154,1

L'étude des mouvements des membres postérieurs révèle des différences notables entre la nage et la mobilisation passive (tableau 4). La nage tend à réduire l'extension articulaire, comme en témoigne l'extension du grasset, qui était 30 % plus prononcée lors de la mobilisation passive. En revanche, la nage favorise une flexion accrue de toutes les articulations, comparée à la mobilisation passive. Par exemple, la flexion maximale du grasset était 28 % plus importante pendant la natation. Santosuosso *et al.* (2022) proposent une explication fonctionnelle à cette hyperflexion observée lors de la nage : elle permettrait de rapprocher le membre du corps, réduisant ainsi la résistance hydrodynamique pendant la phase de protraction. Il est intéressant de noter que ces observations restent cohérentes lorsqu'on compare les mouvements aquatiques aux mouvements terrestres (tableau 4), soulignant ainsi les adaptations spécifiques du cheval à l'environnement aquatique.

Tableau 4 : comparaison des angles articulaires des postérieurs, obtenus lors de la natation, lors de la mobilisation passive et en locomotion terrestre. (d'après Back *et al.*, 2013 ; Santosuosso *et al.* 2022 ; Giraudet *et al.* 2023)

Les valeurs **en orange** correspondent aux résultats de Santosuosso *et al.* (2022), les valeurs en gris à celles obtenues par Giraudet *et al.* (2023) et les valeurs **en bleu** au résultats reportés par Back *et al.* (2013). Plus l'angle est petit, plus la flexion est grande, plus l'angle est grand, plus l'extension est grande.

	Hanche	Grasset	Tarse	Boulet
POSTÉRIEURS				
Extension maximale pendant la natation (°)	107 -	146 111,5	162 154,7	203 188,9
Extension maximale en mobilisation passive (°)	- -	- 141,4	- 155,1	- 212,7
Extension maximale en locomotion terrestre (°)	Pas : 111,1 Trot : 112,2 Canter : 109,8	Pas : 173,0 Trot : 169,0 Canter : 172,1	Pas : 169,6 Trot : 169,7 Canter : 172,5	Pas : 217,0 Trot : 233,0 Canter : 237,3
Flexion maximale pendant la natation (°)	67 -	78 60,5	62 43,7	109 76,8
Flexion maximale pendant la mobilisation passive (°)	- -	- 79,9	- 44,9	- 89,5
Flexion maximale en locomotion terrestre (°)	Pas : 86,3 Trot : 88,9 Canter : 86,4	Pas : 133,9 Trot : 121,7 Canter : 123,3	Pas : 134,0 Trot : 114,3 Canter : 119,8	Pas : 145,2 Trot : 148,0 Canter : 140,3

Les valeurs obtenues se sont révélées cohérentes, présentant des ordres de grandeur similaires entre les deux études (Santosuosso *et al.* 2021, 2022 ; Giraudet *et al.*, 2023). Ainsi, les articulations sont globalement plus fléchies et moins étendues lors de la nage que lors de mobilisation passive, de la même façon que lors de la locomotion terrestre. Ainsi, contrairement à la locomotion terrestre où les amplitudes en extension (notamment du boulet) sont marquées du fait de la mise en charge du membre, ces contraintes en hyperextension de l'extrémité distale du membre et les sollicitations fortes qu'elles induisent dans le système tendineux et ligamentaires (appareil suspenseur du boulet) sont très réduites lors de la nage.

- *Amplitude articulaire*

L'analyse des amplitudes articulaires des membres antérieurs lors de la nage a révélé des résultats intéressants (tableau 5). Le carpe s'est distingué par la plus grande amplitude articulaire pendant la natation. Cependant, comparativement à la mobilisation passive, les amplitudes du carpe et du boulet étaient significativement réduites lors de la nage (respectivement -59,9 % et -35,6 %). Cette réduction s'explique principalement par une extension limitée de ces articulations, due à l'absence de mise en charge dans l'eau. Le coude, quant à lui, présentait une différence d'amplitude moins marquée entre la nage et la mobilisation passive, bien que les auteurs suggèrent une possible sous-estimation de l'extension passive du coude, potentiellement due à un manque de coopération des chevaux lors des mesures.

En comparant avec la locomotion terrestre (tableau 5), on constate généralement des amplitudes articulaires plus importantes en piscine, à l'exception du boulet qui montre des amplitudes similaires ou légèrement inférieures à celles observées sur terre. Cette particularité du boulet pourrait s'expliquer par l'absence de phase d'appui en milieu aquatique, limitant ainsi son extension. Il est intéressant de noter que, tant en milieu aquatique que terrestre, c'est l'articulation du carpe qui présente la plus grande amplitude articulaire pour les membres antérieurs, soulignant son rôle crucial dans l'adaptation du mouvement à différents environnements.

Tableau 5 : comparaison des amplitudes articulaires des antérieurs, obtenues lors de la mobilisation passive, lors de la natation (d'après Santosuosso *et al.* 2021 ; Giraudet *et al.* 2023) et lors de la locomotion terrestre aux différentes allures (Back *et al.* 2013)

Les valeurs **en orange** correspondent aux résultats de Santosuosso *et al.* (2021), les valeurs en gris à celles obtenues par Giraudet *et al.* (2023) et les valeurs **en bleu** au résultats reportés par Back *et al.* (2013).

	Épaule	Coude	Carpe	Boulet
Amplitude articulaire pendant la natation (°)	17 <i>/</i>	76 <i>73,1</i>	99 <i>98,5</i>	68 <i>78,3</i>
Amplitude articulaire pendant la mobilisation passive (°)	<i>/</i> <i>/</i>	<i>/</i> <i>71,7</i>	<i>/</i> <i>153,5</i>	<i>/</i> <i>97,7</i>
Ratios Amplitude articulaire natation / Amplitude articulaire mobilisation passive	<i>/</i>	<i>0,9</i>	<i>0,8</i>	<i>0,9</i>
Amplitude articulaire en locomotion terrestre (°)	<i>Pas : 13,1</i> <i>Trot : 15,3</i>	<i>Pas : 51,8</i> <i>Trot : 60,2</i> <i>Canter : 64,8</i>	<i>Pas : 68,7</i> <i>Trot : 90,8</i> <i>Canter : 92,7</i>	<i>Pas : 60,2</i> <i>Trot : 80,6</i> <i>Canter : 86,7</i>

Concernant les membres postérieurs, les études ont mis en évidence des particularités intéressantes dans les amplitudes articulaires lors de la nage (tableau 6). Bien que le boulet ait démontré la plus grande amplitude articulaire pendant la natation, une comparaison avec la mobilisation passive a révélé des différences notables. En effet, les amplitudes du grasset et du boulet étaient respectivement réduites de 18 % et 10 % lors de la nage par rapport à la mobilisation passive. L'articulation du tarse, quant à elle, n'a pas présenté de différence significative entre ces deux conditions.

Un contraste intéressant apparaît lorsqu'on compare les mouvements en piscine à ceux observés sur terre (tableau 6). Dans l'environnement aquatique, c'est le tarse qui se distingue par la plus grande amplitude articulaire pour les membres postérieurs. Cette observation diffère de ce qui est constaté en locomotion terrestre, où le boulet joue ce rôle prédominant. Cette divergence souligne l'adaptation spécifique des articulations des membres postérieurs du cheval aux contraintes et opportunités offertes par le milieu aquatique, mettant en lumière la plasticité du système locomoteur équin face à différents environnements.

Tableau 6 : comparaison des amplitudes articulaires des postérieurs, obtenues lors de la mobilisation passive et lors de la natation (d'après Santosuosso *et al.* 2022)

Les valeurs **en orange** correspondent aux résultats de Santosuosso *et al.* (2022), les valeurs en gris à celles obtenues par Giraudet *et al.* (2023) et les valeurs **en bleu** aux résultats reportés par Back *et al.* (2013).

	Hanche	Grasset	Tarse	Boulet
Amplitude articulaire pendant la natation (°)	39 /	68 50,9	99 110,7	94 112,2
Amplitude articulaire pendant la mobilisation passive (°)	/ /	/ 60,9	/ 110,2	/ 123,7
Ratios Amplitude articulaire natation / Amplitude articulaire mobilisation passive	/	0,7	1,0	0,9
Amplitude articulaire en locomotion terrestre (°)	Pas : 24,8 Trot : 23,3 Canter : 23,4	Pas : 39,1 Trot : 47,3 Canter : 48,8	Pas : 35,6 Trot : 55,4 Canter : 52,8	Pas : 71,8 Trot : 85,0 Canter : 96,9

En résumé, l'étude des amplitudes articulaires chez le cheval révèle une hiérarchie intéressante selon le contexte de mouvement. La nage se positionne comme un intermédiaire : elle permet des amplitudes articulaires plus importantes que la locomotion terrestre, mais n'atteint pas les degrés de mobilité observés lors de la mobilisation passive. Cette gradation s'explique par le fait que, dans leurs déplacements naturels, qu'ils soient aquatiques ou terrestres, les chevaux n'exploitent généralement pas l'intégralité de leur potentiel de mouvement articulaire, tel qu'il peut être observé lors d'une mobilisation passive contrôlée. Cette observation souligne l'adaptation du cheval à différents environnements, tout en mettant en évidence la réserve de mobilité articulaire dont il dispose, mais qu'il n'utilise pas pleinement dans ces activités spontanées.

- *Vitesse angulaire*

Les études de Santosuosso *et al.* (2021, 2022) ont apporté des éclairages significatifs concernant la vitesse angulaire des articulations. Quelle que soit l'articulation, cette dernière atteint son maximum négatif (vitesse angulaire de flexion) au début de la phase de protraction et son maximum positif (vitesse angulaire d'extension) pendant la phase de rétraction. Pour les membres antérieurs, le carpe, le coude, puis le boulet atteignent successivement leurs vitesses angulaires maximales, tant en flexion qu'en extension. Concernant les membres postérieurs, la séquence de flexion maximale suit l'ordre suivant : grasset, boulet, tarse, tandis que l'extension maximale est atteinte simultanément pour toutes les articulations en milieu de rétraction.

Les vitesses angulaires varient significativement entre les articulations, révélant leur importance relative dans le cycle de nage. Pour les antérieurs, le boulet et le coude présentent la plus grande vitesse angulaire moyenne positive, tandis que le carpe montre la plus grande vitesse angulaire moyenne négative. Cette flexion rapide du carpe pourrait faciliter la protraction du membre en réduisant la résistance de l'eau. Pour les postérieurs, le tarse se distingue par les vitesses angulaires maximales, tant positives que négatives. Globalement, les vitesses angulaires moyennes sont plus élevées pendant la phase de rétraction que pendant la protraction, probablement en raison de la résistance accrue de l'eau lors de la protraction.

Pour conclure, en comparaison avec la locomotion terrestre, la nage induit des mouvements moins étendus en extension mais plus prononcés en flexion, résultant en des amplitudes généralement plus importantes que sur terre, mais moindres qu'en mobilisation passive. Ces différences s'expliquent par la résistance de l'eau et l'absence de charge pondérale, offrant un environnement unique pour le travail et la rééducation musculosquelettique.

Ces premières observations nous ont incités à approfondir nos recherches afin de comprendre comment l'exercice aquatique peut être bénéfique dans les programmes de rééducation ou de travail. Il est essentiel de commencer par les fondamentaux, c'est-à-dire par une étude précise du mouvement des chevaux lors de la nage. Tout comme il existe différentes allures pour la locomotion terrestre, il est raisonnable de supposer qu'il existe également différents styles de nage en piscine.

3. Définition des débuts et fins de phase de propulsion et de ramené par cinématique.

L'étude préliminaire menée dans le but de décrire la biomécanique de la nage chez le cheval débute par le questionnement initial suivant : comment définir un cycle de nage ? Pour éclairer cette interrogation, une approche comparative a été adoptée, se référant à la locomotion terrestre.

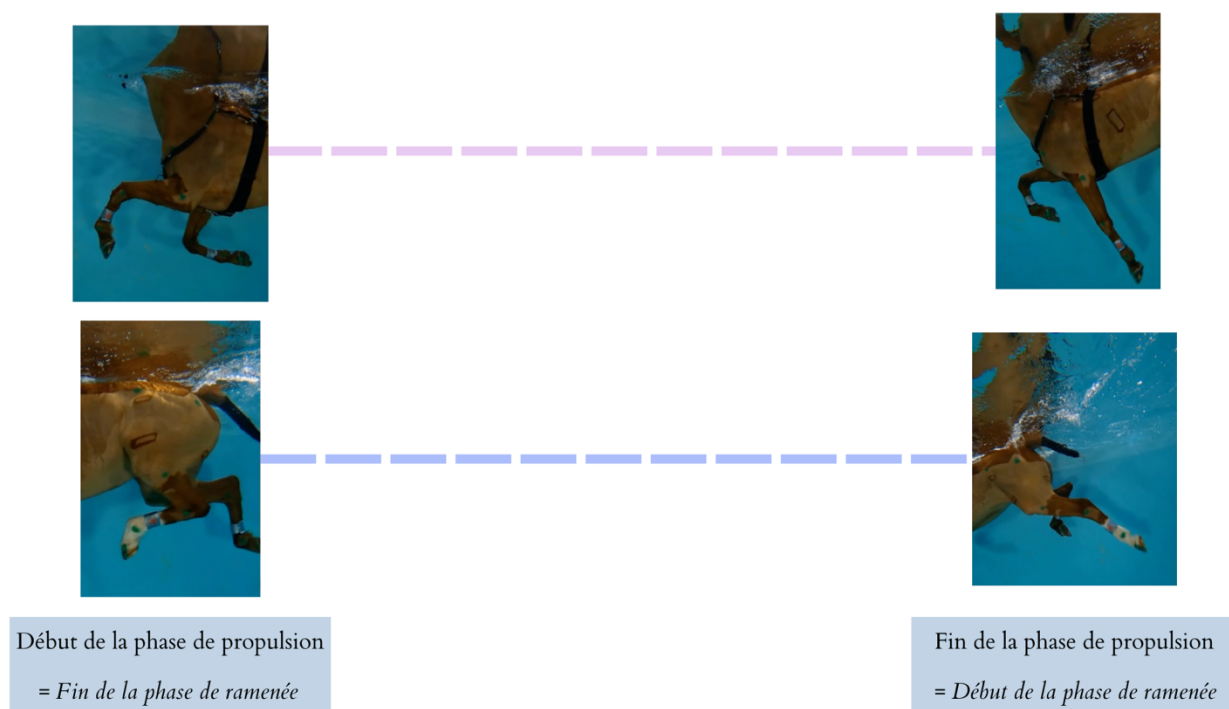
En biomécanique terrestre, une foulée se compose de deux phases principales, chacune pouvant être subdivisée en trois temps. Cependant, en raison de l'absence de contact avec le sol, ces définitions nécessitent des ajustements lorsqu'on aborde la locomotion aquatique. Ainsi, en piscine, une foulée est définie comme un cycle complet de locomotion allant du début du mouvement d'un membre jusqu'au début du mouvement suivant de ce même membre.

En milieu terrestre, la phase d'appui, durant laquelle le membre supporte le poids du corps en contact avec le sol, se divise en trois temps. En piscine, cette phase se réduit à une seule étape. Le premier temps, l'amortissement, correspondant à la fermeture des angles articulaires lorsque le membre entre en contact avec le sol. Il permet l'absorption des chocs lors de la prise d'appui. Cette phase disparaît en piscine car aucune force ne provient d'un support rigide. Le deuxième temps, le support, correspond à la verticalisation du membre évitant l'effondrement du membre sous le poids du cheval, n'existe pas non plus en piscine. Enfin le troisième temps, la propulsion, est le seul temps conservé en piscine. Il permet la translation horizontale du corps du cheval dans l'eau. Le mouvement est caractérisé par l'ouverture des angles articulaires et implique la rétraction violente du membre. Le déplacement du membre vers l'arrière, appelé "rétraction" dans les milieux terrestre et aquatique, est désigné sous le terme de "propulsion" en piscine (figure 7) et de "phase d'appui" en milieu terrestre. L'absence des phases d'amortissement et de support en milieu aquatique présente un intérêt particulier pour les exercices de rééducation fonctionnelle. En effet, l'élimination des forces provenant d'un support rigide réduit les contraintes sur les articulations et les tissus mous, tout en permettant un mouvement propulsif.

La phase de soutien, durant laquelle le membre n'est pas en contact avec le sol, se divise également en trois temps distincts. En piscine cette phase peut être simplifiée en deux temps. Le ramener, correspond en terrestre à la fermeture des angles articulaires lorsque le membre quitte le sol. En piscine, ce temps existe également, débutant lorsque le membre amorce son mouvement vers l'avant. Il est suivi de la suspension, qui correspond à un temps intermédiaire, où les articulations atteignent un degré maximal de flexion. Il est présent lors de la nage où il marque la fin de l'avancée du membre. Ainsi, le dernier temps appelé embrassée du terrain, qui en milieu terrestre se termine par le contact avec le sol, est absent en piscine. En effet, il n'existe pas d'ouverture des angles articulaires à la fin du mouvement en milieu aquatique. Le déplacement du membre vers l'avant, appelé "protraction" dans les milieux terrestre et aquatique, est désigné sous le terme de "ramené" en piscine et de "phase de soutien" en milieu terrestre. Pour conclure, la phase de soutien en milieu aquatique se compose de deux temps principaux, simplifiant la complexité observée en milieu terrestre. Ces ajustements reflètent les différences fondamentales entre les environnements terrestre et aquatique, influençant la dynamique de la locomotion du cheval.

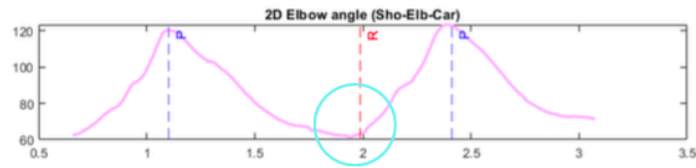
Ainsi, bien que simplifiée, le cycle en milieu aquatique peut lui aussi être décomposé en deux phases distinctes. Ces phases, porteront le nom de propulsion lorsque le membre amorce son mouvement vers l'arrière et de ramené lorsque le membre amorce son mouvement vers l'avant (figure 7). Elles seront analysées en détail dans la suite de ce travail.

Figure 7 : représentation de la phase de propulsion de l'antérieur gauche et du postérieur gauche

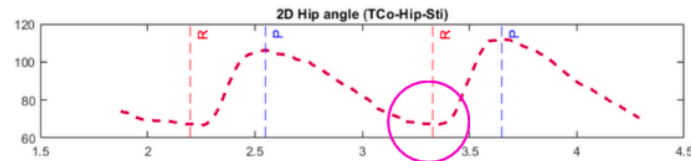


Il était alors nécessaire de définir des repères utilisables en piscine et des événements caractéristiques pendant la nage. Une étude utilisant la capture de mouvement 3D sous-marin a été menée sur six chevaux habitués à nager par Moiroud *et al.* (2024), impliquée dans le projet CAPT-ESE. Trois vétérinaires ont évalué subjectivement les durées des phases de propulsion (PP) et de ramenée (PR). L'analyse indépendante des quatre membres et le timing correspondant des phases a été calculé à l'aide des enregistrements vidéo. Cette analyse a révélé une forte concordance entre les évaluations des vétérinaires, avec une différence minimale pour la PP (différence moyenne = 14 images, soit <math><0,04s</math>). Le cycle de nage complet durait en moyenne

Figure 8 : exemple d'angles observés en début de phase de propulsion pour le coude et la hanche

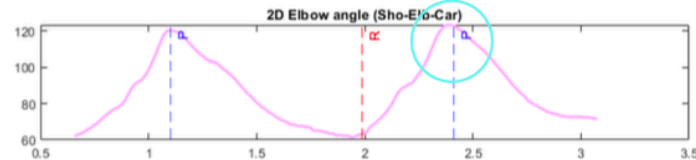


Angle du coude
minimum

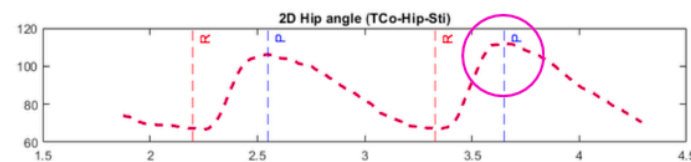


Angle de la hanche
minimum

Figure 9 : exemple d'angles observés en fin de phase de propulsion pour le coude et la hanche



Angle du coude
maximum



Angle de la hanche
maximum

Ces données ont permis, à ce stade, d'atteindre un premier consensus : au début de la phase de propulsion, les angles sont minimaux, et à la fin de la phase de propulsion, les angles sont maximaux. Les données recueillies à la fois par observation visuelle et par capture de mouvement sont donc cohérentes.

Cependant, pour approfondir l'analyse de manière plus précise, une étude de la coordination était nécessaire, impliquant la création de graphiques de coordination. Comme précédemment, le travail conjoint des vétérinaires et des ingénieurs a conduit à l'article présenté dans la section

suivante. Cet article, fruit de mon écriture personnelle avec l'aide et l'encadrement de toute l'équipe CAPT-ESE, permet de caractériser trois stratégies de nage distinctes et de les classer en quatre catégories.

Deuxième partie : étude expérimentale - Article CAPT-ESE, analysant les différents styles de nage

Description et analyse des stratégies de nage des chevaux dans une piscine en forme de U

Pauline Gaulmin 1, Frédéric Marin 2, Claire Moiroud¹, Audrey Beaumont¹, Sandrine Jacquet¹, Emeline De Azevedo¹, Pauline Martin³, Fabrice Audigié¹, Henry Chateau^{1,*} and Chloé Giraudet 2

1. École nationale vétérinaire d'Alfort, CIRALE, Maisons-Alfort, France

2. UTC, BMBI, UMR 7338, Compiègne, France

3. LIM France, Nontron, France ; e-mail@e-mail.com

* Correspondance : henry.chateau@vet-alfort.fr

Résumé simplifié : La natation est souvent utilisée dans l'entraînement et la rééducation des chevaux, mais il y a eu peu d'analyses détaillées sur la façon dont les chevaux coordonnent leurs membres dans l'eau. Nous avons d'abord effectué une analyse qualitative où des vétérinaires experts ont visuellement identifié les phases de propulsion et de récupération, permettant une caractérisation initiale des modèles de nage. Ensuite, nous avons utilisé un modèle informatique pour classer les modèles de nage basés sur des mesures spécifiques. Le modèle était en accord avec les observations des vétérinaires 96,8% du temps. Nous avons constaté que tous les chevaux suivaient un schéma de mouvement commun mais présentaient suffisamment de différences pour identifier trois styles de nage : une stratégie à deux temps avec chevauchement latéral, une stratégie à deux temps avec chevauchement diagonal, et une stratégie à quatre temps où chaque membre bougeait indépendamment. Ces résultats ouvrent de nouvelles possibilités de recherche, notamment le suivi des changements de styles de nage au fil du temps et l'exploration de la façon dont la natation peut aider pour différentes blessures. Ce travail aidera à améliorer les programmes d'entraînement aquatique pour les chevaux.

