RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

VetAgro Sup

CAMPUS VETERINAIRE DE LYON

Année 2025 - Thèse n° 003

MISE EN PERSPECTIVE DE L'UTILISATION DES TAPIS IMMERGÉS POUR LA RÉHABILITATION DE L'ATHLÈTE ÉQUIN

THESE

Présentée à l'Université Claude Bernard Lyon 1
(Médecine – Pharmacie)

Et soutenue publiquement le 23 janvier 2025
Pour obtenir le titre de Docteur Vétérinaire

Par

DELACHARLERIE Aurore

UNIVERSITÉ DE LYON

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

VetAgro Sup

CAMPUS VETERINAIRE DE LYON

Année 2025 - Thèse n° 003

MISE EN PERSPECTIVE DE L'UTILISATION DES TAPIS IMMERGÉS POUR LA RÉHABILITATION DE L'ATHLÈTE ÉQUIN

THESE

Présentée à l'Université Claude Bernard Lyon 1
(Médecine – Pharmacie)

Et soutenue publiquement le 23 janvier 2025
Pour obtenir le titre de Docteur Vétérinaire

Par

DELACHARLERIE Aurore

UNIVERSITÉ DE LYON

Liste des enseignants du Campus vétérinaire de Lyon (29/08/2024)

Mme	ABITBOL	Marie	Professeur
M.	ALVES-DE-OLIVEIRA	Laurent	Maître de conférences
Mme	ARCANGIOLI	Marie-Anne	Professeur
Mme	AYRAL	Florence	Maître de conférences
Mme	BECKER	Claire	Professeur
Mme	BELLUCO	Sara	Maître de conférences
Mme	BENAMOU-SMITH	Agnès	Maître de conférences
M.	BENOIT	Etienne	Professeur
M.	BERNY	Philippe	Professeur
Mme	BLONDEL	Margaux	Maitre de conférences
M.	BOURGOIN	Gilles	Maître de conférences
Mme	BRASSARD	Colline	Maitre de conférences (stagiaire)
M.	BRUTO	Maxime	Maître de conférences
M.	BRUYERE	Pierre	Maître de conférences
M.	BUFF	Samuel	Professeur
M.	BURONFOSSE	Thierry	Professeur
M.	CACHON	Thibaut	Maître de conférences
M.	CADORÉ	Jean-Luc	Professeur
Mme	CALLAIT-CARDINAL	Marie-Pierre	Professeur
Mme	CANNON	Leah	Maître de conférences (stagiaire)
M.	CHABANNE	Luc	Professeur
Mme	CHALVET-MONFRAY	Karine	Professeur
M.	CHANOIT	Guillaume	Professeur
M.	CHETOT	Thomas	Maître de conférences
Mme	DE BOYER DES ROCHES	Alice	Professeur
Mme	DELIGNETTE-MULLER	Marie-Laure	Professeur
Mme	DJELOUADJI	Zorée	Professeur
Mme	ESCRIOU	Catherine	Maître de conférences
M.	FRIKHA	Mohamed-Ridha	Maître de conférences
M.	GALIA	Wessam	Maître de conférences
M.	GILLET	Benoit	Maître de conférences
Mme	GILOT-FROMONT	Emmanuelle	Professeur
M.	GONTHIER	Alain	Maître de conférences
Mme	GREZEL	Delphine	Maître de conférences
Mme	HUGONNARD	Marine	Maître de conférences
Mme	JEANNIN	Anne	Inspecteur en santé publique vétérinaire
Mme	JOSSON-SCHRAMME	Anne	Chargée d'enseignement contractuelle
M.	JUNOT	Stéphane	Professeur
M.	KODJO	Angeli	Professeur
Mme	KRAFFT	Emilie	Maître de conférences
Mme	LAABERKI	Maria-Halima	Maître de conférences
Mme	LAMBERT	Véronique	Maître de conférences
Mme	LE GRAND	Dominique	Professeur
Mme	LEBLOND	Agnès	Professeur
Mme	LEDOUX	Dorothée	Maître de conférences
M.	LEFEBVRE	Sébastien	Maître de conférences
Mme	LEFRANC-POHL	Anne-Cécile	Maître de conférences
M.	LEGROS	Vincent	Maître de conférences
M.	LEPAGE	Olivier	Professeur
Mme	LOUZIER	Vanessa	Professeur
M.	LURIER	Thibaut	Maître de conférences