Résumé : L'entraînement aquatique est intégré aux programmes de rééducation équine depuis plusieurs décennies. Bien que les effets cardiovasculaires de cet entraînement aient été explorés dans des études précédentes, il existe peu de recherches sur les modèles locomoteurs exhibés pendant le cycle de nage. Cette étude visait à analyser trois stratégies de nage distinctes, identifiées par des vétérinaires, basées sur les phases de propulsion de chaque membre : (S1) cycle à deux temps avec chevauchement latéral, (S2) cycle à deux temps avec chevauchement diagonal, et (S3) cycle à quatre temps. Douze vidéos sous-marines de onze chevaux habitués à nager ont été examinées pour quantifier les différences dans les modèles locomoteurs entre ces stratégies. Initialement, un classificateur a été développé pour catégoriser 125 segments vidéo en quatre groupes (CatA à CatD). Les résultats ont démontré que ces catégories correspondent à des stratégies de nage spécifiques, CatA s'alignant avec S1, CatB avec S2, et CatC et CatD représentant

des variations de S3. Cette classification souligne que deux paramètres clés, les ratios latéraux et diagonaux, sont en effet efficaces pour distinguer les différentes stratégies de nage. De plus, les modèles de coordination ont été analysés en relation avec ces stratégies de nage. L'une des principales découvertes est la variabilité des stratégies de nage à la fois au sein d'un même cheval et entre les chevaux. Alors que cinq chevaux ont constamment maintenu la même stratégie tout au long de leurs sessions de nage, six autres ont montré des variations dans leur stratégie entre les tours. Cela suggère que des facteurs tels que la direction de nage, les pauses entre les tours et la fatigue peuvent influencer le choix de la stratégie de nage. Cette étude offre de nouvelles perspectives sur les modèles locomoteurs des chevaux pendant l'entraînement aquatique et a des implications pour améliorer la conception des protocoles de rééducation.

Mots-clés : natation équine ; cycle de nage ; locomotion équine ; rééducation ; capture de mouvement.

1. Introduction

L'entraînement aquatique des chevaux en piscine est utilisé depuis de nombreuses années (Murakami *et al.*, 1976). La motivation principale est de préserver la condition physique des chevaux (Irwin et Howell, 1980) grâce à un niveau d'activité significatif, fournis par la natation, tout en minimisant le stress sur les membres (King, 2016), grâce à la flottabilité permis par l'immersion dans une piscine. Ce principe a également été appliqué en rééducation (Smith, 1981) pour favoriser une remise en charge précoce. La flottabilité réduit l'impact et le stress sur les structures vulnérables, permettant aux patients de débiter des activités de mise en charge plus tôt que ce qui serait possible avec un programme de rééducation classique. Cette approche permet d'accélérer la récupération, de maintenir la force musculaire et la mobilité articulaire, et potentiellement d'améliorer les résultats globaux de la rééducation. En 1981, Smith a démontré avec succès l'efficacité de cette approche sur six chevaux présentant une ou plusieurs fractures, réduisant le stress sur les os en cours de guérison (Smith, 1981). La quantification de la réduction du poids est basée sur le principe d'Archimède. Selon ce principe, un corps immergé dans un fluide subit une poussée vers le haut égale au poids du fluide déplacé.

Cependant, le cheval reste peu adapté à un environnement aquatique (Bromiley, 2007). En raison de leur morphologie, il y a une distribution inégale de la masse dans l'eau ; les parties plus denses comme les membres, la tête et le cou ont tendance à couler, tandis que les régions moins denses, comme le thorax, ont tendance à flotter. Ce déséquilibre crée un moment de redressement qui, si l'animal reste passif, le ramène progressivement à une position d'équilibre presque verticale (Dagg et Windsor, 1972). Malgré cela, le cheval commence instinctivement à nager dès que ses sabots ne peuvent plus toucher le sol. L'immersion place le cheval dans un environnement inhabituel, régi par des lois physiques différentes (King, 2016), en particulier celles liées à la résistance hydrodynamique et à la flottabilité (King, 2016). Ces contraintes obligent le cheval à modifier son comportement locomoteur habituel, conduisant à une amplitude articulaire accrue (Santosuosso *et al.*, 2021, 2022 ; Giraudet *et al.*, 2023) et une activité musculaire intensifiée (Tokuriki *et al.*, 1999). La résistance accrue au mouvement des membres dans l'eau réactive les muscles agonistes, réduit la co-contraction des paires de muscles antagonistes et améliore le contrôle neuromusculaire et la coordination de l'activité musculaire (King, 2016).

Des adaptations physiologiques se produisent également lors de l'entraînement aquatique chez les chevaux. De nombreuses études se sont concentrées sur les réponses physiologiques du

cheval à l'effort dans la piscine, à commencer par Murakami en 1976 (Murakami *et al.*, 1976) et suivies dans les années 1980 par Nicholl et Fregin (Nicholl *et al.*, 1978), et Irwin et Howell (Irwin et Howell, 1980). Ces adaptations affectent divers systèmes corporels et contribuent aux avantages globaux de cette méthode d'entraînement. Les adaptations notables comprennent des changements dans la fonction cardiovasculaire (Murakami *et al.*, 1976 ; Nicholl *et al.*, 1978 ; Thomas *et al.*, 1980), la capacité respiratoire (Hobo *et al.*, 1998 ; Jones *et al.*, 2020 ; Leguillette *et al.*, 2024), et les processus métaboliques (Murakami *et al.*, 1976 ; Thomas *et al.*, 1980), qui améliorent tous l'efficacité du cheval dans l'environnement aquatique et peuvent potentiellement conduire à une amélioration des performances sur terre également (Steel *et al.*, 2019). En plus de ces changements physiologiques, le modèle locomoteur est évidemment aussi modifié pendant la nage.

Bien que la natation ait été de plus en plus intégrée dans les programmes d'entraînement par de nombreux entraîneurs sur une base empirique, très peu d'études se sont concentrées sur l'analyse biomécanique de la nage des chevaux dans une piscine, en particulier concernant la coordination des membres (Santosuosso *et al.*, 2021, 2022 ; Grossi *et al.*, 2024). Les premières publications sur le travail aquatique pour les chevaux ont été rapportées par Swanstrom et Lindy en 1973 (Swanstrom et Lindy, 1973), où ils ont décrit pour la première fois un modèle de coordination à 3 temps pendant la nage des chevaux. Cependant, ils ont également observé des variations dans le modèle de coordination. Pour certains chevaux, le modèle ressemblait à celui d'une marche terrestre, tandis que pour d'autres, il était plus proche d'un trot terrestre. Ces observations ont été faites dans une piscine circulaire où l'acte de tourner impose des contraintes supplémentaires sur le mouvement. En 2024, une étude menée dans une piscine semi-circulaire a identifié trois modèles de nage distincts, les catégorisant comme « connected pacer », « disconnected pacer » et « rear engine » (Grossi *et al.*, 2024). Cependant, ces observations étaient qualitatives. La première analyse cinématique du mouvement des membres pendant la nage a été présentée en 2021 (Santosuosso *et al.*, 2021, 2022). Ces études se sont concentrées sur la rotation dans le plan sagittal des articulations des membres antérieurs (coude, carpe et boulet) (Santosuosso *et al.*, 2021) et des articulations des membres postérieurs (grasset, jarret et boulet) (Santosuosso *et al.*, 2022). Ce travail a fourni une compréhension initiale de l'amplitude de mouvement attendue pour différentes articulations pendant la nage. Cependant, ces études n'ont pas entièrement décrit le cycle de nage et ont analysé indépendamment la cinématique des membres antérieurs et postérieurs. En 2023, Giraudet *et al.* (Giraudet *et al.*, 2023) ont approfondi ce travail en développant un système de capture de mouvement basé sur des marqueurs qui a permis la capture de mouvement 3D du cheval tout au long d'un cycle de nage complet. Ce travail a également permis de déterminer les angles articulaires utilisés pendant la nage, avec une précision de 1°. Les angles 3D des articulations du coude et du grasset ont servi de base pour définir un cycle de nage, en identifiant deux événements clés correspondant aux moments de propulsion et de ramené, par analogie avec les événements terrestres (Moiroud *et al.*, 2024).

Dans la locomotion terrestre, une foulée est divisée en deux phases principales : la phase d'appui, où le sabot est en contact avec le sol, supportant le poids du corps tout en se déplaçant vers l'arrière (rétraction), et la phase de soutien, où le sabot se déplace vers l'avant sans contact avec le sol (protraction) (Denoix et Bonneau, 2014). Chacune de ces phases peut être divisée en trois étapes. La phase d'appui comprend l'amortissement (fermeture des angles articulaires lors du contact avec le sol), le support (lorsque le membre est vertical par rapport au sol), et la propulsion (ouverture des angles articulaires pendant la rétraction rapide du membre). La phase de soutien comprend le ramener (fermeture des angles articulaires lorsque le membre quitte le sol), la

suspension (étape intermédiaire où les articulations sont maximalelement fléchies), et l'embrassée du terrain (ouverture des angles articulaires se terminant par le contact avec le sol) (Denoix et Bonneau, 2014). La principale différence pendant la nage réside dans l'absence de contact avec le sol, ce qui modifie l'analogie des phases de la foulée. La phase de propulsion dans la piscine ne peut pas être limitée à la même définition que la phase de propulsion en locomotion terrestre, car la propulsion se produit plus tôt dans l'eau en raison de l'absence d'une phase d'amortissement. L'équivalent de la phase de soutien terrestre est appelé ramené, pendant laquelle le membre se déplace à nouveau vers l'avant. De plus, une phase supplémentaire existe dans la piscine, qui peut être considérée comme une "phase de glissement", se produisant entre les phases de propulsion et de ramené. Cette phase correspond à une période où le membre stationnaire bénéficie de l'inertie du mouvement dans l'eau. En résumé, pendant la nage, la phase de propulsion englobe le mouvement d'un membre depuis le début de son mouvement vers l'arrière jusqu'à ce qu'il s'arrête à la fin de ce mouvement vers l'arrière, correspondant au mouvement de rétraction. La phase de ramené, quant à elle, englobe le mouvement du membre depuis le début de son mouvement vers l'avant jusqu'à ce qu'il s'arrête à la fin de ce mouvement, correspondant au mouvement de protraction (Back *et al.*, 2013).

L'étude de la coordination des membres pendant un cycle de nage est essentielle pour comprendre la biomécanique du mouvement aquatique. Pour analyser cette coordination, nous nous sommes inspirés des méthodes établies en biomécanique terrestre, créant un lien entre ces deux domaines d'étude. En biomécanique terrestre, les allures sont analysées et classées selon leurs caractéristiques linéaires, temporelles et dynamiques. Cette approche a conduit au développement d'outils analytiques comme les graphiques de coordination, qui représentent visuellement la séquence des mouvements des membres en fonction du pourcentage de la durée de la phase d'appui pendant une foulée (Back *et al.*, 2013). En appliquant ces méthodes à la nage, nous pouvons décrire méticuleusement les mouvements des membres dans l'eau, comparer les modèles de coordination aquatiques et terrestres, et identifier les adaptations spécifiques à l'environnement aquatique. Dans la piscine, la barre correspondant à la phase d'appui terrestre sera remplacée par la phase de propulsion. En utilisant ces graphiques de coordination, divers indicateurs peuvent être calculés pour une analyse quantitative des allures en biomécanique terrestre, tels que le duty factor (le rapport entre la phase d'appui et la durée de la foulée), le chevauchement (la période pendant laquelle deux ou plusieurs membres spécifiés sont simultanément en appui), et le placement avancé (l'intervalle de temps entre le contact au sol de deux membres spécifiés) (Back *et al.*, 2013). Bien que ces indicateurs aient été initialement développés pour l'analyse terrestre, ils peuvent être adaptés pour étudier la biomécanique de la nage.

L'objectif de l'étude est double : premièrement, déterminer le modèle de coordination des membres pendant la nage, et deuxièmement, identifier des paramètres quantitatifs basés sur des événements spatio-temporels qui peuvent décrire et distinguer ses variations. Le premier objectif a été atteint grâce à la détection visuelle des phases de propulsion et de ramené par des vétérinaires experts, suivie d'une analyse qualitative des différents modèles de nage. Le second objectif impliquait la classification des tours de nage à l'aide d'un algorithme d'apprentissage automatique, basé sur deux ratios spatio-temporels, α et β . L'hypothèse était que des seuils spécifiques pour α et β permettraient une classification plus rationnelle des stratégies de nage, améliorant ainsi leur description et leur compréhension.

2. Matériels et méthodes

A. Population et protocole

L'étude a été menée dans une piscine en forme de U de 50 mètres au CIRALE (EnvA, Goustranville, France). Onze chevaux de saut d'obstacles amateurs non boiteux, sans blessures aux membres mais présentant potentiellement des lésions cervicales ou dorsales compatibles avec l'exercice en piscine, ont été inclus dans l'étude. Un seul cheval avait déjà nagé auparavant, mais tous ont bénéficié de trois séances de familiarisation dans une piscine avant l'inclusion. Les principales caractéristiques des chevaux inclus dans l'étude sont résumées dans le Tableau 7. Les chevaux #04, #05, #07 et #10 ont été exclus de l'étude avant la 8ème semaine d'entraînement, soit pour des raisons cliniques (apparition de boiterie, colique) soit pour des raisons pratiques (allergie à la colle utilisée dans l'expérience par exemple).

Tableau 7 : description de la population de chevaux inclus dans l'étude

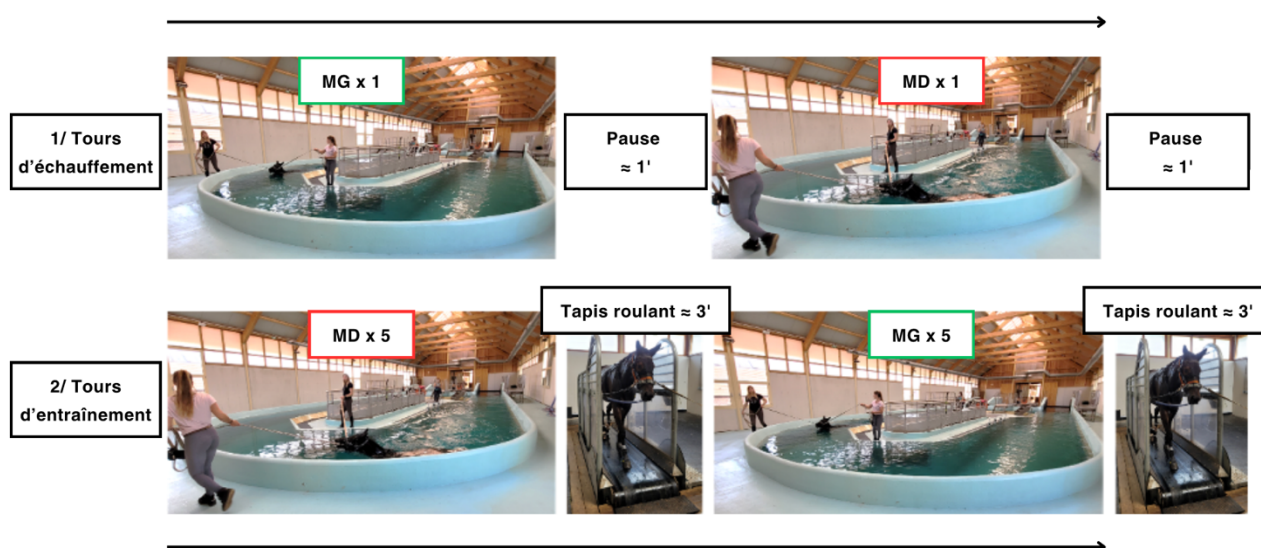
Numéro d'identification du cheval	Age (années)	Genre (Jument / Hongre)	Taille (cm)	Race
#01	11	J	164	Cheval de selle
#02	14	J	160	Cheval de selle
#03	12	H	148	Poney français de selle
#06	11	H	166	Cheval de selle
#08	11	H	166	Cheval de selle
#09	12	H	170	Cheval de selle
#11	14	H	166	Cheval de selle
#12	12	H	170	Cheval de selle
#13	10	H	177	Cheval de selle
#14	9	H	177	Cheval de selle
#15	8	J	166	Cheval de selle

Un programme d'entraînement standardisé de douze semaines a été mis en œuvre uniformément pour tous les chevaux. L'entraînement a commencé par une période de 4 semaines d'exercices uniquement terrestres (travail sur le plat et saut) pour standardiser le niveau d'exercice de tous les chevaux au début du protocole. À la cinquième semaine, les chevaux sont passés d'exercices uniquement terrestres à une combinaison d'exercices terrestres et aquatiques, incorporant trois séances de natation par semaine. Une séance de natation consistait en des tours, qui comprenaient l'entrée dans la piscine, la nage dans la piscine en forme de U, et la sortie de la piscine (Figure 14). Après une période d'adaptation de trois semaines (semaines 5 à 7, avec 9 séances de natation), les mesures ont été prises pendant la 8ème semaine d'entraînement. Cette

séance de natation comprenait deux tours d'échauffement avec un à main gauche et un à main droite, suivis de dix tours dans la piscine, cinq tours à main gauche et cinq tours à main droite, entrecoupés d'une pause de marche sur un tapis roulant (Figure 10). Cette structure de séance de natation s'appliquait à tous les chevaux sauf aux chevaux #01 et #02. Après l'échauffement, ces deux chevaux effectuaient trois tours à droite, prenaient une pause sur le tapis roulant, puis complétaient trois tours à gauche, suivis d'une autre pause sur le tapis roulant, et finalement terminaient avec trois tours à droite.

Figure 10 : description de la structure chronologique d'une séance de natation typique

Avec MG = tours à main gauche et MD = tours à main droite



B. Acquisition vidéo, définitions et détection des événements liés à la nage

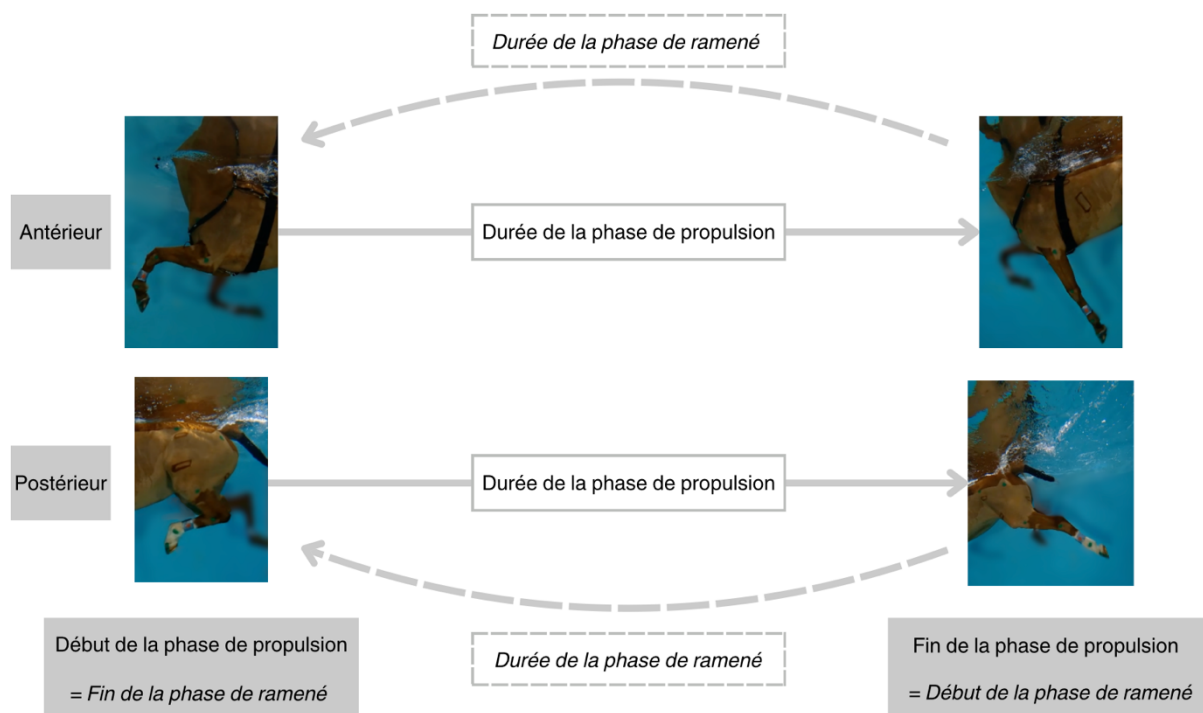
Les enregistrements vidéo sous-marins ont été réalisés à l'aide de 6 caméras GoPro Hero 8 synchronisées (GoPro Inc, San Mateo CA, USA), fonctionnant à 120 images par seconde avec une résolution de 2,7K (Giraudet *et al.*, 2023). Cette configuration offrait un champ de vision de 3 mètres de long permettant la visualisation d'au moins un cycle de nage complet (Figure 11).

Figure 11 : vue assemblée des 6 caméras GoPro pendant un tour à main droite du cheval #06



Le cycle aquatique a été défini par analogie avec la définition terrestre d'une foulée. Il correspondait à un cycle complet de mouvements répétitifs des membres, se terminant lorsque le membre de référence est revenu à sa position de départ. Dans l'environnement aquatique, la phase de propulsion (PP) a été définie comme le mouvement vers l'arrière du membre jusqu'à ce qu'il cesse de se déplacer vers l'arrière. Inversement, la phase de ramenée (PR) correspondait au mouvement vers l'avant du membre jusqu'à ce qu'il cesse de se déplacer vers l'avant. Ainsi, le début de la phase de propulsion marquait la fin de la phase de ramenée, et la fin de la phase de propulsion correspondait au début de la phase de ramenée (Figure 12).

Figure 12 : durée des phases de propulsion (PP) et de ramenée (PR) des membres antérieurs et des membres postérieurs



Ces événements ont été relevés sur la vidéo en se basant sur les angles articulaires formés par les segments visibles les plus proximaux, selon la méthode et les résultats de Moiroud et al. (Moiroud *et al.*, 2024).

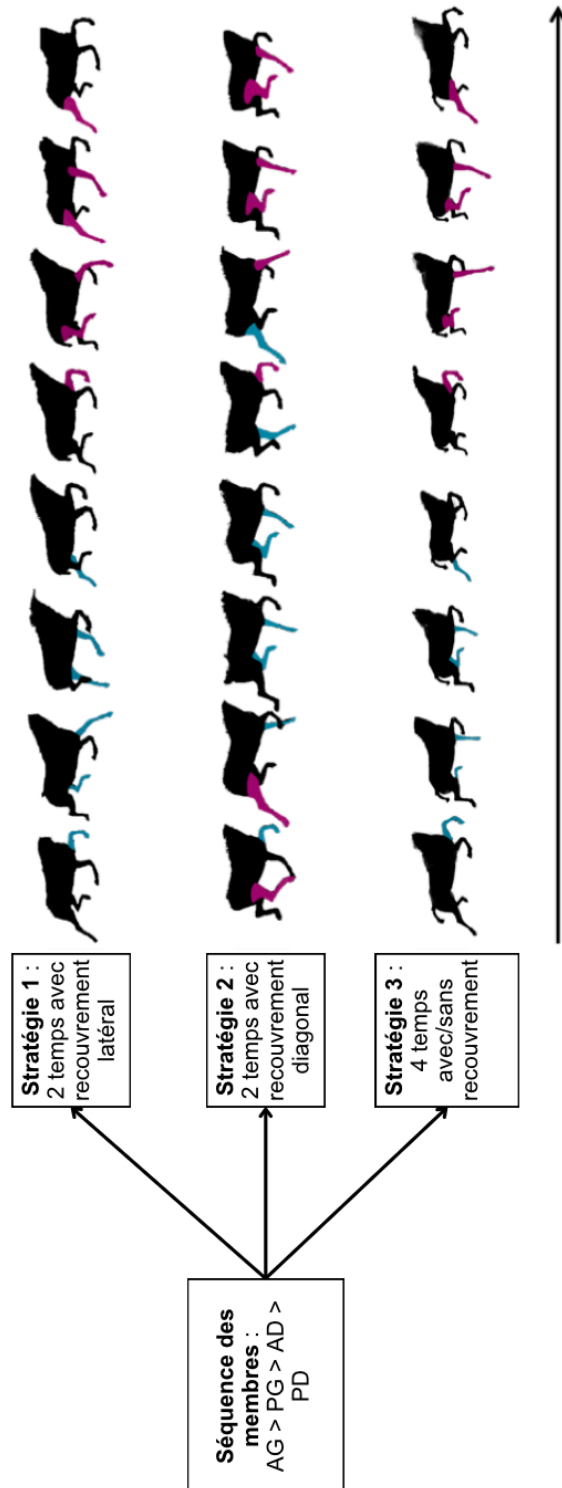
C. Séquence des mouvements des membres pendant la nage et diagramme de coordination

Tout d'abord, une analyse qualitative de la séquence des membres a été effectuée visuellement par deux vétérinaires spécialistes expérimentés en locomotion équine en utilisant les vidéos (Gaulmin *et al.*, 2024). L'analyse des phases de propulsion a permis d'identifier la séquence de nage suivante, qui commence par (1) le membre antérieur gauche, suivi par (2) le membre postérieur gauche, puis (3) le membre antérieur droit, et enfin (4) le membre postérieur droit. De plus, en observant le timing des phases de propulsion, l'équipe vétérinaire a identifié qualitativement trois stratégies de nage différentes (Figure 13). La Stratégie 1 (S1) était une stratégie de nage à deux temps avec recouvrement temporel latéral, caractérisée par l'appariement des phases de propulsion des membres en paires latérales, avant et arrière. Cela a permis d'identifier des

recouvrements entre le membre antérieur gauche et le membre postérieur gauche ainsi qu'entre le membre antérieur droit et le membre postérieur droit. La Stratégie 2 (S2) était une stratégie de nage à deux temps avec recouvrement temporel diagonal, basée sur l'appariement des phases de propulsion des membres en paires diagonales, avant et arrière. Cela a entraîné des recouvrements entre le membre postérieur gauche et le membre antérieur droit ainsi qu'entre le membre postérieur droit et le membre antérieur gauche. Enfin, la Stratégie 3 (S3) était une stratégie de nage à quatre temps, où les mouvements de chaque membre sont exécutés indépendamment de manière séquentielle. Cette stratégie présentait des variations qui étaient perceptibles à l'œil nu, suggérant l'existence potentielle de sous-catégories, bien que celles-ci soient difficiles à distinguer clairement par la seule observation visuelle.

Figure 13 : identification des différentes stratégies de nage, commençant par la phase de propulsion du membre antérieur gauche

(AG = membre antérieur gauche ; PG = membre postérieur gauche ; AD = membre antérieur droit ; PD = membre postérieur droit). Les membres sont colorés lorsqu'ils sont en phase de propulsion, en bleu pour les membres gauches et en rose pour les membres droits.

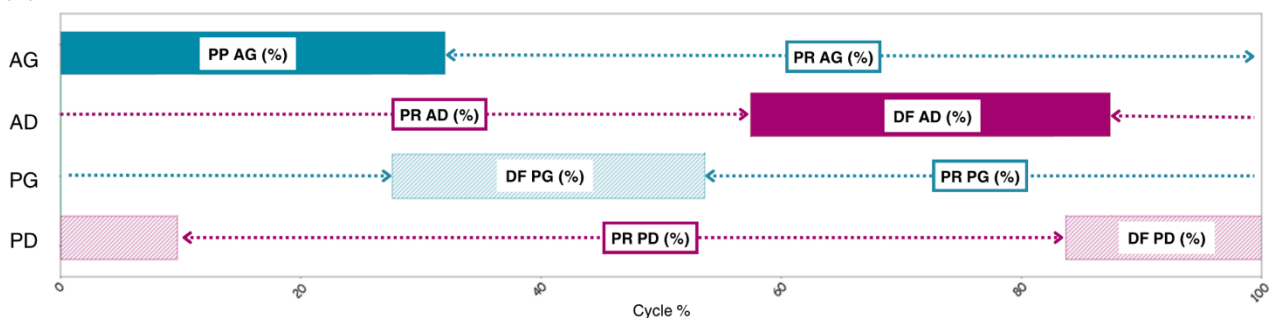


Deuxièmement, une analyse quantitative a été effectuée comme suit. En utilisant les données vidéo marquées pour les timings de propulsion et de ramené de chaque membre, un diagramme de coordination a été généré, représentant le pourcentage de chaque phase du cycle de nage (Figure 14.a).

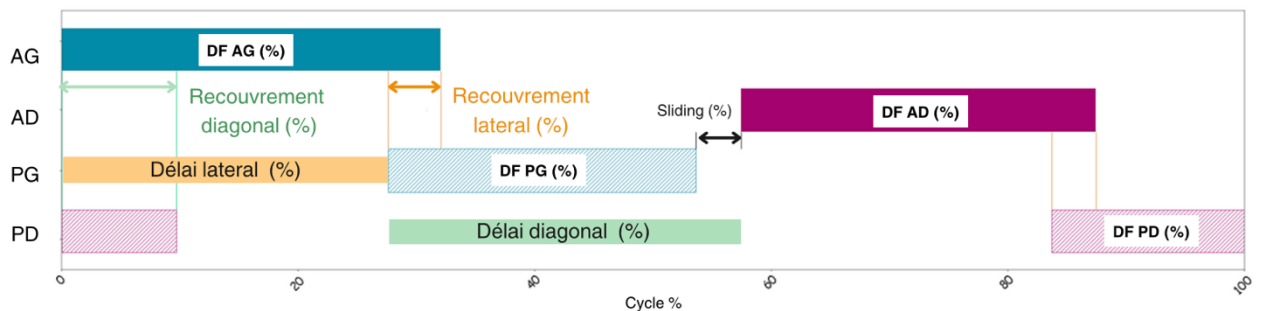
Figure 14. : (a) exemple (cheval#02, tour #02) de la séquence de coordination pendant le cycle de nage (b) définition des paramètres quantitatifs exprimés en pourcentage de la durée du cycle

Avec AG = membre antérieur gauche ; PG = membre postérieur gauche ; AD = membre antérieur droit ; PD = membre postérieur droit. La phase de propulsion (PP) est représentée par les sections colorées, tandis que la phase de ramenée (PR) est laissée vide pour chaque membre (indiquée par les flèches). Duty factor (DF), recouvrements diagonaux, recouvrements latéraux, délai diagonal, délai latéral.

(a).



(b).



À partir de ces diagrammes, des paramètres quantitatifs ont été définis comme suit (Figure 14.b) :

- **Duty factor (DF)** : ce paramètre exprime la durée de la phase de propulsion pour un membre spécifié en pourcentage de la durée totale du cycle (T_{cycle}). Il est calculé comme $DF = \frac{PP}{T_{cycle}}$, où PP est la phase de propulsion. Les duty factors pour les membres individuels sont notés DF AG pour le membre antérieur gauche, DF AD pour le membre antérieur droit, DF PG pour le membre postérieur gauche, et DF PD pour le membre postérieur droit. DF Antérieur est défini comme la moyenne de DF AG et DF AD, tandis que DF Postérieur est la moyenne de DF PG et DF PD.
- **Recouvrement (OL)** : le recouvrement a été défini comme le pourcentage du cycle pendant lequel deux membres spécifiés sont simultanément en phase de propulsion. Le

recouvrement latéral (latOL) examine deux membres antérieurs et postérieurs ipsilatéraux, avec latOLgauche pour les membres gauches et latOLdroit pour les membres droits. Le recouvrement diagonal (DiagOL) examine deux membres antérieurs et postérieurs diagonaux, avec DiagOLgauche pour le gauche et DiagOLdroit pour le droit.

- **Phase de glissement (SL)** : cette phase (exprimée en pourcentage de la durée du cycle) a été définie lorsque la propulsion de deux membres consécutifs dans la séquence ne se recouvre pas. Le glissement latéral (latSL) examine deux membres antérieurs et postérieurs ipsilatéraux (latSLgauche pour les membres gauches et latSLdroit pour les membres droits), tandis que le glissement diagonal (DiagSL) examine deux membres antérieurs et postérieurs diagonaux (DiagSLgauche pour le gauche et DiagSLdroit pour le droit). À des fins de calcul, une phase de glissement positive sera considérée comme un recouvrement négatif. Par exemple, lorsque latSLgauche > 0, latOLgauche = -latSLgauche.
- **Délai (DL)** : le délai a été défini comme le pourcentage du cycle écoulé entre le début de la propulsion d'un membre spécifié et le début de la propulsion d'un second membre spécifié. Le délai diagonal (DiagDL) mesure le délai entre une paire diagonale (DiagDLgauche pour la diagonale gauche et DiagDLdroit pour la diagonale droite). Le délai latéral mesure le délai entre deux membres ipsilatéraux (LatDLgauche pour le côté gauche et LatDLdroit pour le côté droit). Le délai controlatéral mesure le délai entre deux membres antérieurs ou postérieurs controlatéraux (CoLatDLavant pour les membres antérieurs et CoLatDLarrière pour les membres postérieurs). Le délai latéral moyen (MoyenneLatDL) est alors défini comme la moyenne de LatDLgauche et LatDLdroit, et le délai diagonal moyen (MoyenneDiagDL) est la moyenne de DiagDLgauche et DiagDLdroit.

Des paramètres composites supplémentaires α et β ont été calculés comme suit :

$$\alpha = \frac{\text{MoyenneLatDL}}{DF_{\text{Antérieur}}} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\beta = \frac{\text{MoyenneDiagDL}}{DF_{\text{Postérieur}}} \quad (\text{Eq. 2})$$

Le ratio latéral α (Éq. 1) évalue le pourcentage relatif de délai d'un membre postérieur par rapport au membre antérieur latéral correspondant. À mesure que α diminue, la synchronisation entre le membre antérieur et le membre postérieur du même côté (AD-PD ou AG-PG) augmente. Le ratio diagonal β (Éq. 2) mesure le pourcentage relatif de délai entre un membre antérieur et le membre postérieur diagonal correspondant. De même, à mesure que β diminue, la synchronisation entre les membres sur la même diagonale (PG-AD ou PD-AG) augmente.

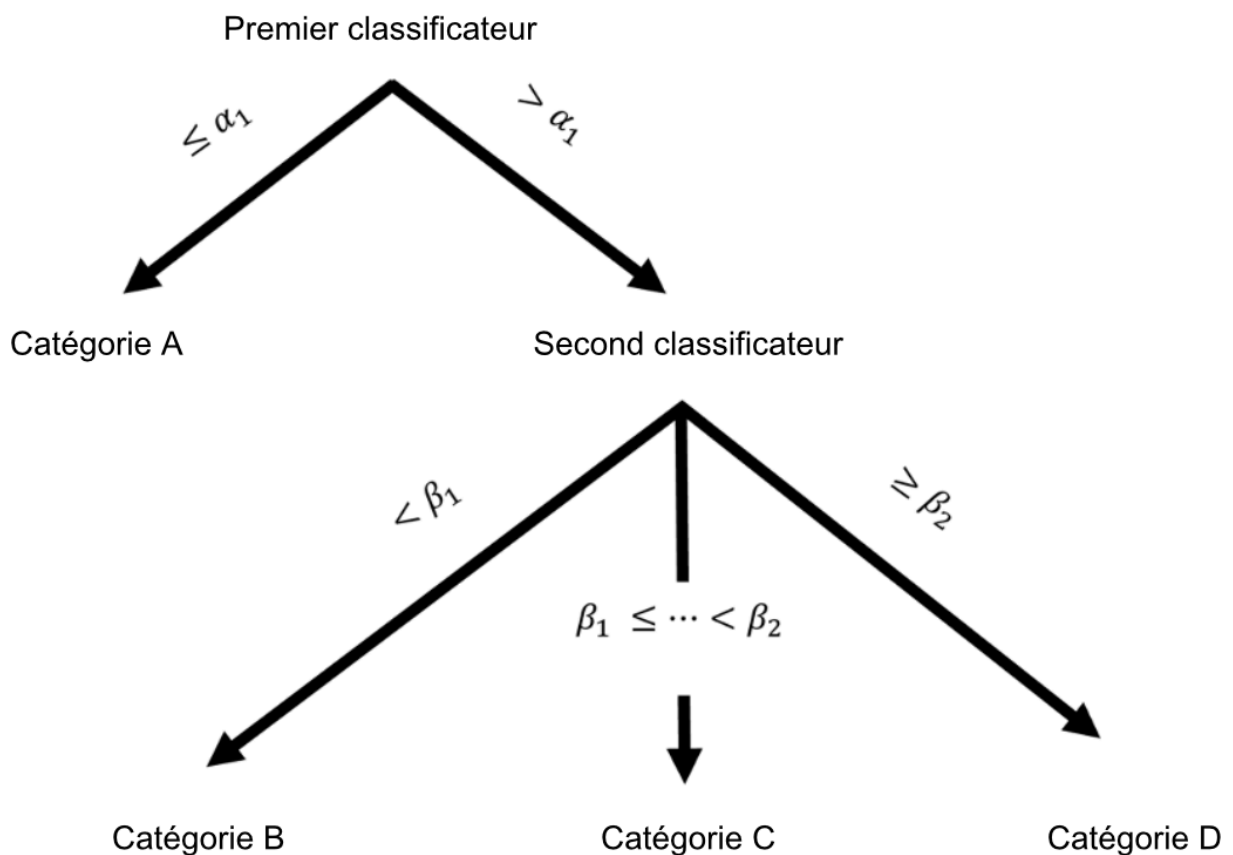
Pour valider le pouvoir de discrimination des paramètres composites, une classification a été réalisée par un clustering en deux étapes utilisant k-means dans Python (bibliothèque scikit-learn, Python Software Foundation, Beaverton OR, USA) (Figure 15). Avec un nombre de clusters fixé à 2, le premier classificateur a séparé les valeurs élevées des valeurs faibles de α pour distinguer les tours avec un faible ratio latéral des autres par un seuil α_1 et isoler une catégorie A (CatA) lorsque $\alpha \leq \alpha_1$. Avec le nombre de clusters fixé à 3, le second classificateur a séparé 3 autres catégories selon le ratio diagonal β par la détermination de deux seuils β_1 et β_2 . La catégorie B (CatB) est identifiée lorsque $\beta < \beta_1$, la catégorie C (CatC) lorsque $\beta_1 \leq \beta < \beta_2$ et la catégorie D (CatD) lorsque $\beta_2 \leq \beta$. À la fin du processus de classification, quatre catégories (A à D) ont été obtenues, alors que seules trois stratégies avaient été identifiées par les vétérinaires. La quatrième catégorie a été

introduite pour tenir compte d'au moins deux sous-catégories, reflétant l'observation qualitative que la stratégie à quatre temps (S3) montre des variations.

La correspondance entre les stratégies identifiées par les vétérinaires et les catégories dérivées de la procédure de classification a été évaluée à l'aide d'une matrice de confusion et des métriques associées classiques. La précision globale (le nombre de tours correctement classés sur le nombre total de tours) a ensuite été rapportée pour le classificateur à deux étapes. Le principe des classificateurs par catégorie (Sokolova et Lapalme, 2009) sera utilisé pour donner un aperçu des résultats du classificateur à deux étapes pour chaque catégorie. Pour chaque classificateur par catégorie, la précision (en considérant une catégorie Cat, la précision est le nombre de tours correctement étiquetés divisé par le nombre de tours étiquetés comme Cat par le classificateur à deux étapes, $précision = \frac{\text{nombre de tours dans Cat étiquetés comme Cat}}{\text{nombre de tours étiquetés comme Cat}}$, le rappel (le rappel est le nombre de tours correctement étiquetés divisé par le nombre de tours réellement dans la catégorie considérée, $rappel = \frac{\text{nombre de tours dans Cat étiquetés comme Cat}}{\text{nombre de tours dans Cat}}$ et le score F1 (la moyenne harmonique de la précision et du rappel, $score - F1 = 2 \frac{précision*rappel}{précision+rappel}$) ont été calculés.

Figure 15 : description de l'algorithme utilisé pour classer les stratégies de nage

Le premier classificateur fournit le seuil α_1 qui sépare CatA des autres catégories. Le second classificateur sépare les trois catégories restantes : CatB, CatC et CatD, en utilisant les seuils β_1 et β_2 .



Enfin, les valeurs des paramètres quantitatifs ont été présentées pour chaque catégorie. En raison des distributions variées de nos données et des tailles d'échantillons différentes entre les catégories (allant d'un nombre à son double), nous avons choisi d'effectuer des tests de permutation sur chaque paramètre avec toutes les paires de catégories afin d'analyser statistiquement la différence des paramètres spatio-temporels au sein des catégories (le nombre de permutations est fixé à 10 000 tandis que la valeur p est de 0,001).

3. Résultats

A. Stratégies de nage identifiées visuellement par des vétérinaires experts

Les résultats de l'identification des différentes stratégies de nage par les vétérinaires sont compilés dans le Tableau 8.

Tableau 8 : nombre et pourcentage de tours identifiés comme appartenant à l'une des trois stratégies de nage identifiées visuellement par des vétérinaires experts, pour chaque cheval individuellement (lignes 1 à 11) et pour tous les chevaux combinés (dernière ligne)

MG correspond aux tours effectués à gauche, et **MD** correspond aux tours effectués à droite.

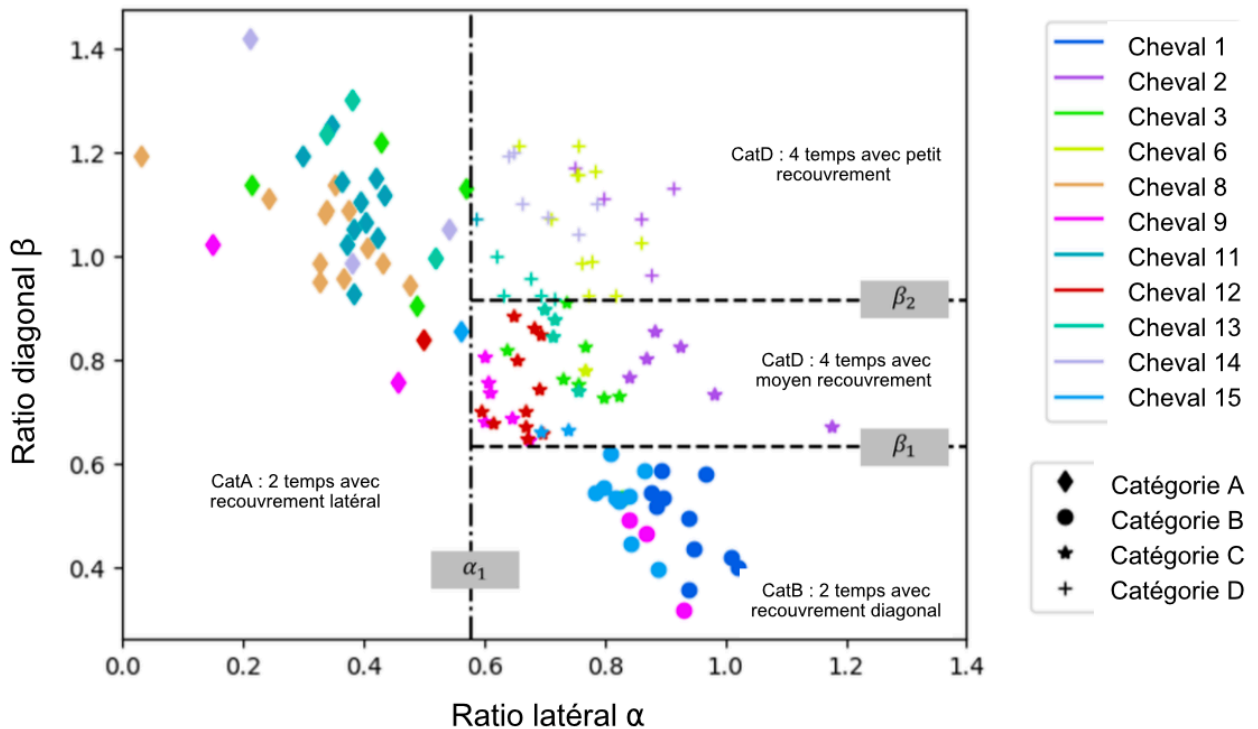
Identification du cheval	Nombre total de passage analysé	Stratégie S1	Stratégie S2	Stratégie S3	Stratégie dominante
#01	10	0	MG : 4 (40 %) <i>MD : 6 (60 %)</i>	0	S2 (100%)
#02	11	0	0	MG : 4 (36 %) <i>MD : 7 (64 %)</i>	S3 (100%)
#03	12	<i>MD : 5 (42 %)</i>	0	6 (50 %) <i>MD : 1 (8 %)</i>	S3 (58%)
#06	12	0	0	MG : 6 (50 %) <i>MD : 6 (50 %)</i>	S3 (100%)
#08	12	MG : 6 (50 %) <i>MD : 6 (50 %)</i>	0	0	S1 (100%)
#09	11	MG : 3 (27 %) <i>MD : 2 (18 %)</i>	<i>MD : 2 (18 %)</i>	MG : 2 (18 %) <i>MD : 2 (18 %)</i>	S1 (45%)
#11	12	MG : 6 (50 %) <i>MD : 6 (50 %)</i>	0	0	S1 (100%)
#12	12	<i>MD : 1 (8 %)</i>	0	MG : 6 (50 %) <i>MD : 5 (42 %)</i>	S3 (92%)
#13	12	MG : 1 (8 %) <i>MD : 2 (17 %)</i>	0	MG : 5 (42 %) <i>MD : 4 (33 %)</i>	S3 (75%)
#14	9	MG : 1 (11 %) <i>MD : 2 (22 %)</i>	0	MG : 5 (56 %) <i>MD : 1 (11 %)</i>	S3 (67%)
#15	12	MG : 1 (8 %)	MG : 2 (17 %) <i>MD : 6 (50 %)</i>	MG : 3 (25 %)	S2 (67%)
Total	125	MG : 18 (14 %) <i>MD : 24 (19 %)</i>	MG : 6 (5 %) <i>MD : 14 (11 %)</i>	MG : 37 (30 %) <i>MD : 26 (21 %)</i>	S3 (51%)

B. Classification en catégories à l'aide du classificateur à deux étapes et des seuils de référence

Le regroupement dans le plan (α, β) effectué par le classificateur à deux étapes a permis l'identification des quatre catégories {CatA, CatB, CatC, CatD} (Figure 16). Ce regroupement nous a permis de définir les valeurs des trois seuils. Le seuil $\alpha_1 = 0,58$ du ratio latéral a séparé CatA des trois autres, tandis que les valeurs du ratio diagonal $\beta_1 = 0,63$ et $\beta_2 = 0,91$ ont divisé la partie droite du plan pour ségréguer CatB, CatC et CatD.

Figure 16 : résultats de l'algorithme du classificateur à deux étapes : 4 catégories ont été identifiées par l'algorithme k-means

Une couleur = un cheval et un symbole = une catégorie, avec le seuil α_1 séparant CatA des 3 autres et β_1 et β_2 séparant CatB, CatC et CatD.



Les résultats de l'identification des différentes catégories de nage par le classificateur à deux étapes sont compilés dans le Tableau 9.

Tableau 9 : nombre et pourcentage de tours identifiés comme appartenant à l'une des quatre catégories de nage identifiées par le classificateur à deux étapes, pour chaque cheval individuellement (lignes 1 à 11) et pour tous les chevaux combinés (dernière ligne).

MG correspond aux tours effectués à gauche, et **MD** correspond aux tours effectués à droite.

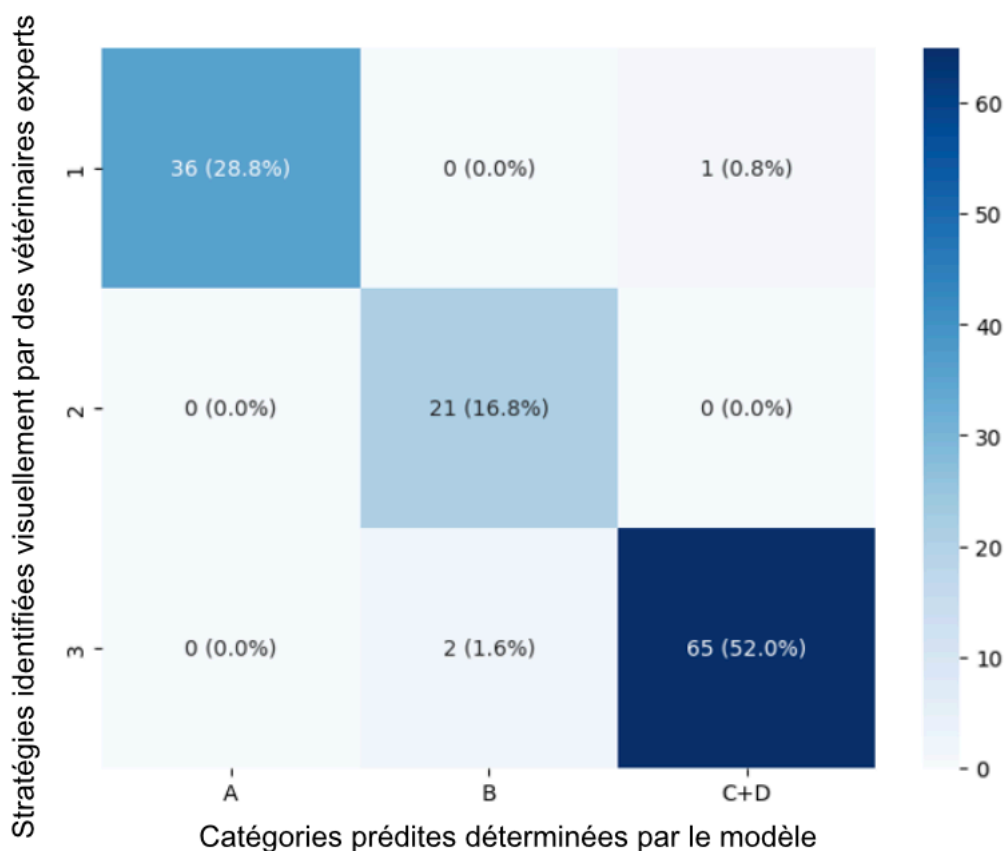
Identification du cheval	Nombre total de tour analysé	Catégorie A	Catégorie B	Catégorie C	Catégorie D	Catégorie dominante
#01	10	0	MG : 4 (40 %) <i>MD : 6 (60 %)</i>	0	0	catB (100 %)
#02	11	0	0	MG : 2 (18 %) <i>MD : 4 (37 %)</i>	MG : 2 (18 %) <i>MD : 3 (27 %)</i>	catC (55 %)
#03	12	<i>MD : 5 (42 %)</i>	0	MG : 5 (42 %) <i>MD : 1 (8 %)</i>	MG : 1 (8 %)	catC (50 %)
#06	12	0	0	MG : 1 (8 %) <i>MD : 4 (33 %)</i>	MG : 5 (42 %) <i>MD : 2 (17 %)</i>	catD (59 %)
#08	11	MG : 7 (58 %) <i>MD : 5 (42 %)</i>	0	0	0	catA (100 %)
#09	11	MG : 2 (18 %) <i>MD : 1 (10 %)</i>	<i>MD : 3 (27 %)</i>	MG : 3 (27 %) <i>MD : 2 (18 %)</i>	0	catC (45 %)
#11	12	MG : 6 (50 %) <i>6 (50 %)</i>	0	0	0	catA (100 %)
#12	12	<i>MD : 1 (8 %)</i>	0	MG : 6 (50 %) <i>MD : 5 (42 %)</i>	0	catC (92 %)
#13	12	MG : 2 (17 %) <i>MD : 2 (17 %)</i>	0	MG : 4 (33 %) <i>MD : 4 (33 %)</i>	0	catC (66 %)
#14	9	MG : 1 (11 %) <i>MD : 2 (22 %)</i>	0	0	MG : 5 (56 %) <i>MD : 1 (11 %)</i>	catD (67 %)
#15	12	MG : 1 (8 %)	MG : 3 (25 %) <i>MD : 6 (50 %)</i>	MG : 2 (17 %)	0	catB (75 %)
Total	124	MG : 19 (15,2 %) <i>MD : 22 (17,6 %)</i>	MG : 7 (5,6 %) <i>MD : 15 (12,0 %)</i>	MG : 23 (18,4 %) <i>MD : 20 (16,0 %)</i>	MG : 13 (10,4 %) <i>MD : 6 (4,8 %)</i>	

C. Comparaison entre la segmentation basée sur l'observation visuelle (stratégies) et la segmentation basée sur l'ordinateur (catégories) des tours de nage

La matrice de confusion entre les catégories de classification basées sur le regroupement dans le plan (α , β) et les stratégies identifiées visuellement est présentée dans la Figure 17.

Figure 17 : Matrice de confusion entre les stratégies identifiées visuellement par les vétérinaires experts et les catégories déterminées par les classificateurs à deux étapes pour tous les tours considérés

(le pourcentage est relatif au nombre total de tours)



La matrice de confusion a donné une précision globale de 96,8 % et les résultats par catégorie sont présentés dans le Tableau 10. La précision était supérieure à 0,91 pour toutes les catégories, avec le plus grand nombre de faux positifs pour CatB (2 tours de S3 ont été mal étiquetés comme CatB par le classificateur à deux étapes). Le rappel était supérieur à 0,96 pour toutes les catégories, avec le plus grand nombre de faux négatifs pour CatC+D (3 tours de S3 ont été mal étiquetés, 1 dans CatA et 2 dans CatB) et le meilleur cas pour CatB. Enfin, le score F1 était supérieur à 0,95 pour toutes les catégories. L'analyse des données a permis de montrer la correspondance entre les stratégies identifiées visuellement et les catégories classées par l'algorithme. Ces résultats nous ont ensuite permis de déduire que la catégorie CatA correspondait à la stratégie S1 (deux temps avec principalement un recouvrement latéral), la catégorie CatB à la stratégie S2 (deux temps avec principalement un recouvrement diagonal), et les catégories CatC et CatD correspondaient à

différentes variations de la stratégie S3 (quatre temps), avec CatC étant quatre temps distincts avec un pourcentage moyen de recouvrement et CatD étant quatre temps distincts avec un faible pourcentage de recouvrement.

Tableau 10 : résultats des métriques par catégorie

Catégories	Précision	Rappel	F1-score	Support (nombre de tours)
A	0.97	0.97	0.97	37
B	0.91	1.00	0.95	21
C+D	0.98	0.96	0.97	67

D. Description et exemples de graphiques de coordination pour chaque catégorie.

Dans le plan (α , β), le seuil $\alpha_1 = 0,58$ sépare la nage à deux temps latérale identifiée par les vétérinaires comme stratégie S1 des autres stratégies. En dessous de ce seuil α_1 , le cheval était latéralisé : le mouvement de propulsion du membre postérieur commençait près du mouvement de propulsion du membre antérieur du même côté (Figure 18.a).

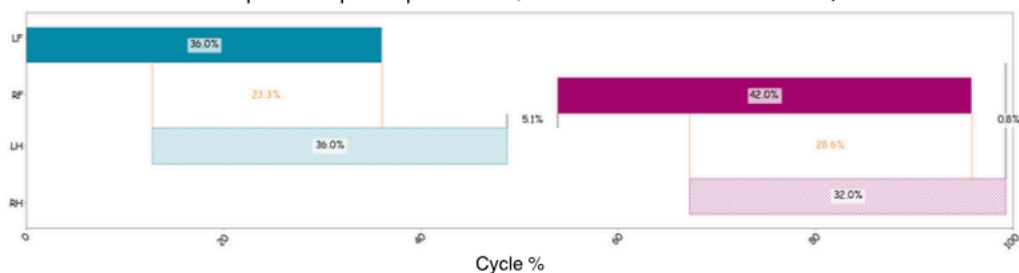
Le seuil $\beta_1 = 0,63$ sépare, parmi les autres stratégies, le schéma de coordination à deux temps diagonal identifié par les vétérinaires comme S2 de ceux à quatre temps (S3). En dessous de ce seuil, le cheval était diagonalisé : le mouvement de propulsion du membre antérieur commençait près du mouvement de propulsion du membre postérieur situé en diagonale (Figure 18.b).

Le seuil $\beta_2 = 0,91$ sépare les schémas de coordination à quatre temps identifiés par les vétérinaires comme stratégie S3 entre eux. Si le cheval se situait entre les seuils β_1 et β_2 , il nageait avec quatre temps distincts avec un pourcentage moyen de recouvrement (Figure 18.c). Au-dessus de ce seuil, le cheval nageait avec quatre temps distincts et un faible pourcentage de recouvrement (Figure 18.d). Dans ce dernier cas, le cheval avait un schéma de coordination intermédiaire, qui n'était ni vraiment latéralisé ni vraiment diagonalisé, mais il nageait avec quatre temps distincts avec différents pourcentages de recouvrement : le mouvement de propulsion du membre antérieur commençait plus ou moins loin du mouvement de propulsion du membre postérieur. Cela créerait à la fois des recouvrements latéraux et diagonaux, mais dans des proportions équivalentes.

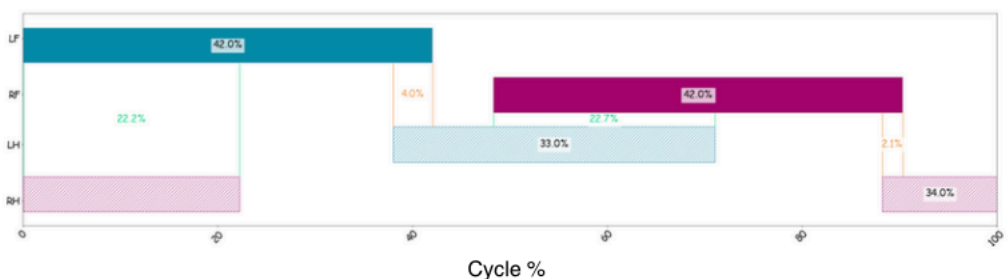
Figure 18 : correspondance entre les catégories A, B, C et D et les stratégies S1, S2 et S3.

- a. Exemple du cheval #08, quatrième tour à main droite : correspondance entre la catégorie A et la stratégie S1 (deux temps avec principalement un recouvrement latéral)
- b. Exemple du cheval #01, neuvième tour à main droite : correspondance entre la stratégie S2 et la catégorie B (deux temps avec principalement un chevauchement diagonal)
- c. Exemple du cheval #12, sixième tour à main droite : correspondance entre la stratégie S3 et la catégorie C (quatre temps avec chevauchement moyen)
- d. Exemple du cheval #02, quatrième tour à droite : correspondance entre la stratégie S3 et la catégorie D (quatre temps avec faible chevauchement)

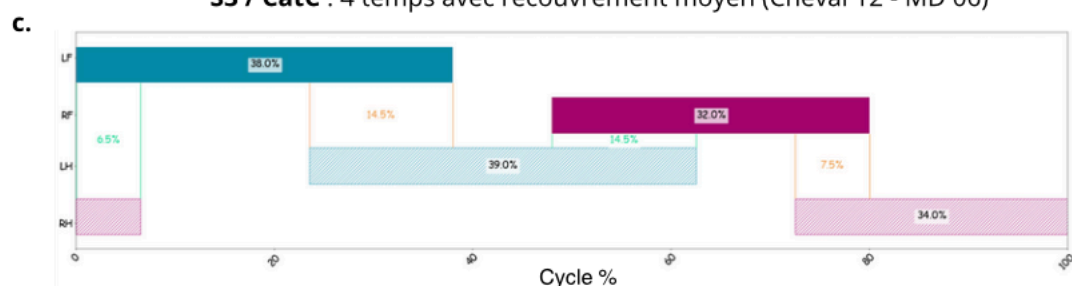
a. S1 / CatA : 2 temps avec principalement, du recouvrement latéral (Cheval 08 - MD 04)



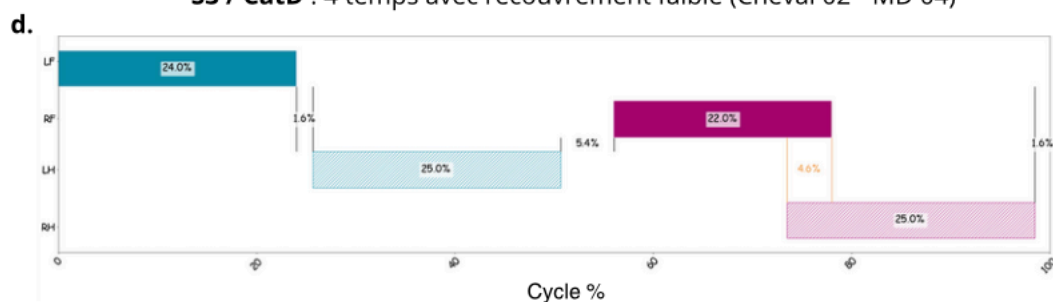
b. S2 / CatB : 2 temps avec principalement du recouvrement diagonal (Cheval 01 - MD 09)



S3 / CatC : 4 temps avec recouvrement moyen (Cheval 12 - MD 06)



S3 / CatD : 4 temps avec recouvrement faible (Cheval 02 - MD 04)



E. Variabilité inter- et intra-individuelle des schémas de nage

Sur les 125 tours, 49,6 % ont été effectués en utilisant une catégorie de nage à quatre temps et 50,4 % en utilisant une catégorie de nage à deux temps. Une catégorie à deux temps latérale (catA) a été observée dans 32,8 % des tours enregistrés, une catégorie à deux temps diagonale (catB) a été observée dans 17,6 % des tours enregistrés, une catégorie à quatre temps avec un pourcentage de recouvrement moyen (catC) a été observée dans 34,4 % des tours enregistrés et une catégorie à quatre temps avec un faible pourcentage de recouvrement (catD) a été observée dans 15,2 % des tours enregistrés. 49,6 % des tours ont été effectués à gauche et 50,4 % à droite. Parmi les tours à gauche, 28,8 % ont été effectués en utilisant une catégorie à quatre temps et 20,8 % en utilisant une catégorie à deux temps (15,2 % observés dans catA et 5,6 % observés dans catB). Quant aux tours à droite, 20,8 % ont été effectués en utilisant une catégorie à quatre temps et 29,6 % en utilisant une catégorie à deux temps (17,6 % observés dans catA et 12,0 % observés dans catB).

Cinq chevaux ont maintenu la même stratégie tout au long des tours : les chevaux #08 et #11 ont utilisé une catégorie à deux temps latérale (catA), le cheval #01 a adopté une catégorie à deux temps diagonale (catB), tandis que les chevaux #02 et #06 ont employé une catégorie à quatre temps. Six chevaux ont changé de catégorie entre les tours. Ces chevaux ont utilisé différentes combinaisons de catégories, une combinaison de quatre temps et de deux temps latéraux pour les chevaux #03, #12, #13 et #14, ainsi qu'une combinaison de trois catégories pour les chevaux #09 et #15 avec une proportion différente d'utilisation des catégories. Pour les chevaux employant deux catégories, la catégorie dominante était identique et correspondait à une catégorie à quatre temps. Cependant, pour les chevaux employant trois catégories, la catégorie dominante était différente et correspondait à une catégorie à quatre temps pour le cheval #09 et à une catégorie à deux temps avec chevauchement diagonal (catB) pour le cheval #15.

Les résultats intra-individuels présentés dans l'Annexe 1 ont montré que 4 chevaux ont changé de catégorie après une pause, spécifiquement les chevaux #03, #06, #11 et #13. Quatre chevaux ont également changé de catégorie après une session sur tapis roulant et un changement de direction, spécifiquement les chevaux #02, #03, #09 et #13. L'analyse des variations de séquence pour le même cheval au cours de la même session a également montré que 5 chevaux avaient tendance à changer de catégorie à la fin de la session, spécifiquement les chevaux #03, #09, #13 et #15. Enfin, les chevaux qui avaient une catégorie constante s'échauffaient généralement en utilisant la même catégorie, comme les chevaux #01 et #08. Les chevaux qui utilisaient plusieurs catégories avaient également tendance à favoriser pendant l'échauffement les catégories qu'ils utiliseraient principalement pendant la nage, selon le côté, comme le cheval #15.

F. Paramètres spatio-temporels

Les résultats pour les paramètres spatio-temporels définis dans la Section 2.C (Figure 14.b) en relation avec les catégories sont présentés dans la Figure 19, tandis que leurs moyennes et écarts-types ainsi que les résultats de l'analyse statistique sont compilés dans le Tableau 11. La plage des duty factors pour les membres antérieurs et postérieurs était similaire pour CatA, CatB et CatC, mais significativement différente ($p < 0,001$) pour CatD, avec un duty factor réduit pour cette catégorie (4 temps avec peu de recouvrement). Le délai latéral et le recouvrement diagonal présentaient des différences entre CatB et CatC, CatB et CatD, et CatC et CatD, tandis que le délai diagonal et le recouvrement latéral étaient significativement différents pour CatA par rapport aux

trois autres catégories, avec, comme prévu, un recouvrement latéral plus élevé pour CatA (2 temps latéraux) et un recouvrement diagonal plus élevé pour CatB (2 temps diagonaux). La Figure 19 et le Tableau 11 illustrent qu'aucun paramètre unique ne montre des différences significatives entre toutes les paires de catégories.

Figure 19 : boîtes à moustaches des différents paramètres (en %) issus du graphique de coordination pour les quatre catégories (CatA - vert, CatB - jaune, CatC - violet et CatD - rouge)

a. le duty factor du membre antérieur gauche, b. le duty factor du membre antérieur droit, c. le duty factor du membre postérieur gauche, d. le duty factor du membre postérieur droit, e. le délai latéral gauche, f. le délai latéral droit, g. le délai diagonal gauche, h. le délai diagonal droit ; i. le recouvrement latéral gauche, j. le recouvrement latéral droit, k. le recouvrement diagonal gauche et l. le recouvrement diagonal droit. Les valeurs en Y sont comprises entre 20% et 55% pour les panneaux (a) à (d), entre -10% et 50% pour les panneaux (e) à (h) et entre -25% et 45% pour les panneaux (i) à (l). Deux boîtes à moustaches reliées par un pont et un symbole * ont des moyennes statistiquement différentes ($p < 0,001$).

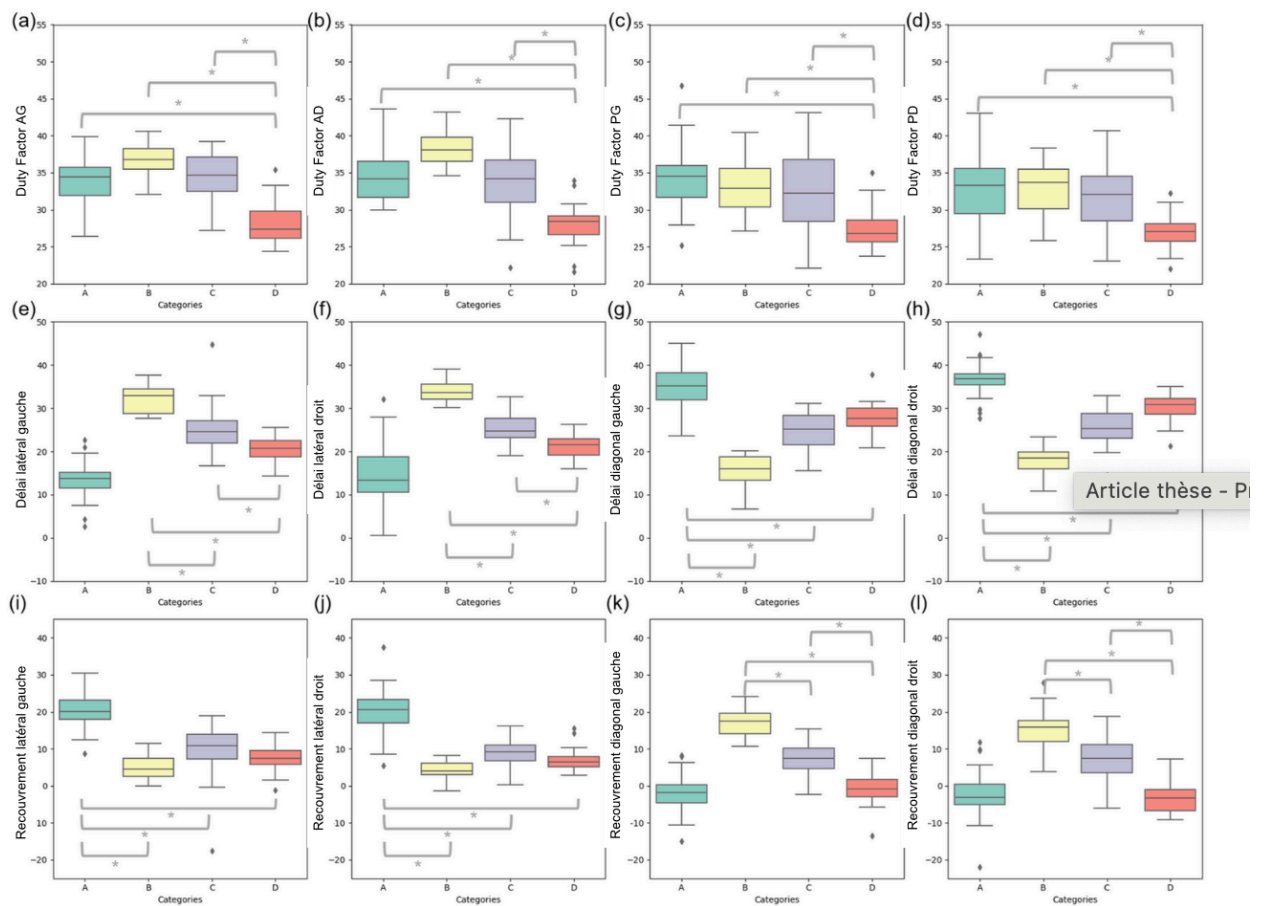


Tableau 11 : Moyenne et écart-type des paramètres quantitatifs par rapport aux catégories A à D.

La différence significative est indiquée par le nombre entre parenthèses suivant le nom du paramètre. Couples de catégories qui sont significativement différents (avec une valeur $p < 0,001$) pour le paramètre considéré : (1) Cat A & CatD, CatB & CatD, CatC & CatD, (2) CatB & CatC, CatB & CatD, CatC & CatD, (3) CatA & CatB, CatA & CatC, CatA & CatD.

	CatA		CatB		CatC		CatD	
	Gauche	Droit	Gauche	Droit	Gauche	Droit	Gauche	Droit
Duty factor antérieur (1)	33,6 +/- 3,3 %	34,6 +/- 3,2 %	36,9 +/- 2,2 %	38,2 +/- 2,3 %	34,6 +/- 2,9 %	33,9 +/- 4,5 %	28,2 +/- 2,8 %	28,0 +/- 2,7 %
Duty factor postérieur (1)	34,3 +/- 3,9 %	33,2 +/- 4,5 %	33,5 +/- 3,7 %	33,0 +/- 3,5 %	32,6 +/- 5,2 %	31,9 +/- 4,2 %	27,4 +/- 2,7 %	27,1 +/- 2,3 %
Délai latéral (2)	13,4 +/- 4,0 %	14,8 +/- 6,5 %	32,2 +/- 3,2 %	34,2 +/- 2,4 %	24,8 +/- 5,2 %	25,4 +/- 3,3 %	20,6 +/- 2,9 %	21,1 +/- 2,6 %
Délai diagonal (3)	35,0 +/- 4,5 %	36,8 +/- 3,7 %	15,8 +/- 3,4 %	17,8 +/- 3,3 %	24,6 +/- 4,4 %	25,3 +/- 4,4 %	27,9 +/- 3,3 %	30,4 +/- 3,2 %
Recouvrement latéral (3)	20,2 +/- 4,6 %	19,9 +/- 6,1 %	4,7 +/- 3,1 %	4,0 +/- 2,6 %	9,8 +/- 6,9 %	8,6 +/- 3,3 %	7,6 +/- 3,5 %	7,0 +/- 3,0 %
Recouvrement diagonal (2)	-1,8 +/- 5,4 %	-2,4 +/- 6,0 %	17,2 +/- 3,5 %	15,7 +/- 5,3 %	7,3 +/- 4,2 %	7,3 +/- 6,4 %	-0,8 +/- 4,1 %	-3,0 +/- 4,5 %

4. Discussion

Tous les chevaux de notre population étudiée suivent la même séquence de propulsion des membres : en commençant par le membre antérieur gauche, le prochain membre propulsif est le membre postérieur gauche, puis le membre antérieur droit, et enfin le membre postérieur droit. Cependant, cette étude démontre que le timing de ces mouvements diffère, avec des degrés variables de recouvrement entre ces membres. Les vétérinaires ont identifié 3 schémas de coordination temporelle : la stratégie S1 comme une stratégie à deux temps latérale caractérisée par l'appariement des membres en paires latérales avant-arrière, la stratégie S2 comme une stratégie à deux temps diagonale caractérisée par l'appariement des membres en paires diagonales avant-arrière, et la stratégie S3 comme une stratégie à quatre temps caractérisée par la désynchronisation de chaque membre. Qualitativement, pour les stratégies à 2 temps (stratégies S1 et S2), il a été supposé que le délai (latéral ou diagonal) devrait être petit par rapport aux duty factor (avant ou arrière), ce qui signifie que les paires de membres (latérales ou diagonales) seront synchronisées, résultant en de grands recouvrements (latéraux ou diagonaux). Dans la stratégie S3, les 4 temps sont réguliers et décomposés, donc le délai devrait être grand par rapport aux duty factor, résultant en des recouvrements relativement petits. En utilisant des indices (α et β) reflétant le rapport entre ces délais et le duty factor, il a donc été supposé que ces différentes stratégies pourraient être automatiquement classées. Le regroupement effectué par l'algorithme d'apprentissage automatique avec les paramètres quantitatifs dans le plan (α , β) confirme et affine

la classification visuelle établie par les vétérinaires. Cette approche permet le calcul de seuils, permettant de classer les tours de chaque cheval dans l'une des trois stratégies. Pour la stratégie à quatre temps, deux sous-catégories ont été identifiées : une avec un faible pourcentage de recouvrement et une autre avec un pourcentage moyen de recouvrement. Au cours des 12 tours effectués par chaque cheval, cinq chevaux ont maintenu la même stratégie, tandis que six autres ont changé de stratégie au fil du temps, démontrant une variabilité interindividuelle. Ces derniers ont utilisé deux ou trois schémas de nage différents, démontrant une variabilité intra-individuelle. Sur la base de leurs observations, Grossi et al. (Grossi *et al.*, 2024) identifient également trois styles de nage. Cependant, les noms et les catégories qu'ils ont décrits diffèrent de ceux de la présente étude. La description utilisée par Grossi et al. (Grossi *et al.*, 2024) pour les trois principaux styles permet d'associer ce qu'ils appellent "connected pacer" au style de nage à 2 temps avec recouvrement latéral, et ce qu'ils appellent "disconnected pacer" au style de nage à 4 temps. Cependant, il était impossible de classer les chevaux dans la catégorie "rear engine", car dans notre étude, aucun cheval n'a été observé nageant en utilisant uniquement les membres postérieurs. De plus, les descriptions fournies par Grossi et al. (Grossi *et al.*, 2024) pour chacune des sous-catégories n'étaient pas suffisamment détaillées pour faciliter une comparaison directe avec les résultats de notre étude.

Tous les chevaux inclus dans notre étude étaient capables de se déplacer dans l'eau, mais ils ont adopté différentes stratégies. Au cours des dernières décennies, l'analyse de la nage chez les mammifères a suscité un intérêt scientifique significatif, visant à mieux comprendre leurs adaptations évolutives à l'environnement aquatique et les limites de leurs performances de nage (Fish, 1996, 2001). Les chercheurs ont naturellement cherché à comparer ces mouvements aquatiques avec les allures terrestres bien connues, pour établir des liens entre la coordination des membres pendant la locomotion terrestre et aquatique (Hildebrand, 1965, 1976; Fish, 1993 ; Abourachid, 2003 ; Fish *et al.*, 2021). Il a été suggéré que les schémas neuromoteurs contrôlant la nage ont probablement évolué à partir de schémas préexistants utilisés pour la marche. Cependant, l'immersion complète dans l'eau introduit des contraintes biomécaniques distinctes de celles rencontrées sur terre, telles que la flottabilité et la propulsion. Dans la locomotion terrestre, des temps de contact au sol plus longs sont nécessaires pour maintenir la stabilité, tandis que la flottabilité dans l'eau fournit cet effet stabilisateur. Cela permet des mouvements des membres aquatiques qui seraient instables sur terre (Edwards, 1989), comme la nage bipède observée chez les petits mammifères (souris, rats, gerbilles) utilisant uniquement leurs membres postérieurs (Dagg et Windsor, 1972 ; Fish, 1993). Cependant, une telle nage bipède semble physiquement impossible pour les chevaux, en raison de leur structure corporelle, qui les ferait basculer verticalement s'ils étaient passifs. Dans l'eau, le centre de gravité du cheval est situé derrière son centre de flottabilité, entraînant une inclinaison du corps vers le bas (Domning et De Buffrénil, 1991). Pour contrer cela, la flottabilité doit être gérée activement par une nage quadrupède, une technique communément appelée "nage du chien" chez les grands mammifères, y compris les chevaux (Dagg et Windsor, 1972 ; Fish, 1996, 2001).

Nos résultats ont démontré des variations dans la coordination des membres du cheval pendant la nage. D'autres études ont également montré qu'il existe des variations dans la nage quadrupède au sein d'une même espèce, chaque individu adoptant la technique la mieux adaptée à sa morphologie. Par exemple, deux espèces d'écureuils, *Citellus columbianus* et *Citellus franklini*, présentent des techniques de nage différentes ; la première utilise ses quatre membres, tandis que la seconde s'appuie uniquement sur ses membres postérieurs (Dagg et Windsor, 1972). Cependant, le cheval est morphologiquement plus proche du chien que des écureuils, suggérant des similitudes

potentielles dans leurs techniques de nage. Des études récentes sur les chiens ont montré que leur coordination des membres pendant la nage diffère des allures terrestres classiques, confirmant que la nage nécessite des adaptations spécifiques (Fish *et al.*, 2021). Chez les chiens, la nage implique une allure à quatre temps sans phase propulsive simultanée des membres controlatéraux, caractérisée par des phases propulsives courtes et des phases de récupération longues pour optimiser la poussée et réduire la traînée dans l'eau (Fish, 1984). Cette séquence semble stéréotypée chez les chiens. Bien que l'une des séquences de mouvement des membres que nous avons observées chez certains chevaux corresponde à celle des chiens, les variations observées chez les chevaux ne sont pas présentes chez les chiens. En résumé, bien que des similitudes dans les schémas de mouvement des membres entre la nage du cheval et du chien auraient pu être anticipées, nos résultats mettent en évidence des variations dans la coordination des membres chez les chevaux qui n'ont pas été observées chez d'autres mammifères quadrupèdes, tels que les chiens.

Nous avons observé des variations significatives dans les capacités de nage de nos chevaux, non seulement entre les individus mais aussi au sein d'un même individu. À ce stade, il est intéressant de considérer comment chaque cheval sélectionne sa stratégie de nage et quels facteurs pourraient influencer ce choix. L'observation des stratégies d'échauffement des chevaux peut fournir des informations précieuses sur leurs préférences et habitudes de nage, en fonction de la direction (main) utilisée. Généralement, les chevaux qui maintiennent une stratégie cohérente ont tendance à utiliser cette même approche pendant leur échauffement. En revanche, les chevaux qui emploient plusieurs stratégies pendant la nage ont également tendance à favoriser ces stratégies pendant l'échauffement, en fonction de la direction. Plusieurs explications pourraient rendre compte de ces observations. Premièrement, l'étude indique que la direction dans laquelle le cheval nage - qu'il tourne à gauche ou à droite dans la piscine semi-circulaire - semble avoir un impact sur la stratégie de nage utilisée, comme on l'a remarqué dans les tours à gauche par rapport à ceux à droite. L'effet de la négociation de ces virages est un facteur crucial à analyser. Nous avons observé que certains chevaux adaptent leur mouvement pour négocier les virages avec succès en exerçant plus de force avec les membres à l'extérieur du virage. Ainsi, lorsqu'ils nagent à main gauche, les chevaux peuvent utiliser davantage leurs membres latéraux droits, et vice versa pour la main droite. Comme le virage se produit soit avant soit après les caméras selon la direction de nage, cela pourrait expliquer les variations observées dans les stratégies utilisées entre les deux sens de rotation. L'ampleur de ces variations dépend des capacités naturelles de nage de chaque cheval. Il a été noté que, chez la plupart des petits mammifères étudiés (sauf le cochon d'Inde), les jeunes individus ont tendance à nager en cercles lors de leurs premières expériences (Dagg et Windsor, 1972). Un individu pourrait nager vers la droite ou la gauche en utilisant ses quatre membres, sans préférence directionnelle inhérente. La direction semblait être influencée par d'autres facteurs tels que l'orientation initiale de la tête. Dans notre étude, les chevaux étaient guidés à l'aide de deux longes, chacune tenue par une personne de chaque côté de l'animal. Il est possible que les forces exercées par ces deux manipulateurs n'aient pas été strictement égales, dans le but d'aider le cheval à négocier les virages (Irwin et Howell, 1980). Le cheval, ayant perçu la direction dans laquelle il nagerait avant même d'entrer dans la piscine, pourrait anticiper une stratégie pour se préparer au virage à venir. Cette différence dans les forces exercées sur les longes, combinée à la perception préalable du cheval de la direction de rotation, pourrait expliquer certaines des variations observées dans les stratégies de nage employées pour négocier les virages (Irwin et Howell, 1980).

Deuxièmement, le protocole d'entraînement incluait une pause ou une session sur tapis roulant qui semblait influencer le choix de la stratégie de nage lorsque le cheval retournait dans l'environnement aquatique. Cet effet pourrait être attribué aux différences de stimulation sensorielle entre les deux environnements. Dans l'eau, les capteurs proprioceptifs et les récepteurs neurosensoriels s'engagent différemment. Ainsi, on peut supposer qu'une période d'adaptation est nécessaire pour que le cheval s'ajuste aux nouvelles informations sensorielles lors de sa première réentrée dans l'environnement aquatique (Galloux *et al.*, 1992). Par exemple, le cheval #09, après une session sur tapis roulant, a d'abord adopté une stratégie à deux temps avec recouvrement latéral en retournant dans la piscine, avant de revenir à sa stratégie habituelle à quatre temps avec recouvrement moyen. Ce phénomène de réadaptation sensorielle lors des changements d'environnement est un facteur important à prendre en compte lors de l'élaboration de programmes de réhabilitation équine. Enfin, d'autres facteurs tels que la fatigue ou le niveau d'entraînement pourraient également expliquer les variations observées dans les stratégies de nage adoptées par les chevaux. On peut supposer qu'un cheval fatigué, surtout vers la fin d'une session, pourrait modifier son schéma locomoteur pour adopter une stratégie moins exigeante en énergie. En effet, les muscles impliqués dans le maintien de la tête hors de l'eau sont fortement sollicités (Tokuriki *et al.*, 1999). En raison de la fatigue, l'utilisation de certains muscles peut être limitée au strict minimum, juste assez pour garder le nez au-dessus de l'eau. Cette explication correspond aux observations faites sur certains chevaux comme #03, #09, #13 et #15. Ces chevaux ont maintenu une stratégie de nage stable au début de la session, mais ont changé de stratégie vers la fin (vers des stratégies à 4 temps - CatC ou CatD), probablement en raison de l'apparition de la fatigue musculaire. Ainsi, la fatigue peut inciter le cheval à adopter une stratégie de nage plus économe en énergie pour conserver ses ressources énergétiques restantes. Par conséquent, ce facteur de fatigue devrait être pris en compte lors de l'analyse des variations de stratégie au cours d'une session de nage.

Dans cette étude, nous avons appliqué des algorithmes d'apprentissage automatique, spécifiquement le clustering k-means, pour évaluer la capacité discriminative de deux paramètres quantitatifs pour classer les schémas de coordination des membres lors de la nage des chevaux. Les observations qualitatives faites par les vétérinaires ont initialement identifié au moins trois catégories distinctes de stratégies de nage. En utilisant des graphiques de coordination, nous avons identifié huit paramètres quantitatifs indépendants pour chaque tour à travers tous les chevaux, résultant en 125 observations. L'analyse de ces huit indicateurs seuls et sans connaissance préalable rendait difficile la distinction de tendances claires à travers les différentes stratégies. L'apprentissage automatique s'est avéré avantageux pour gérer efficacement de grands ensembles de données (Mouloodi *et al.*, 2021). Cependant, la gestion de huit indicateurs reste peu pratique pour une utilisation routinière. Pour une utilisation efficace du clustering k-means, nous réduisons ces variables à deux ratios (Rathore et Shukla, 2015 ; M. Ghazal *et al.*, 2021). Bien que le clustering k-means soit une technique d'apprentissage automatique non supervisée, il a offert l'opportunité d'explorer différents nombres de clusters et seuils. Initialement, sans connaissance préalable, nous avons appliqué un seul clustering k-means avec trois clusters pour identifier les stratégies. Bien que cette approche ait fourni certaines informations, elle a abouti à une précision globale de 77,6%, avec 26 erreurs (20,8%), particulièrement entre la stratégie S3 et la catégorie CatB. De plus, il y avait des classifications erronées mineures, comme l'étiquetage incorrect de la stratégie S1 en tant que CatC ou CatD (stratégie à quatre temps), qui étaient incohérentes avec les schémas attendus. Pour améliorer la classification, nous avons ensuite mis en œuvre deux clusterings k-means successifs, chacun avec deux clusters. Cette approche affinée a donné des résultats plus cohérents pour la

plupart des tours, atteignant une précision globale de 80,0 %, avec 24 erreurs (19,2%), encore principalement entre la stratégie S3 et la catégorie CatB. De manière encourageante, les deux méthodes ont produit trois clusters qui correspondaient aux stratégies identifiées par l'équipe vétérinaire. Cependant, l'étiquetage erroné fréquent entre la stratégie S3 et CatB a conduit à envisager une quatrième catégorie. Reconnaisant les variations potentielles au sein de la stratégie à quatre temps, le second clustering k-means a appliqué trois clusters pour établir des seuils quantitatifs, révélant avec succès deux variations distinctes de la stratégie à quatre temps. Ce faisant, l'algorithme d'apprentissage automatique a amélioré les observations qualitatives faites par l'équipe vétérinaire, fournissant des insights quantitatifs qui allaient au-delà de l'identification visuelle. Dans notre étude, l'apprentissage automatique a principalement servi d'outil puissant pour obtenir des résultats quantitatifs complexes. Un point fort de notre approche était la comparaison et la validation itératives des résultats avec les observations de l'équipe vétérinaire. Ce processus itératif est essentiel dans les études utilisant des algorithmes d'apprentissage automatique, car il aide à combler les défis computationnels avec les insights d'experts. Cependant, comme le montre notre tentative initiale utilisant un seul clustering k-means avec trois clusters, l'application de l'apprentissage automatique pour formuler des hypothèses dans les domaines médical ou vétérinaire doit être entreprise avec prudence (Kudina et De Boer, 2021 ; Appleby et Basran, 2022 ; Basran et Appleby, 2022).

Cette étude présente certaines limitations. La principale limitation est la taille relativement petite de l'échantillon : onze chevaux d'une seule race, avec douze passages enregistrés, chacun contenant seulement 2 ou 3 cycles par passage, tous enregistrés au cours d'une semaine spécifique. Cette contrainte découle principalement de nos méthodes d'enregistrement (Giraudet *et al.*, 2023), qui s'appuient sur des caméras sous-marines. Le pré- et post-traitement de ces vidéos sont chronophages, limitant la quantité de données que nous pouvions raisonnablement collecter. Des méthodes actuelles, telles que les Unités de Mesure Inertielle (IMU), pourraient aider à relever ces défis à l'avenir en rationalisant la collecte de données. Néanmoins, les méthodes basées sur la vidéo restent la seule approche capable de fournir des informations détaillées sur les stratégies de nage. Malgré la petite taille de l'échantillon, notre étude a établi une méthode rationnelle pour identifier et automatiser la détection de différentes stratégies de nage chez les chevaux et a identifié des variations significatives dans leur sélection.

5. Conclusion

Cette étude a permis une analyse détaillée des stratégies de nage employées par les chevaux lors de sessions d'entraînement aquatique dans une piscine en forme de U. Nous avons observé une variabilité inter- et intra-individuelle dans les schémas de coordination des membres pendant la nage. Trois stratégies de nage principales ont été identifiées et caractérisées quantitativement : la stratégie à deux temps avec recouvrement latéral, la stratégie à deux temps avec recouvrement diagonal, et la stratégie à quatre temps avec des degrés variables de recouvrement, qui peut être subdivisée en deux sous-catégories : le quatre temps avec recouvrement moyen et le quatre temps avec peu de recouvrement. Un système de classification basé sur des indices spatio-temporels a permis de définir des seuils objectifs et quantitatifs pour distinguer ces stratégies. Alors que certains chevaux ont maintenu une stratégie de nage constante tout au long de l'étude, d'autres ont démontré une capacité d'adaptation en changeant de stratégie au sein d'une même session. Plusieurs facteurs peuvent influencer ce choix de stratégie, notamment la direction de nage (main droite ou gauche), la présence de virages dans la piscine, ainsi que la fatigue. Cette variabilité souligne la complexité

de la locomotion aquatique chez les chevaux et remet en question la notion simpliste de "nage du chien" souvent utilisée pour décrire la nage chez les mammifères quadrupèdes terrestres. Nos résultats suggèrent que les chevaux démontrent une plasticité remarquable dans leur adaptation aux contraintes de l'environnement aquatique. Des études supplémentaires seront nécessaires pour démontrer les relations potentielles de cause à effet entre la race, l'activité terrestre habituelle, la direction de rotation, la fatigue, ou l'entraînement, et le choix de la stratégie de nage par chaque cheval. La présente étude pose les bases d'une méthode reproductible et automatisable pour classer les stratégies de nage. Pour progresser davantage, il sera maintenant nécessaire de développer des méthodes de mesure simplifiées (par exemple, des enregistrements basés sur des IMU) pour calculer les indices α et β sur de plus grandes populations de chevaux et dans différentes circonstances. Approfondir la compréhension des liens entre les stratégies employées, les capacités de nage et l'impact sur la santé et la récupération des chevaux blessés aidera à optimiser les programmes d'entraînement aquatique équin dans un avenir proche.

Contributions des auteurs : Conceptualisation, P.G., F.M, H.C. et C.G. ; méthodologie, P.G., F.M, H.C. et C.G. ; logiciel, C.G. ; analyse formelle, P.G. et C.G. ; investigation, P.G. et C.G. ; conservation des données, P.G. et C.G. ; rédaction - préparation du brouillon original, P.G. et C.G. ; rédaction - révision et édition, P.G., F.M, C.M., A.B., S.J., E.A., P.M., F.A., H.C. et C.G. ; supervision, F.M et H.C. ; administration du projet, H.C. ; acquisition de financement, F.M, C.M., S.J., P.M., F.A. et H.C. Tous les auteurs ont lu et approuvé la version publiée du manuscrit.

Financement : Cette recherche a été financée par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), numéro de subvention ANR-20-CE19-0016.

Déclaration du comité d'éthique : Cette étude a été approuvée par le ComERC de l'École Nationale Vétérinaire d'Alfort le 14/11/2022, numéro de dossier : 2022-09-19.

Remerciements : Nous remercions ici tout le personnel du CIRALE pour leur aide lors des expériences.

Conflits d'intérêts : Les auteurs déclarent n'avoir aucun conflit d'intérêts.

Troisième partie : comparaison entre les données aquatiques et terrestres

Depuis le 18^{ème} siècle, la locomotion terrestre du cheval a fait l'objet de nombreuses études scientifiques.

L'une des premières recherches notables remonte à 1779, menée par Goiffon et Vincent (1779). Leur méthode ingénieuse consistait à utiliser des clochettes de tonalités différentes pour identifier la séquence des battues, couplée à l'observation des empreintes des sabots sur le sol. Cette approche permettait de déterminer le posé des membres antérieurs et postérieurs, ainsi que les phases de suspension. Bien que qualitatives, ces observations restaient approximatives et incertaines. En 1878, Marey a fait progresser l'étude en développant une méthode graphique utilisant des signaux à air (Marey, 1873). Afin d'étudier la locomotion du cheval, Marey a imaginé de placer sous les sabots de l'animal, des boules en caoutchouc bourrées de crin. Lorsque le pied frappait le sol, la boule était comprimée et chassait l'air dans des tuyaux eux-mêmes reliés à un stylet qui inscrivait une trace sur un rouleau en rotation. Cette technique plus sophistiquée permettait d'obtenir des graphiques représentant la séquence d'appui des membres, ainsi que la durée des phases d'appui et de suspension. Cependant, elle ne permettait toujours pas de représenter les positions successives des membres dans l'espace.

Pour remédier à cette limitation, deux innovations majeures ont vu le jour : en 1889, Barrier (1889) a développé un fer explorateur à signaux électriques et en 1872, Muybridge a mis au point une analyse photographique des allures (Muybridge *et al.*, 1902). Marey a ensuite perfectionné la technique photographique en utilisant la chronophotographie géométrique, réduisant le sujet à des segments corporels et des centres articulaires (Marey, 1878).

Les premiers tests cinématiques ont été réalisés à Alfort au début du XX^e siècle par Barrier (1910).

Depuis la fin du XX^e siècle, les progrès technologiques ont engendré un nombre croissant de systèmes d'analyse de la locomotion équine. Ces systèmes combinent des méthodes cinétiques analysant les forces produisant le mouvement et des méthodes cinématiques étudiant la variation de position de marqueurs placés sur des repères anatomiques précis.

Actuellement, la capture optique du mouvement tridimensionnel est considérée comme la référence en matière d'analyse cinématique. Cependant, en raison de sa complexité de mise en œuvre, des unités de mesure inertielle (IMU) ont été développées comme alternative. Ces unités permettent d'enregistrer des données tridimensionnelles grâce à un ensemble de capteurs (accéléromètres, gyroscopes, magnétomètre). Toutes ces évolutions ont permis d'acquérir une connaissance précise de la biomécanique des allures terrestres du cheval. Il existe aujourd'hui de nombreuses méthodes de restitution pour représenter la séquence des membres et leurs caractéristiques temporelles, notamment les diagrammes en barres, les diagrammes de phases, les diagrammes circulaires ou encore la représentation d'Hildebrand parmi les plus célèbres.

Ces avancées technologiques et méthodologiques ont considérablement amélioré notre compréhension de la locomotion équine et ont permis de définir concrètement ce que représente

une foulée. En piscine, peu de données biomécaniques sont actuellement disponibles, excepté les travaux de Grossi et son équipe (Grossi *et al.*, 2024). Les travaux du projet de recherche CAPT-ESE permettent une première comparaison du mouvement aquatique par rapport au mouvement terrestre. Ces comparaisons feront l'objet des paragraphes suivants.

1. Analyse comparative temporelle des allures, terrestre et aquatique

A. Analyse séquentielle

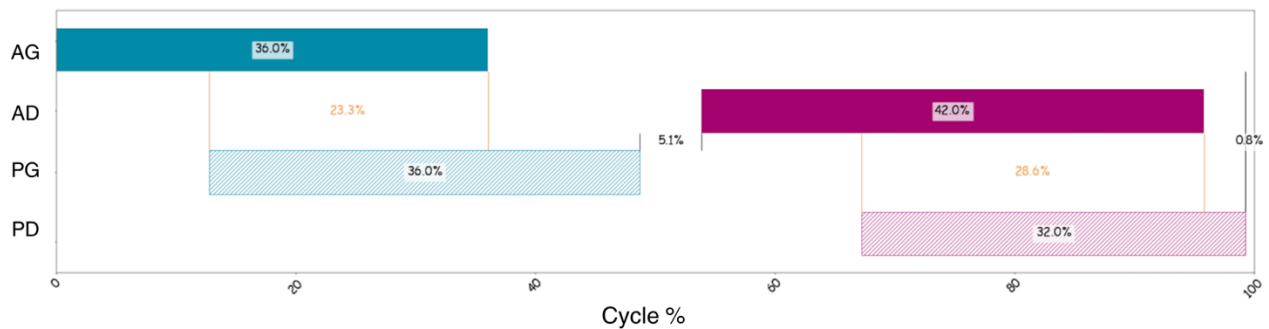
La locomotion équine, d'un point de vue biomécanique, se caractérise par un mouvement coordonné du corps et des membres suivant un schéma automatique, rythmique et harmonieux, qui définit diverses allures. Cette diversité des patterns locomoteurs résulte des multiples combinaisons rendues possibles par la locomotion quadrupède, ainsi que de la sélection génétique des chevaux au fil des siècles. Jusqu'à récemment, les allures aquatiques du cheval demeuraient inexplorées, sans nomenclature officielle. Une avancée significative a été réalisée grâce à l'étude menée par l'équipe de recherche CAPT-ESE (article partie 2), qui a développé une nouvelle nomenclature pour décrire les allures en milieu aquatique. En combinant divers indicateurs, il a été possible, pour la première fois de réaliser une analyse descriptive des allures observées lors de la nage chez le cheval. Trois grandes stratégies de nage ont été observées. Cette avancée permet désormais une toute première comparaison entre les allures terrestres et aquatiques. Cette partie vise à mettre en lumière leurs différences et leurs similitudes. L'analyse comparative de ces données offre une compréhension plus fine des mécanismes de locomotion équine dans ces deux environnements distincts, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives dans l'étude de la biomécanique équine et ses applications potentielles.

En piscine, deux stratégies de nage à deux temps se distinguent par l'appariement des membres : la stratégie à recouvrement latéral et celle à recouvrement diagonal.

a. Comparaison de la stratégie à 2 temps à recouvrement latéral avec les allures terrestres

La stratégie à recouvrement latéral pourrait s'apparenter à l'amble en locomotion terrestre. Elle repose sur un mouvement en paires latérales antéro-postérieures : antérieur gauche / postérieur gauche et antérieur droit / postérieur droit (figure 20). Cependant, contrairement à l'amble, où les membres ipsilatéraux agissent parfaitement simultanément et ne présentent pas de déphasage, la stratégie de nage à recouvrement latérale admet un déphasage variable entre les membres ipsilatéraux. Il est ainsi possible de distinguer, le recouvrement antérieur gauche / postérieur gauche et le recouvrement antérieur droit / postérieur droit.

Figure 20 : exemple d'un diagramme représentant la stratégie de nage à 2 temps à recouvrement latéral (les rectangles représentent la propulsion)

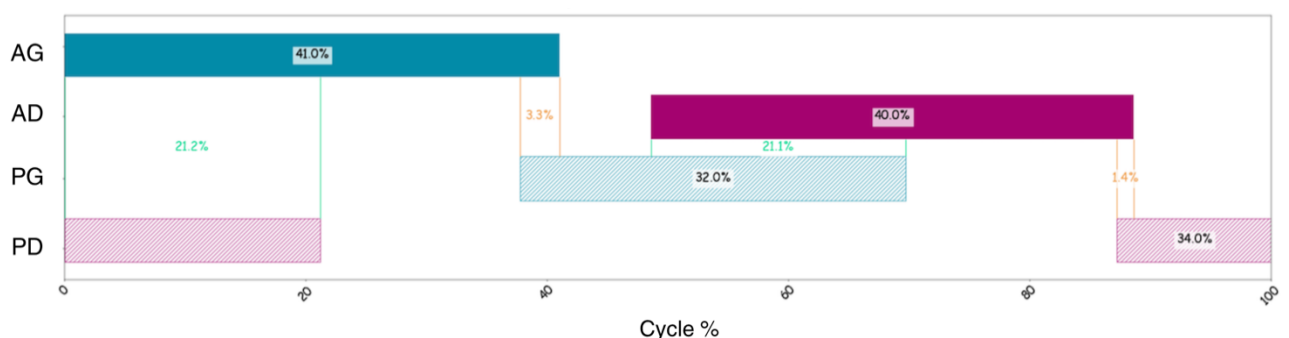


En locomotion terrestre, le tlt latéralisé est une allure caractérisée par le déplacement décomposé des membres ipsilatéraux. Cela pourrait rendre sa stratégie similaire à la technique de nage à deux temps avec recouvrement latéral. Cependant, une analyse détaillée de la séquence de mouvements des membres révèle une différence majeure entre la locomotion terrestre et la nage. En natation, la séquence de propulsion successive des membres suit l'ordre antérieur gauche, postérieur gauche, antérieur droit, postérieur droit. En revanche, lors du tlt, elle suit l'ordre antérieur gauche, postérieur droit, antérieur droit, postérieur gauche. Il est donc important de ne pas confondre la stratégie de déplacement, qui ici est latérale dans les deux cas, avec la séquence de déplacement, car les chevaux n'utilisent pas la même séquence en locomotion terrestre et aquatique. Cette observation s'applique également aux chiens (Fish *et al.*, 2021) qui changent de séquence entre la marche et la nage, de la même manière que le cheval.

b. Comparaison de la stratégie à 2 temps à recouvrement diagonal avec les allures terrestres

La stratégie à recouvrement diagonal, pourrait être assimilée à première vue au trot. Elle implique un appariement en paires diagonales antéro-postérieures (figure 21). Cependant, contrairement au trot, où les membres diagonaux agissent de manière parfaitement simultanée, entrecoupé de phases de suspension, la nage admet un déphasage variable entre les membres situés en diagonale. Bien que le trot présente des phases de suspension, il ne permet pas les déphasages observés en nage. Il est ainsi possible, de distinguer le recouvrement postérieur gauche / antérieur droit et postérieur droit / antérieur gauche.

Figure 21 : exemple d'un diagramme représentant la stratégie de nage à 2 temps à recouvrement diagonal (les rectangles représentent la propulsion)



En locomotion terrestre, il existe également le tt diagonalisé qui est une allure où les membres diagonaux se déplacent de manière décomposée. La démonstration est la même que pour le tt latéralisé mais cette fois-ci en diagonal. En effet, l'ordre de séquence de déplacement des membres n'est pas identique entre la stratégie de nage à 2 temps à recouvrement diagonal et le tt diagonalisé. Il est donc crucial, une fois de plus, de ne pas confondre la stratégie de déplacement, qui est diagonale dans les deux cas, avec la séquence de déplacement, qui diffère.

c. Comparaison des stratégies à 4 temps avec les allures terrestres

La nage à quatre temps est caractérisée par le mouvement successif et indépendant de chaque membre. Nos résultats montrent que l'on peut la diviser en deux catégories, la première avec un faible pourcentage de recouvrement (figure 22) et la seconde avec un pourcentage de recouvrement moyen (figure 23).

Figure 22 : exemple d'un diagramme représentant la stratégie de nage à 4 temps à faible recouvrement (les rectangles représentent la propulsion)

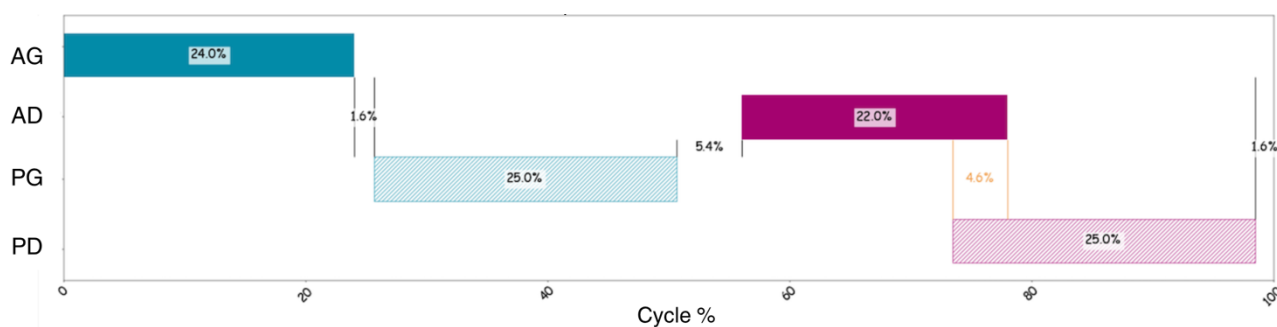
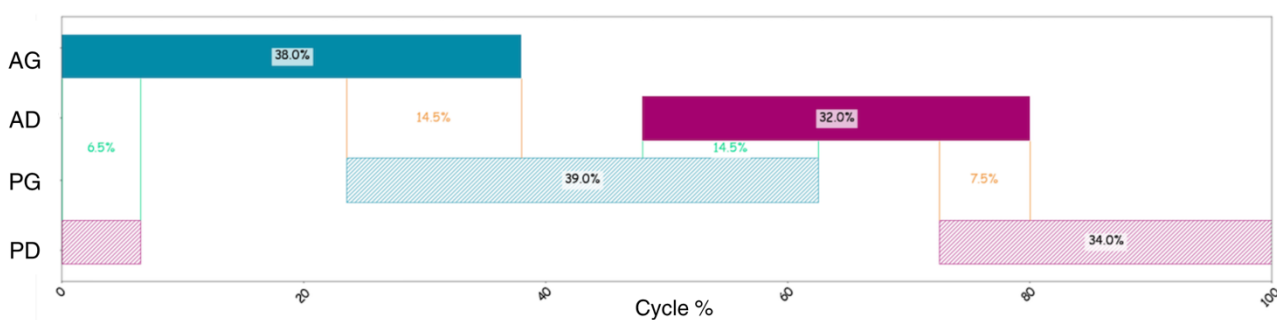


Figure 23 : exemple d'un diagramme représentant la stratégie de nage à 4 temps à recouvrement moyen (les rectangles représentent la propulsion)



En locomotion terrestre, le pas se définit également par le mouvement successif des quatre membres. Les mouvements de rétraction des membres se superposent, alternant la formation de paires diagonales et latérales, avec un recouvrement toujours de 50 % du temps de rétraction du membre suivant. Ainsi, le pas pourrait faire penser à la stratégie de nage à 4 temps avec un recouvrement moyen, qui possède elle aussi un recouvrement équitable, quels que soient les membres mis en jeu. Cependant, la nage à quatre temps à faible recouvrement présente des différences plus marquées, avec peu voire pas de recouvrement des membres diagonaux ou latéraux. Les phases de propulsion sont alors séparées par des temps de pause, qui ont été nommés

glissement. Le glissement pourrait être assimilé aux phases de suspension en locomotion terrestre mais ces phases de suspension n'existent pas dans les allures comme le pas.

En outre, il est impossible d'assimiler entièrement la stratégie de nage à 4 temps au pas. En effet, lorsque l'on observe la séquence d'enchaînement du mouvement des membres, cette dernière présente les mêmes différences que remarquées précédemment. À savoir que la séquence employée au pas suit l'ordre : antérieur gauche, postérieur droit, antérieur droit, postérieur gauche alors que celle employée en piscine suit l'ordre antérieur gauche, postérieur gauche, antérieur droit, postérieur droit.

Ainsi, la principale différence entre les allures aquatiques et terrestres est l'ordre de la séquence qui diffère. Par ailleurs, aucune allure à deux temps en piscine n'admet des paires latérales ou diagonales qui agissent parfaitement simultanément, à la différence de l'amble ou du trot. Pour les allures à quatre temps en piscine, la différence réside dans l'absence de pause, appelée "glissement".

En conclusion, aucune allure aquatique ne peut être comparée strictement à une allure terrestre. Le déplacement aquatique suit une logique bien distincte du déplacement terrestre.

2. Analyse comparative cinésiologique du mouvement terrestre et aquatique

Les trois stratégies de nage précédemment identifiées présentent des mouvements similaires des membres pendant les phases de propulsion et de ramené, avec des différences principalement au niveau de la coordination, qui ont été étudiées dans la partie précédente. L'objectif de l'analyse cinésiologique est de comprendre le mouvement exécuté, en se concentrant sur les implications articulaires et musculaires. Cette analyse se voudra comparative entre le mouvement aquatique et le mouvement terrestre (Denoix et Bonneau, 2014), le but étant d'identifier les groupes musculaires les plus sollicités en piscine. Cette étude se basera sur l'observation, qualitative et logique, des membres au cours de la nage, à l'aide des vidéos obtenues lors de l'analyse biomécanique du projet CAPT-ESE. Ainsi, des hypothèses pourront être posées sur les groupes musculaires sollicités et dans quel sens. Ces déductions issues de l'observation permettront de donner une première piste afin d'identifier les exercices les plus adaptés pour le perfectionnement de gestes spécifiques et la rééducation de blessures particulières. Des études similaires existent pour la locomotion sur tapis roulant (De Meeûs d'Argenteuil *et al.*, 2021). Cependant, peu d'études existent en piscine (Misumi *et al.*, 1995 ; Tokuriki *et al.*, 1999). Le nouveau support vidéo que nous avons obtenu permet d'avancer sur la formulation de ces premières hypothèses qui ouvriront la voie à de nouvelles études quantitatives.

A. Antérieurs

a. Muscles mis en jeu lors de la locomotion terrestre

Pour les membres antérieurs, les groupes musculaires peuvent être séparés en quatre grandes catégories :

- Les muscles déplaçant le membre dans son ensemble qui jouent un rôle majeur, en locomotion terrestre, dans la protraction et dans la propulsion. Ce sont essentiellement des muscles reliant le membre au tronc. Le muscle brachio-céphalique et le muscle omo-transversaire sont ainsi actifs dans la protraction, les muscles grand dorsal et pectoral ascendant dans la propulsion.

- Les muscles de l'épaule qui jouent un rôle dans l'extension et la flexion de cette articulation avec par exemple le muscle supra-épineux impliqué dans l'extension et les muscles deltoïde, grand rond et petit rond dans la flexion.

- Les muscles du bras qui agissent sur l'articulation du coude en flexion et en extension, avec entre autres le muscle triceps brachial qui agit dans l'extension du coude et les muscles biceps brachial et brachial dans la flexion de cette articulation.

- Enfin les muscles de l'avant-bras qui agissent dans l'extension et la flexion des articulations du carpe, du boulet et des articulations interphalangiennes. Les muscles antébrachiaux crâniens permettent l'extension et les muscles antébrachiaux caudaux permettent la flexion (et la limitation de l'extension).

Pour mieux comprendre les bénéfices potentiels du travail aquatique pour l'entraînement et la rééducation des chevaux, il est essentiel d'étudier l'implication des groupes musculaires en fonction de la phase du cycle aquatique.

b. Interventions musculaires lors de la nage

- *Phase de propulsion*

Nous avons vu précédemment qu'en piscine la phase d'appui terrestre était réduite à l'unique temps de propulsion. Ainsi, on peut en déduire que les muscles agissant pendant les temps d'amortissement et de support sont moins sollicités lors d'un entraînement en piscine. Lors de la phase d'amortissement la contraction musculaire excentrique de plusieurs groupes musculaires permet l'absorption des chocs. La contraction excentrique des muscles antébrachiaux caudaux limite la descente du boulet, cette contraction est donc absente en piscine. Tout comme la contraction excentrique du muscle triceps brachial qui contrôle la fermeture du coude et celle du muscle supra-épineux qui limite la fermeture de l'épaule. Cette contraction musculaire excentrique se poursuit en locomotion terrestre lors du temps de support, qui est là aussi, absent en piscine. Ainsi, les contractions excentriques des muscles cités précédemment sont probablement réduites voire absentes en piscine car la piscine ne nécessite pas de phase de stabilisation comme en milieu terrestre.

En locomotion terrestre, pendant la phase de support, débute la rétraction active du membre vers l'arrière, avec une action des muscles pectoral ascendant et grand dorsal qui exercent une traction sur l'humérus en direction caudale. De plus, la partie cervicale du muscle trapèze et le muscle rhomboïde attirent l'extrémité proximale de la scapula vers l'avant (Denoix et Bonneau, 2014). En piscine on peut estimer que l'action de ces groupes musculaires débute plus précocement, dès le début de la phase de propulsion puisque le mouvement est continu et que la rétraction commence dès le début du mouvement.

Enfin, lors de la nage, l'extension articulaire des articulations proximales (épaule, coude) se produit dès le début du mouvement du membre vers l'arrière. Elle est permise lors du temps de


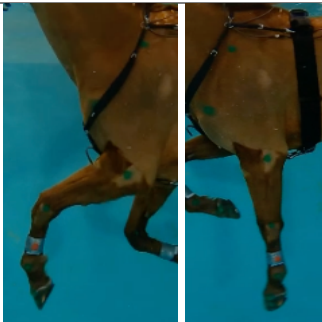
propulsion par une contraction concentrique du muscle supra-épineux, qui ouvre l'articulation de l'épaule et le muscle triceps brachial, qui étend l'articulation du coude. On peut supposer que ces muscles travaillent plus en piscine qu'en locomotion terrestre étant donné la force de résistance de l'eau au mouvement. Tokuriki *et al.* (1999), ont d'ailleurs démontré, avec l'enregistrement de l'activité électromyographique, que l'activité du triceps brachial était intense et continue lors de la nage alors que son activité était intermittente pendant la marche.

Lors de la locomotion terrestre, les muscles antébrachiaux caudaux se contractent de manière concentrique pour fléchir le carpe pendant la phase de soutien. En revanche, dans l'eau, le carpe est complètement étendu durant la phase de propulsion. Ce changement suggère que l'activité des muscles antébrachiaux caudaux semble remplacée par celle des muscles antébrachiaux crâniens en milieu aquatique. Cependant, l'activité de ces muscles crâniens reste modérée en piscine. La partie distale du membre est principalement mise en mouvement par la contraction des muscles plus proximaux. Cette hypothèse est corroborée par les travaux de Tokuriki et son équipe (1999), qui ont démontré une activité réduite de l'extenseur commun des doigts pendant la nage par rapport à la locomotion terrestre. Malgré cette activité réduite, la contraction des muscles antébrachiaux crâniens joue tout de même un rôle dans la propulsion du membre distal contre la résistance de l'eau. Cette adaptation illustre la capacité du cheval à modifier son schéma musculaire en fonction de l'environnement, optimisant ainsi son mouvement dans l'eau.

Ainsi, pour résumer lors de la phase de propulsion (tableau 12), à la différence de la locomotion terrestre, les hypothèses sont les suivantes :

- La contraction excentrique semble absente due à l'absence de contact avec le sol pour les muscles antébrachiaux caudaux, triceps brachial et supra-épineux.
- La contraction des muscles rétracteurs du membre semble plus précoce permettant le mouvement du membre vers l'arrière pour les muscles pectoral ascendant, grand dorsal.
- La contraction concentrique des extenseurs de l'épaule et du coude semble plus importante permettant l'ouverture rapide des angles articulaires grâce notamment à l'action des muscles supra-épineux et triceps brachial.
- La contraction concentrique des muscles antébrachiaux caudaux semble remplacée par la contraction concentrique faible des muscles antébrachiaux crâniens.
- Pour tous les groupes musculaires employés, la contraction semble se dérouler de manière continue afin de maintenir le corps hors de l'eau et d'assurer son déplacement.

Tableau 12 : action successive des groupes musculaires et type de contraction lors de la phase de propulsion de l'antérieur gauche

	1er mouvement = début de propulsion, position de départ	2ème mouvement = propulsion jusqu'à verticalisation	3ème mouvement = fin de propulsion, position de fin
			
Épaule	En flexion maximale	Ouverture des angles articulaires : Supra-épineux Concentrique ✓	Extension maximale
Coude	En flexion maximale	Ouverture des angles articulaires : Triceps brachial Concentrique ✓	Extension maximale
Carpe	En flexion maximale	Ouverture des angles articulaires : Antébrachiaux crâniens Concentrique ✓	Extension maximale
Boulet	En flexion maximale	Ouverture des angles articulaires : Antébrachiaux crâniens Concentrique ✓	Extension maximale
		Muscle pectoral ascendant ; Muscle grand dorsal ; Muscle trapèze ; Muscle rhomboïde Concentrique ✓	

- *Phase de ramené*

De la même manière pour la phase de soutien en locomotion terrestre, nous avons vu précédemment que le temps d'embranchée du terrain est absent en piscine, réduisant la phase de soutien en une phase de ramené.

Lors du ramené, le basculement de l'extrémité inférieure de la scapula vers l'avant est permis par la contraction concentrique de quatre muscles (Denoix et Bonneau, 2014). La contraction concentrique de ces muscles permet la flexion de toutes les articulations du membre antérieur. En piscine, le mouvement de rétraction doit lutter contre la résistance de l'eau. Il est donc probable que ces muscles travaillent de manière plus intense lors de la nage. Le muscle trapèze dans sa partie thoracique permet de tirer l'extrémité proximale de la scapula vers l'arrière. Les muscles brachio-céphalique, omo-transversaire et pectoral descendant tirent quant à eux la racine du membre (épaule et humérus) vers l'avant. Tokuriki et son équipe, en 1999, ont prouvé que le muscle brachio-céphalique avait une activité plus intense lors de la nage (Tokuriki *et al.*, 1999). Ces actions permettent d'entraîner le membre antérieur vers l'avant en luttant contre la résistance de l'eau.

La flexion du reste du membre est permise par les muscles deltoïde et grand rond pour l'épaule et par les muscles biceps brachial et brachial pour le coude. Cependant, Tokuriki et son équipe ont démontré que le muscle brachial présentait une faible activité lors de la nage (Tokuriki *et al.*, 1999). Les muscles antébrachiaux caudaux jouent également un rôle dans la flexion du carpe et du doigt. Le fléchisseur profond du doigt possède une plus forte activité pendant la nage que sur terre permettant d'obtenir la force d'impulsion nécessaire dans l'eau (Tokuriki *et al.*, 1999). Tokuriki et son équipe ont ainsi supposé que les articulations carpiennes et digitales devaient être au maximum fléchies afin que le mouvement du membre vers l'avant soit efficace.

En locomotion terrestre ces actions se prolongent uniquement pendant la phase de suspension alors qu'en piscine ces actions semblent se prolonger tout au long du mouvement du membre vers l'avant puisqu'il n'y a pas de phase d'embranchée du terrain, ce qui signifie que lorsque ces actions s'arrêtent, le membre débute sa rétraction.




En piscine, l'attitude d'embranchée du terrain n'est pas observée en fin de phase de ramené donc les actions du muscle supra-épineux et triceps brachial, permettant l'extension, respectivement de l'épaule et du coude, n'entrent en jeu que plus tardivement, durant la phase de propulsion. De la même manière et contrairement à ce qui est observé en locomotion terrestre l'extension du carpe reste faible à la fin de la phase de ramené.

Ainsi, pour résumer, lors de la phase de ramené (tableau 13), à la différence de la locomotion terrestre, les hypothèses sont les suivantes :

- La contraction concentrique des muscles protracteurs (principalement brachio-céphalique, omo-transversaire) semble plus importante pour permettre l'avancée du membre en luttant contre la résistance de l'eau
- La contraction semble continue mais plus faible pour les muscles fléchisseurs de l'épaule et du coude (deltoïde, grand rond, biceps brachial et brachial).
- La contraction semble plus importante pour les muscles antébrachiaux caudaux permettant une meilleure impulsion dans l'eau

- Pour tous les groupes musculaires employés, la contraction semble se dérouler également de manière continue afin de maintenir le corps hors de l'eau et d'assurer son déplacement.

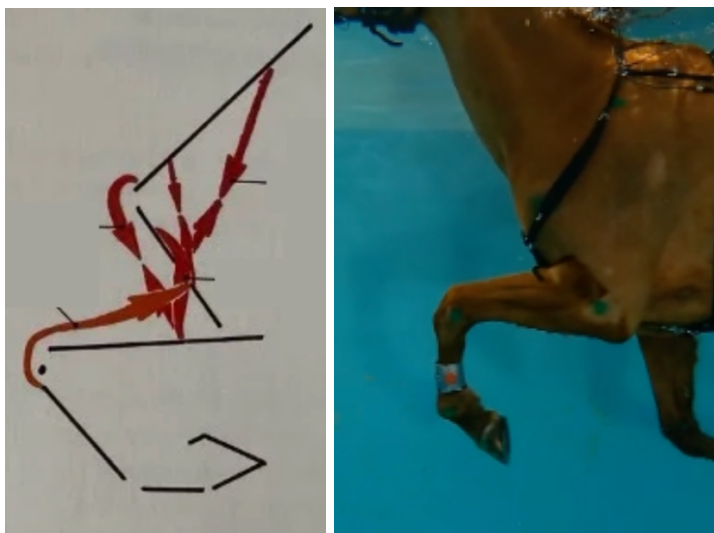
Tableau 13 : action successive des groupes musculaires et type de contraction lors de la phase de ramené de l'antérieur gauche

	1er mouvement = début de rétraction, position de départ	2ème mouvement = mouvement pendulaire	3ème mouvement = fin de ramené, position de fin
			
Épaule	En extension max	Fermeture : Muscle deltoïde et muscle grand rond Concentrique ✓	Flexion max
Coude	En extension max	Fermeture : Muscle biceps brachial et muscle brachial Concentrique ✓	Flexion max
Carpe	En extension max	Fermeture : Muscles antébrachiaux caudaux Concentrique ✓	Flexion max
Boulet	En extension max	Fermeture : Muscles antébrachiaux caudaux Concentrique ✓	Flexion max
		Muscle trapèze ; muscle brachio-céphalique ; muscle omo-transversaire ; muscle pectoral descendant → Concentrique ✓	

Ainsi, à la différence de la locomotion terrestre, la nage semble admettre une contraction excentrique plus faible voire absente, due à l'absence de contact avec le sol mais une contraction concentrique plus importante afin de lutter contre la résistance de l'eau. Par ailleurs, la contraction de certains groupes musculaires est plus précoce et continue afin de maintenir le corps à la surface de l'eau et d'assurer sa translation horizontale. Ce dernier point est une différence majeure avec la locomotion terrestre où la contraction des différents groupes musculaires est intermittente. Il semble

par ailleurs que le mouvement des antérieurs et les actions musculaires qui lui sont associées, soient similaires en piscine à ceux utilisés à l'obstacle par le cheval lors du planer (figure 24). Ainsi, on peut penser que la nage pourrait permettre d'améliorer les mouvements du planer chez les chevaux d'obstacle.

Figure 24 : photographie comparative des antérieurs et des postérieurs lors de la phase de planer à l'obstacle (à gauche) et lors de la nage (à droite) (d'après Pr. J-M Denoix, 2014)



B. Postérieurs

a. Muscles mis en jeu lors de la locomotion terrestre

Pour les membres postérieurs, les groupes musculaires peuvent être séparés en trois grandes catégories :

- Les muscles du bassin qui permettent l'extension et la flexion de l'articulation de la hanche. Parmi eux, les muscles fessiers, dont le muscle fessier moyen est le plus puissant, jouent le rôle d'extenseur tandis que le muscle ilio-psoas, joue le rôle de fléchisseur.

- Les muscles de la cuisse qui peuvent être séparés en trois groupes :

- les muscles fémoraux crâniens (dont principalement le muscle quadriceps fémoral et le muscle tenseur du fascia lata) qui permettent l'extension du grasset (et dans une moindre mesure la flexion de la hanche) ;

- Les muscles fémoraux caudaux (glutéo-biceps, semi-tendineux et semi-membraneux) qui permettent la flexion ou l'extension du grasset, en fonction du moment du cycle, mais aussi l'extension de la hanche.

- les muscles fémoraux médiaux permettent l'adduction et la propulsion et représentés en particulier par les muscles gracile et adducteur.

- Les muscles de la jambe qui sont constitués de deux groupes antagonistes qui agissent sur le jarret, le boulet et les articulations interphalangiennes. Les muscles jambiers crâniaux (dont le muscle tibial crânial et les muscles long extenseur du doigt et extenseur latéral du doigt) sont fléchisseurs du jarret et extenseurs du boulet et des articulations interphalangiennes. Les muscles jambiers caudaux (dont le muscle gastrocnémien et les muscles fléchisseurs superficiel du doigt et latéral et médial du doigt) sont extenseurs du jarret et fléchisseurs de l'articulation du boulet et des articulations interphalangiennes.

Il convient également de rappeler une particularité propre au membre pelvien : la présence de l'appareil réciproque. Il est composé crânialement de la corde fémoro-métatarsienne et caudalement du muscle fléchisseur superficiel du doigt. Cet appareil solidarise le grasset, le jarret et le doigt et permet la mobilisation passive de toutes ces articulations de manière synchronisée, la flexion du grasset s'accompagnant nécessairement d'une flexion du jarret et du doigt et réciproquement pour l'extension.

b. Interventions musculaires lors de la nage

- *Phase de propulsion*

De la même manière que pour les antérieurs, le temps d'amortissement lors de la phase d'appui est absent en piscine. L'action excentrique des muscles fessiers moyens et des muscles fémoraux caudaux, qui limite normalement la flexion de la hanche, ainsi que celle du muscle quadriceps fémoral, qui freine la flexion du grasset, est donc absente. De même, la contraction excentrique du muscle fléchisseur superficiel du doigt, empêchant lors de la locomotion terrestre la flexion du jarret et l'extension du boulet, est également absente. Ainsi, les contractions excentriques des muscles permettant de limiter la fermeture des angles articulaires sont absentes en piscine




Lors de la phase de propulsion, seul temps présent en piscine, les groupes musculaires subissent une contraction concentrique, permettant d'étendre les articulations. Les muscles fessiers moyens et fémoraux caudaux permettent l'extension de la hanche et l'ouverture du grasset, prolongée par l'action du muscle quadriceps fémoral. Les muscles jambiers caudaux sont quant à eux sollicités pour permettre l'extension du jarret (muscle gastrocnémien) et la flexion du boulet (fléchisseurs du doigt). La présence de l'appareil réciproque sur les membres postérieurs permet de synchroniser l'extension de cette chaîne articulaire (grasset et jarret). En piscine, cette phase de propulsion est essentielle pour permettre la translation du corps du cheval vers l'avant en contrant la résistance imposée par l'eau.

Ainsi, lors de la phase de propulsion (tableau 14), à la différence de la locomotion terrestre, les hypothèses sont les suivantes :

- la contraction excentrique des muscles antigravitaires est faible voire absente (muscles fessiers moyens, fémoraux caudaux, quadriceps fémoral, gastrocnémien, fléchisseur superficiel du doigt) du fait de l'absence de contact avec le sol ;
- la contraction concentrique est importante pour permettre l'ouverture rapide des angles articulaires sous l'action des muscles fessiers moyens, fémoraux caudaux, quadriceps fémoral, gastrocnémien et fléchisseur superficiel du doigt

- Pour tous les groupes musculaires employés, la contraction concentrique se déroule de manière continue depuis le début de phase de propulsion et jusqu'à la fin de cette phase afin de maintenir le corps hors de l'eau et d'assurer son déplacement.

Tableau 14 : action successive des groupes musculaires et type de contraction lors de la phase de propulsion du postérieur gauche

	1er mouvement = début de propulsion, position de départ	2ème mouvement = verticalisation du membre	3ème mouvement = fin de propulsion, position de fin
			
Hanche	En flexion maximale	Ouverture des angles articulaires : muscles fessiers moyens et fémoraux caudaux Concentrique ✓	Extension maximale
Grasset	En flexion maximale	Ouverture des angles articulaires : Muscles fémoraux caudaux et muscle quadriceps fémoral Concentrique ✓	Extension maximale
Tarse	En flexion maximale	Ouverture des angles articulaires : Muscle gastrocnémien Concentrique ✓	Extension maximale
Boulet	En flexion maximale	Ouverture des angles articulaires : Muscle fléchisseur superficiel du doigt Passif ✓	Extension maximale

- *Phase de ramené*




La flexion de toutes les articulations du membre postérieur débute dès le début du mouvement de rétraction lors de la nage. Ainsi, les actions musculaires qui se déroulent en locomotion terrestre lors des phases de ramené et de suspension semblent agir de manière similaire lors de la locomotion aquatique. La contraction concentrique des muscles ilio-psoas permet l'avancée du membre en activant la flexion du bassin et de la colonne vertébrale en région lombo-sacrale, celle des muscles fémoraux crâniens permet la flexion de la hanche. Ces deux actions permettent donc de ramener le membre sous le tronc en fléchissant l'articulation lombo-sacrale et coxo-fémorale. Les muscles fémoraux caudaux permettant pour leur part la flexion de l'articulation du grasset. L'appareil réciproque entre alors en jeu, la flexion du grasset tire la corde fémoro-métatarsienne qui provoque la flexion simultanée du jarret et la mise sous tension du tendon fléchisseur superficiel du doigt permettant la flexion du boulet et des articulations interphalangiennes.

En piscine, l'extension finale du membre précédant le poser n'est pas observé comme lors du mouvement terrestre, le membre restant très fléchi à la fin du mouvement de protraction. Les angles articulaires ne s'ouvrent que pendant la phase de propulsion. La contraction concentrique des muscles fémoraux crâniens permet l'extension du grasset et entre donc en jeu plus tardivement durant la phase de propulsion, tout comme la contraction des muscles jambiers crâniens qui permet l'extension du boulet et des articulations interphalangiennes.

Ainsi, pour résumer lors de la phase de ramené (tableau 15), à la différence de la locomotion terrestre, les hypothèses sont les suivantes :

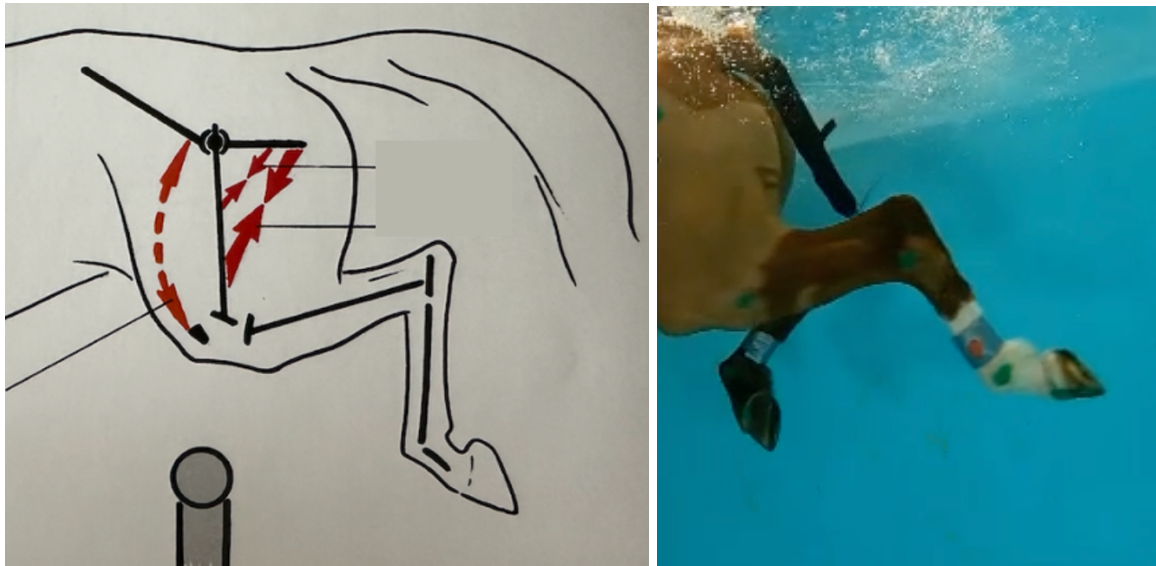
- la contraction concentrique des muscles ilio-psoas, fémoraux crâniens et fémoraux caudaux est forte pour permettre la flexion des articulations lombo-sacrale, coxo-fémorale et fémoro-tibiale afin de ramener le membre sous le tronc, en luttant contre la résistance de l'eau.
- pour tous les groupes musculaires employés, la contraction se déroule de manière continue afin de maintenir le corps hors de l'eau et d'assurer son déplacement.

Tableau 15 : action successive des groupes musculaires et type de contraction lors de la phase de ramené du postérieur gauche

	1er mouvement = début de rétraction, position de départ	2ème mouvement = mouvement pendulaire	3ème mouvement = fin de ramené, position de fin
			
Hanche	En extension max	Fermeture : Muscle ilio-psoas et muscles fémoraux crâniiaux Concentrique ✓	Flexion max
Grasset	En extension max	Fermeture : Muscle fémoro-caudaux Concentrique ✓	Flexion max
Tarse	En extension max	Fermeture : Corde fémoro-métatarsienne Passif ✓	Flexion max
Boulet	En extension max	Fermeture : tendon fléchisseur superficiel du doigt Passif ✓	Flexion max

Il semble par ailleurs que le mouvement des postérieurs en piscine et les actions musculaires qui lui sont associées, soient similaires en piscine à ceux utilisés à l'obstacle par le cheval lors du planer (figure 25). Cette observation suggère que la nage pourrait contribuer à améliorer les mouvements de planer chez les chevaux d'obstacle.

Figure 25 : photographie comparative des postérieurs lors de la phase de planer à l'obstacle (à gauche) et lors de la nage (à droite) (d'après Pr. J-M Denoix, 2014)



Pour conclure, lors de la nage, la contraction excentrique semble être absente, remplacée par une contraction concentrique plus importante, souvent plus précoce et continue. Pour étayer ces hypothèses, des travaux ont montré que la composition musculaire (type de fibres) change au fil de séances successives de nage (Misumi *et al.*, 1995). En effet, la capacité aérobie de ces muscles s'améliore lors d'exercice en piscine, ce qui suggère que les muscles fonctionnent différemment dans cet environnement. Ce travail préliminaire nécessite d'être approfondi par l'acquisition de données quantitatives. Il pourrait également être enrichi par l'analyse de l'action musculaire des régions axiales. Cela permettrait ainsi de définir les pathologies contre-indiquant la nage et celles pour lesquelles cet exercice mobilise les groupes musculaires de manière ciblée et raisonnée pour une rééducation efficace.

Conclusion et Perspectives

En conclusion, bien que l'entraînement en piscine soit une méthode établie et de plus en plus populaire pour maintenir la forme physique des chevaux tout en minimisant les contraintes sur leurs membres, la pratique de la nage équine repose encore, paradoxalement, sur des connaissances scientifiques limitées. Malgré son intégration empirique dans les programmes d'entraînement et de rééducation, l'analyse biomécanique de cette activité, en particulier la coordination des membres, demeure peu explorée. La présente étude vient approfondir la compréhension de la biomécanique équine en milieu aquatique, ouvrant ainsi la voie à des applications plus ciblées et efficaces de cette pratique.

L'analyse des mouvements des chevaux en piscine a révélé trois stratégies principales de nage : deux stratégies à deux temps et une stratégie à quatre temps. Cette dernière a ensuite été subdivisée en deux sous-catégories, aboutissant ainsi à quatre sous-catégories distinctes au total.

La stratégie à deux temps avec recouvrement latéral a été observée dans 41 des 124 passages analysés (33 %). La stratégie à deux temps avec recouvrement diagonal a été observée dans 22 des 124 passages analysés (18 %). Enfin, la stratégie à quatre temps avec faible recouvrement a été observée dans 19 des 124 passages analysés (15 %) et la stratégie à quatre temps avec moyen recouvrement a été observée dans 43 des 124 passages analysés (35 %). Lors des passages réalisés par chaque cheval, cinq chevaux ont conservé la même stratégie et six en ont changé au cours du temps. Ces derniers ont employé deux ou trois types de nage différentes, démontrant une variabilité intra-individuelle.

Ces styles de nage, bien que présentant certaines similitudes avec les allures terrestres, s'en distinguent par des séquences de mouvement spécifiques.

L'observation cinésiologique a mis en lumière des hypothèses de travail pour analyser plus en détail les différences dans l'utilisation des groupes musculaires entre la locomotion terrestre et aquatique. En piscine, il semblerait que la contraction excentrique soit absente, compensée par une contraction concentrique plus importante, plus précoce et continue. Cette différence pourrait s'expliquer par l'absence de contact avec le sol et la nécessité de lutter contre la résistance de l'eau. Ces observations suggèrent que la nage pourrait avoir des applications intéressantes pour l'entraînement et la rééducation des chevaux, notamment pour améliorer les mouvements du planer chez les chevaux d'obstacle. Cependant, des études plus approfondies sont nécessaires pour confirmer ces hypothèses et déterminer les indications et contre-indications précises de l'exercice en piscine pour différentes pathologies.

Les perspectives de recherche sont nombreuses. L'utilisation d'IMUs pourrait simplifier et améliorer la collecte de données, permettant une analyse plus complète et représentative de la nage sur l'ensemble d'une séance et sur une population de chevaux plus large. Des études longitudinales pourraient révéler l'évolution du style de nage au fil de l'entraînement. Enfin, l'analyse des lésions initiales des chevaux et de leur évolution au cours du protocole de nage pourrait fournir des informations précieuses sur l'efficacité thérapeutique de cette pratique.

En définitive, cette étude ouvre la voie à une meilleure compréhension de la biomécanique équine en milieu aquatique, avec des implications potentiellement importantes pour l'entraînement

sportif et la médecine vétérinaire. Elle souligne également l'importance de la collaboration entre vétérinaires et ingénieurs pour une analyse complète et précise de la locomotion équine dans différents environnements.

Liste des références bibliographiques

- ABOURACHID, A. (2003) A new way of analysing symmetrical and asymmetrical gaits in quadrupeds. *Comptes Rendus. Biologies* vol. 326, n° 7, p. 625-630. [[https://doi.org/10.1016/S1631-0691\(03\)00170-7](https://doi.org/10.1016/S1631-0691(03)00170-7)]
- APPLEBY, R.B., BASRAN, P.S. (2022) Artificial intelligence in veterinary medicine. *Journal of the American Veterinary Medical Association* vol. 260, n° 8, p. 819-824. [<https://doi.org/10.2460/javma.22.03.0093>]
- BACK, W., CLAYTON, H.M., ROSSDALE, P.D., *et al.* (2013) *Equine Locomotion*, 2^{ème} éd. Philadelphie, Saunders Company.
- BACK, W., SCHAMHARDT, H.C., BARNEVELD, A. (1997) Kinematic comparison of the leading and trailing fore- and hindlimbs at the canter. *Equine Veterinary Journal. Supplement* n° 23, p. 80-83. [<https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.1997.tb05060.x>]
- BACK, W., SCHAMHARDT, H.C., BARNEVELD, A. (1996) Are kinematics of the walk related to the locomotion of a warmblood horse at the trot? *The Veterinary Quarterly* vol. 18 Suppl 2, p. 79-84.
- BARUCH, S. (1898) *The Principles and practice of hydrotherapy*. New York, W. Wood and Company.
- BASRAN, P.S., APPLEBY, R.B. (2022) The unmet potential of artificial intelligence in veterinary medicine. *American Journal of Veterinary Research* vol. 83, n° 5, p. 385-392. [<https://doi.org/10.2460/ajvr.22.03.0038>]
- BROMILEY, M.W. (2007) *Equine Injury, Therapy and Rehabilitation*, 3^{ème} éd. Oxford, Blackwell Publishing Ltd [<https://doi.org/10.1002/9780470751206>]
- DAGG, A.I., WINDSOR, D.E. (1972) Swimming in northern terrestrial mammals. *Canadian Journal of Zoology* vol. 50, n° 1, p. 117-130. [<https://doi.org/10.1139/z72-019>]
- DE MEEÛS D'ARGENTEUIL, C., BOSHUIZEN, B., OOSTERLINCK, M., *et al.* (2021) Flexibility of equine bioenergetics and muscle plasticity in response to different types of training: An integrative approach, questioning existing paradigms. *PLOS ONE* vol. 16, n° 4, p. e0249922. [<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249922>]
- DELGUSTE, C., AMORY, H., DOUCET, M., *et al.* (2007) Pharmacological effects of tiludronate in horses after long-term immobilization. *Bone* vol. 41, n° 3, p. 414-421. [<https://doi.org/10.1016/j.bone.2007.05.005>]
- DENOIX, J.-M., BONNEAU, J.-M. (2014) *Biomécanique et gymnastique du cheval*. Paris, Vigot.
- DOMNING, D.P., DE BUFFRÉNIL, V. (1991) Hydrostatics in the sirenia: quantitative data and functional interpretations. *Marine Mammal Science* vol. 7, n° 4, p. 331-368. [<https://doi.org/10.1111/j.1748-7692.1991.tb00111.x>]

- EDWARDS, J.L. (1989) Two Perspectives on the Evolution of the Tetrapod Limb. *American Zoologist* vol. 29, n° 1, p. 235-254. [<https://doi.org/10.1093/icb/29.1.235>]
- FALCAI, M.J., ZAMARIOLI, A., LEONI, G.B., *et al.* (2015) Swimming Activity Prevents the Unloading Induced Loss of Bone Mass, Architecture, and Strength in Rats. *BioMed Research International* vol. 2015, n° 1, p. 507848. [<https://doi.org/10.1155/2015/507848>]
- FISH, F.E. (2001) A mechanism for evolutionary transition in swimming mode by mammals. *In Secondary adaptation of tetrapods to life in water: Proceedings of the International Meeting, Poitiers, 1996.* München, Dr. Friedrich Pfiel., p. 261-287.
- FISH, F.E. (1996) Transitions from Drag-based to Lift-based Propulsion in Mammalian Swimming. *American Zoologist* vol. 36, n° 6, p. 628-641. [<https://doi.org/10.1093/icb/36.6.628>]
- FISH, F.E. (1993) Comparison of Swimming Kinematics between Terrestrial and Semiaquatic Opossums. *Journal of Mammalogy* vol. 74, n° 2, p. 275-284. [<https://doi.org/10.2307/1382382>]
- FISH, F.E. (1984) Mechanics, Power Output and Efficiency of the Swimming Muskrat (*Ondatra Zibethicus*). *Journal of Experimental Biology* vol. 110, n° 1, p. 183-201. [<https://doi.org/10.1242/jeb.110.1.183>]
- FISH, F.E., DINENNO, N.K., TRAIL, J. (2021) The “dog paddle”: Stereotypic swimming gait pattern in different dog breeds. *The Anatomical Record* vol. 304, n° 1, p. 90-100. [<https://doi.org/10.1002/ar.24396>]
- 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.
- GAULMIN, P., BEAUMONT, A., JACQUET, S., *et al.* (2024) Description et analyse des stratégies de nage chez 11 chevaux entraînés dans une piscine en U. *In 52ème édition des Journées et Ateliers de l'AVEF.* Tours, France, Association Vétérinaire Equine Française.
- GIRAUDET, C., MOIROUD, C., BEAUMONT, A., *et al.* (2023) Development of a Methodology for Low-Cost 3D Underwater Motion Capture: Application to the Biomechanics of Horse Swimming. *Sensors* vol. 23, n° 21, p. 8832. [<https://doi.org/10.3390/s23218832>]
- GROSSI, I., MERLUZZI, G., BECCATI, F., *et al.* (2024) Characteristics of horse gait during swimming exercise in swimming pool. *Journal of Equine Rehabilitation* vol. 2, p. 100012. [<https://doi.org/10.1016/j.eqre.2024.100012>]
- HILDEBRAND, M. (1976) Analysis of Tetrapod Gaits: General Considerations and Symmetrical Gaits. *In* Herman, R.M., Grillner, S., Stein, P.S.G., *et al.* (Éd.), *Neural Control of Locomotion, Advances in Behavioral Biology.* Boston, MA, Springer US, p. 203-236. [https://doi.org/10.1007/978-1-4757-0964-3_9]
- HILDEBRAND, M. (1965) Symmetrical Gaits of Horses. *Science* vol. 150, n° 3697, p. 701-708. [<https://doi.org/10.1126/science.150.3697.701>]
- HOBO, S., YOSHIDA, K., YOSHIHARA, T. (1998) Characteristics of Respiratory Function during Swimming Exercise in Thoroughbreds. *Journal of Veterinary Medical Science* vol. 60, n° 6, p. 687-689. [<https://doi.org/10.1292/jvms.60.687>]

- HUTCHINS, D.R., MCCLINTOCK, S.A., BROWNLOW, M.A. (1987) Use of flotation tanks for the treatment of seven cases of skeletal injury in horses. *Equine Veterinary Journal* vol. 19, n° 1, p. 73-77. [<https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.1987.tb02588.x>]
- IMAHARA, T. (1976) Swimming Pool for Horses. *Experimental Reports of Equine Health Laboratory* vol. 1976, n° 13, p. 79-82. [<https://doi.org/10.11535/jes1961.1976.79>]
- IRWIN, D.H.G., 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, 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>]
- KIM, E., KIM, T., KANG, H., *et al.* (2010) Aquatic versus land-based exercises as early functional rehabilitation for elite athletes with acute lower extremity ligament injury: a pilot study. *PM & R: the journal of injury, function, and rehabilitation* vol. 2, n° 8, p. 703-712. [<https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2010.03.012>]
- KING, M.R. (2016) Principles and Application of Hydrotherapy for Equine Athletes. *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice* 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.* (2013a) 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>]
- KING, M.R., HAUSSLER, K.K., KAWCAK, C.E., *et al.* (2013b) Effect of underwater treadmill exercise on postural sway in horses with experimentally induced carpal joint osteoarthritis *AJVR* vol. 74, n° 7, p.971-982
- KLOMP, M., MUNSTERS, C., 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>]
- KUDINA, O., DE BOER, B. (2021) Co-designing diagnosis: Towards a responsible integration of Machine Learning decision-support systems in medical diagnostics. *Journal of Evaluation in Clinical Practice* vol. 27, n° 3, p. 529-536. [<https://doi.org/10.1111/jep.13535>]
- LAFON, M. (2015) Balnéothérapie : Médecine douce, principes actifs. *Jours de Cheval* n° 8-Juillet-Août-Septembre 2015, p. 84-87.
- LEGUILLETTE, R., MCCRAE, P., MASSIE, S., *et al.* (2024) Workload and spirometry associated with untethered swimming in horses. *BMC Veterinary Research* vol. 20, n° 1, p. 327. [<https://doi.org/10.1186/s12917-024-04143-3>]
- LEVRA, G. (2009) The history of hydrotherapy in Italy. *La Presse thermale et climatique* vol. 146, p. 259-264.
- M. GHAZAL, T., ZAHID HUSSAIN, M., A. SAID, R., *et al.* (2021) Performances of K-Means Clustering Algorithm with Different Distance Metrics. *Intelligent Automation & Soft Computing* vol. 29, n° 3, p. 735-742. [<https://doi.org/10.32604/iasc.2021.019067>]

- MAREY, É.-J. (1878) La méthode graphique dans les sciences expérimentales et principalement en physiologie et en médecine. Paris, G. Masson
- MAREY, E.-J. (1873) La machine animale, locomotion terrestre et aérienne. Paris, G. Baillière
- MC CLINTOCK, 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>]
- 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>]
- MIYOSHI, T., SHIROTA, T., YAMAMOTO, S.-I., *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>]
- MOIROUD, C., GIRAUDET, C., BEAUMONT, A., *et al.* (2024) Determination of the different phases of the horse swim cycle and correlation to the limbs kinematic obtained by underwater 3D motion capture analysis: preliminary results. In *5th scientific meeting of the European College of Veterinary Sports Medicine and Rehabilitation*. Cordoba, Spain, Spain, European College of Veterinary Sports Medicine and Rehabilitation.
- MOULOODI, S., RAHMANPANA, H., GOHARI, S., *et al.* (2021) What can artificial intelligence and machine learning tell us? A review of applications to equine biomechanical research. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* vol. 123, p. 1-13. [<https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2021.104728>]
- 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 Perloritana dei Pericolanti - Classe di Scienze Medico Biologiche* 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>]
- MUYBRIDGE, E., MUYBRIDGE, E., CHAPMAN AND HALL, publisher, *et al.* (1902) Animals in motion: an electro-photographic investigation of consecutive phases of animal progressive movements. London, Chapman & Hall.
- 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.

- RATHORE, P., SHUKLA, D. (2015) Analysis and performance improvement of K-means clustering in big data environment. *In 2015 International Conference on Communication Networks (ICCN)*. Présenté à 2015 International Conference on Communication Networks (ICCN), Gwalior, India, IEEE, p. 43-46. [<https://doi.org/10.1109/ICCN.2015.9>]
- RICHARD, G., TISSEDE, 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 21/08/2024).
- SANTOSUOSSO, E., LEGUILLETTE, R., VINARDELL, T., *et al.* (2022) Kinematic Analysis During Straight Line Free Swimming in Horses: Part 2 - Hindlimbs. *Frontiers in Veterinary Science* vol. 8, n° 761500, p. 10. [<https://doi.org/10.3389/fvets.2021.761500>]
- SANTOSUOSSO, E., LEGUILLETTE, R., VINARDELL, T., *et al.* (2021) Kinematic Analysis During Straight Line Free Swimming in Horses: Part 1 - Forelimbs. *Frontiers in Veterinary Science* vol. 8, n° 752375, p. 12. [<https://doi.org/10.3389/fvets.2021.752375>]
- SHERWOOD, L., KLANDORF, H., YANCEY, P.H., *et al.* (2016) *Physiologie animale*, Louvain-la-Neuve, De Boeck Supérieur.
- SILVA, L.E., VALIM, V., PESSANHA, A.P.C., *et al.* (2008) Hydrotherapy versus conventional land-based exercise for the management of patients with osteoarthritis of the knee: a randomized clinical trial. *Physical Therapy* vol. 88, n° 1, p. 12-21. [<https://doi.org/10.2522/ptj.20060040>]
- SMITH, W.N. (1981) Use of a flotation tank to sling horses and cattle undergoing surgery to the limbs. *Australian Veterinary Journal* vol. 57, n° 10, p. 441-443. [<https://doi.org/10.1111/j.1751-0813.1981.tb05758.x>]
- SOKOLOVA, M., LAPALME, G. (2009) A systematic analysis of performance measures for classification tasks. *Information Processing & Management* vol. 45, n° 4, p. 427-437. [<https://doi.org/10.1016/j.ipm.2009.03.002>]
- 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>]
- SWANSTROM, O.G., LINDY, M. (1973) Therapeutic swimming. Présenté à Proceeding of the nineteenth Annual Convention of the AAEP American Association of Equine Practitioners, Atlanta, Georgia, p. 315-322.
- THOMAS, D.P., FREGIN, G.F., GERBER, N.H., *et al.* (1980) Cardiorespiratory adjustments to tethered-swimming in the horse. *Pflugers Archiv: European Journal of Physiology* vol. 385, n° 1, p. 65-70. [<https://doi.org/10.1007/BF00583916>]
- 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 21/08/2024).
- TOKURIKI, M., OHTSUKI, R., KAL, M., *et al.* (1999) EMG activity of the muscles of the neck and forelimbs during different forms of locomotion. *Equine Veterinary Journal* vol. 31, n° 30, 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>]

VIAL, C. (1991) Adaptation du cheval à l'effort travail et rééducation en piscine. Thèse de doctorat vétérinaire, École Nationale Vétérinaire de Toulouse.

VINCENT, A., GOIFFON, G. (1779) Mémoire artificielle des principes relatifs à la fidèle représentation des animaux. Alfort, École royale vétérinaire.

Annexe

Annexe 1 : résultats de la classification des stratégies pour tous les tours de tous les chevaux

L'annexe 1 présente les résultats de l'association pour chaque tour de la stratégie identifiée par le vétérinaire et de la catégorie calculée par l'algorithme k-means double. MG fait référence aux résultats obtenus lorsque le cheval nageait dans la piscine en U vers la gauche, et MD fait référence à la nage vers la droite. Une valeur de comparaison de 1 est attribuée lorsqu'il y a une correspondance entre la stratégie et la catégorie : S1 avec CatA (latéral), S2 avec CatB (diagonal), et S3 avec CatC et CatD (4 temps). Certains tours n'ont pas pu être analysés en raison d'une non-coordination du cheval pendant le cycle devant la caméra.

Tableau A : Résultats détaillés de la stratégie du vétérinaire et de la catégorie calculée pour le cheval n°01

Cheval #01	MG01	Pause	MD02	Pause	MD03	MD04	MD05	Tapis roulant	MG06	MG07	MG08	Tapis roulant	MD09	MD10	MD11				
Nom stratégie vétérinaire	Diagonal		Non analysé		Diagonal	Diagonal	Diagonal		Diagonal	Diagonal	Diagonal		Diagonal	Diagonal	Diagonal	Diagonal	Diagonal	Diagonal	Diagonal
Stratégie	S2		S2		S2	S2	S2		S2	S2	S2		S2	S2	S2	S2	S2	S2	S2
Catégorie	CatB		CatB		CatB	CatB	CatB		CatB	CatB	CatB		CatB	CatB	CatB	CatB	CatB	CatB	CatB
Comparaison	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				

Tableau B : Résultats détaillés de la stratégie du vétérinaire et de la catégorie calculée pour le cheval n°02

Cheval #02	MG01	Pause	MD02	Pause	MD03	MD04	MD05	Tapis roulant	MG06	MG07	MG08	Tapis roulant	MD09	MD10	MD11				
Nom stratégie vétérinaire	4 temps		4 temps		4 temps	4 temps	4 temps		4 temps	4 temps	4 temps		4 temps	4 temps	4 temps	4 temps	4 temps	4 temps	4 temps
Stratégie	S3		S3		S3	S3	S3		S3	S3	S3		S3	S3	S3	S3	S3	S3	S3
Catégorie	CatC		CatC		CatC	CatC	CatD		CatD	CatD	CatC		CatD	CatD	CatD	CatC	CatD	CatD	CatC
Comparaison	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				

Tableau C : Résultats détaillés de la stratégie du vétérinaire et de la catégorie calculée pour le cheval n°03

Cheval #03	MG01	Pause	MD02	Pause	MD03	MD04	MD05	MD06	MD07	Tapis roulant	MG08	MG09	MG10	MG11	MG12			
Nom stratégie vétérinaire	4 temps		4 temps		Lateral	4 temps	Lateral	4 temps	Lateral		4 temps	Lateral	4 temps	4 temps	4 temps	4 temps	4 temps	4 temps
Stratégie	S3		S3		S1	S3	S1	S3	S1		S3	S1	S3	S3	S3	S3	S3	S3
Catégorie	CatC		CatB		CatA	CatC	CatA	CatC	CatA		CatC	CatA	CatC	CatD	CatC	CatC	CatC	CatC
Comparaison	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			

Tableau D : Résultats détaillés de la stratégie du vétérinaire et de la catégorie calculée pour le cheval n°06

Cheval #06	MG01	Pause	MD02	Pause	MD03	MD04	MD05	MD06	MD07	Tapis roulant	MG08	MG09	MG10	MG11	MG12			
Nom stratégie vétérinaire	4 temps		4 temps		4 temps	4 temps	4 temps	4 temps	4 temps		4 temps	4 temps	4 temps	4 temps	4 temps	4 temps	4 temps	4 temps
Stratégie	S3		S3		S3	S3	S3	S3	S3		S3	S3	S3	S3	S3	S3	S3	S3
Catégorie	CatD		CatC		CatC	CatD	CatD	CatD	CatD		CatD	CatD	CatD	CatD	CatD	CatD	CatD	CatD
Comparaison	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			

Tableau E : Résultats détaillés de la stratégie du vétérinaire et de la catégorie calculée pour le cheval n°08

Cheval #08	MG01	Pause	MD02	Pause	MG03	MD04	MD05	MD06	MD07	Tapis roulant	MG08	MG09	MG10	MG11	MG12
Nom stratégie vétérinaire	Lateral		Lateral		Lateral	Lateral	Lateral	Lateral	Lateral		Lateral	Lateral	Lateral	Lateral	Lateral
Stratégie	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1
Catégorie	CatA	CatA	CatA	CatA	CatA	CatA	CatA	CatA	CatA	CatA	CatA	CatA	CatA	CatA	CatA
Comparaison	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tableau F : Résultats détaillés de la stratégie du vétérinaire et de la catégorie calculée pour le cheval n°09

Cheval #09	MG01	Pause	MD02	Pause	MD03	MD04	MD05	MD06	MD07	Tapis roulant	MG08	MG09	MG10	MG11	MG12	
Nom stratégie vétérinaire	Non analysé		Diagonal		Diagonal	Diagonal	Lateral	4 temps	4 temps		Lateral	Lateral	4 temps	4 temps	4 temps	4 temps
Stratégie		S2	S2	S2	S1	S3	S3	S1	S1	S3	S3	S3	S3	S3	S3	
Catégorie		CatB	CatB	CatB	CatC	CatC	CatC	CatC	CatC	CatC	CatC	CatC	CatC	CatC	CatC	CatC
Comparaison		1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tableau G : Résultats détaillés de la stratégie du vétérinaire et de la catégorie calculée pour le cheval n°11

Cheval #11	MG01	Pause	MD02	Pause	MD03	MD04	MD05	MD06	MD07	Tapis roulant	MG08	MG09	MG10	MG11	MG12
Nom stratégie vétérinaire	4 temps		Lateral		Lateral	Lateral	Lateral	Lateral	Lateral		Lateral	Lateral	Lateral	Lateral	Lateral
Stratégie	S3	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1
Catégorie	CatD	CatA	CatA	CatA	CatA	CatA	CatA	CatA	CatA	CatA	CatA	CatA	CatA	CatA	CatA
Comparaison	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tableau H : Résultats détaillés de la stratégie du vétérinaire et de la catégorie calculée pour le cheval n°12

Cheval #12	MG01	Pause	MD02	Pause	MD03	MD04	MD05	MD06	MD07	Tapis roulant	MG08	MG09	MG10	MG11	MG12
Nom stratégie vétérinaire	4 temps		4 temps		4 temps	4 temps	Lateral	4 temps	4 temps		4 temps	4 temps	4 temps	4 temps	4 temps
Stratégie	S3	S3	S3	S3	S1	S3	S3	S3	S3	S3	S3	S3	S3	S3	S3
Catégorie	CatC	CatC	CatC	CatC	CatC	CatA	CatC	CatC	CatC	CatC	CatC	CatC	CatC	CatC	CatC
Comparaison	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tableau I : Résultats détaillés de la stratégie du vétérinaire et de la catégorie calculée pour le cheval n°13

Cheval #13	LH01	Pause	RH02	Pause	RH03	RH04	RH05	RH06	RH07	Tapis roulant	LH08	LH09	LH10	LH11	LH12
Nom stratégie vétérinaire	Lateral		4 temps		4 temps	4 temps	Lateral	4 temps	4 temps		4 temps	Lateral	4 temps	4 temps	4 temps
Stratégie	S1	S3	S3	S3	S1	S3	S3	S3	S1	S3	S3	S3	S3	S3	S3
Catégorie	CatA	CatC	CatC	CatC	CatC	CatA	CatC	CatC	CatA	CatC	CatC	CatC	CatC	CatD	CatD
Comparaison	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tableau J : Résultats détaillés de la stratégie du vétérinaire et de la catégorie calculée pour le cheval n°14

Cheval #14	MG01		MD02		MD03	MD04	MD05	MD06	MD07		MG08	MG09	MG10	MG11	MG12
Nom stratégie vétérinaire	Lateral	Pause	Non analysé	Pause	Non analysé	Non analysé	4 temps	Lateral	Lateral	Tapis roulant	4 temps	4 temps	4 temps	4 temps	4 temps
Stratégie	S1						S3	S1	S1		S3	S3	S3	S3	
Catégorie	CatA						CatD	CatA	CatA		CatD	CatD	CatD	CatD	
Comparaison	1						1	1	1		1	1	1	1	

Tableau K : Résultats détaillés de la stratégie du vétérinaire et de la catégorie calculée pour le cheval n°15

Cheval #15	MG01		MD02		MD03	MD04	MD05	MD06	MD07		MG08	MG09	MG10	MG11	MG12
Nom stratégie vétérinaire	Diagonal	Pause	Diagonal	Pause	Diagonal	Diagonal	Diagonal	Diagonal	Diagonal	Tapis roulant	Diagonal	4 temps	4 temps	4 temps	Lateral
Stratégie	S2		S2		S2	S2	S2	S2	S2		S2				
Catégorie	CatB		CatB		CatB	CatB	CatB	CatB	CatB		CatB				
Comparaison	1		1		1	1	1	1	1		1	1	0	1	1

Analyse biomécanique de la nage chez le cheval

AUTEUR : Pauline GAULMIN

RÉSUMÉ :

L'entraînement aquatique en piscine est utilisé depuis de nombreuses années comme méthode pour maintenir la condition physique des chevaux tout en réduisant les contraintes liées aux forces de mise en charge sur les membres. Bien que l'intégration de la nage dans les programmes d'entraînement soit utilisée de façon empirique par un nombre grandissant d'entraîneurs, l'analyse biomécanique de la nage chez le cheval, et en particulier la coordination des membres, reste peu étudiée à ce jour. Cette thèse propose un cadre méthodologique original permettant l'analyse et la description des allures employées par le cheval lors de la nage.

Les résultats révèlent une séquence de mouvement commune à tous les chevaux, débutant par l'antérieur gauche, suivi du postérieur gauche, de l'antérieur droit, et enfin du postérieur droit. Cependant, la temporalité de ces mouvements varie, permettant d'identifier trois stratégies de nage distinctes : une stratégie à deux temps à recouvrement latéral, une stratégie à deux temps à recouvrement diagonal et une stratégie à quatre temps avec désynchronisation de chaque membre.

Cette variabilité pourrait s'expliquer par des facteurs intrinsèques (aptitudes naturelles, lésions) ou extrinsèques (position du virage, fatigue, entraînement). Une asymétrie droite/gauche a été observée, suggérant une influence de la direction de nage sur le schéma locomoteur. Cependant, bien que ces styles de nage partagent certaines ressemblances avec les allures terrestres, ils se distinguent par des séquences de mouvements particulières.

En conclusion, cette étude révèle trois stratégies de nage distinctes que les chevaux peuvent utiliser exclusivement ou en alternance. Comprendre les facteurs influençant ces choix est crucial pour optimiser les programmes d'entraînement aquatique. Des études complémentaires sont nécessaires pour approfondir ces observations et leurs implications.

MOTS CLÉS :

Cheval ; Nage ; Piscine ; Biomécanique ; Rééducation ; Entraînement

JURY :

Président : Pr Fabrice AUDIGIÉ

Directeur de thèse : Pr Henry CHATEAU

Examinatrice : Dr Sandrine JACQUET

Invités : Pr Frédéric MARIN et Dr Chloé GIRAUDET

Biomechanical analysis of swimming in horses

AUTHOR: Pauline GAULMIN

SUMMARY:

Aquatic training in swimming pools has been used for many years as a method to maintain horses' physical condition while minimizing the constraints related to weight-bearing forces on their limbs. Although swimming is increasingly being incorporated into training programs by trainers on an empirical basis, the biomechanical analysis of horse swimming, particularly limb coordination, remains largely unexplored. This thesis introduces an original methodological framework that enables the analysis and description of the gaits used by horses while swimming.

The results reveal a common movement sequence across all horses, starting with the left foreleg, followed by the left hind leg, the right foreleg, and finally the right hind leg. However, the timing of these movements varies, allowing the identification of three distinct swimming strategies: a two-beat strategy with lateral overlap, a two-beat strategy with diagonal overlap, and a four-beat strategy characterized by desynchronization of each limb.

This variability could be explained by intrinsic factors (such as natural abilities or injuries) or extrinsic factors (such as turn position, fatigue or training). A right/left asymmetry was observed, suggesting that the direction of swimming may influence the locomotor pattern. Although these swimming styles share some similarities with terrestrial gaits, they are distinguished by their unique movement sequences.

In conclusion, this study identifies three distinct swimming strategies that horses can use either exclusively or alternately. Understanding the factors influencing these choices is crucial for optimizing aquatic training programs. Further research is needed to deepen these observations and explore their implications.

KEYWORDS:

Horse; Swimming; Pool; Biomechanics; Rehabilitation; Training

JURY:

Chairperson: Pr Fabrice AUDIGIÉ

Thesis Director: Pr Henry CHATEAU

Reviewer: Dr Sandrine JACQUET

Guests: Pr Frédéric MARIN and Dr Chloé GIRAUDET