M.	MAGNIN	Mathieu	Maître de conférences
M.	MARCHAL	Thierry	Professeur
Mme	MOSCA	Marion	Maître de conférences
M.	MOUNIER	Luc	Professeur
Mme	PEROZ	Carole	Maître de conférences
M.	PIN	Didier	Professeur
Mme	PONCE	Frédérique	Professeur
Mme	PORTIER	Karine	Professeur
Mme	POUZOT-NEVORET	Céline	Professeur
Mme	PROUILLAC	Caroline	Professeur
M.	RACHED	Antoine	Maitre de conférences
Mme	REMY	Denise	Professeur
Mme	RENE MARTELLET	Magalie	Maître de conférences
M.	ROGER	Thierry	Professeur
M.	SAWAYA	Serge	Maître de conférences
M.	SCHRAMME	Michael	Professeur
Mme	SERGENTET	Delphine	Professeur
Mme	STORCK	Fanny	Professeur
M.	TORTEREAU	Antonin	Maître de conférences
Mme	VICTONI	Tatiana	Maître de conférences
M.	ZENNER	Lionel	Professeur

Remerciements au jury

À Monsieur le Professeur Jean-Luc CADORÉ,
De VetAgro Sup, Campus vétérinaire de Lyon,
Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence de ce jury de thèse,
Mes sincères remerciements et mes hommages respectueux.

À Monsieur le Professeur Olivier LEPAGE,
De VetAgro Sup, Campus vétérinaire de Lyon,
Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'encadrer cette thèse,
Pour l'intérêt porté à ce travail, votre aide précieuse et votre bienveillance,
Mes remerciements chaleureux.

À Monsieur le Professeur Michael SCHRAMME,
De VetAgro Sup, Campus vétérinaire de Lyon,
Pour m'avoir fait l'honneur de prendre part au jury de cette thèse,
En représentant le Professeur Lepage le jour de ma soutenance,
Mes sincères remerciements.

À Monsieur le Professeur Thierry ROGER,
De VetAgro Sup, Campus vétérinaire de Lyon,
Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'évaluer ce travail,
Avec toute ma gratitude et mes plus sincères remerciements.

Table des matières

Table des annexes 15
Table des figures 17
Table des tableaux 21
Liste des abréviations 25
Introduction 27
Chapitre 1 – Propriétés physiques de l'eau et mécanismes d'action de la thérapie aquatique 29
I. Densité et flottabilité 29
1. Généralités 29
2. Applications de la flottabilité 30
2.1. Réduction du Poids apparent et des forces verticales de réaction du sol chez l'Homme 30
2.2. Réduction du Poids apparent chez le chien 31
2.3. Réduction du Poids apparent chez le cheval 32
2.4. Intérêts de la flottabilité 34
II. Viscosité et force de trainée 35
1. Généralités 35
2. Intérêts de la force de trainée 36
III. Pression hydrostatique 38
1. Généralités 38
2. Intérêts de la pression hydrostatique 38
2.1. Fonction neuromusculaire et perception de la douleur 38
2.1.1. Récepteurs articulaires 38
2.1.2. Récepteurs sensitifs cutanés 39
2.2. Diminution de l'œdème 40
2.3. Augmentation du flux sanguin musculaire 40
IV. Température 42
1. Généralités 42
1.1. Transferts thermiques 42
1.1.1. Rayonnement 42
1.1.2. Conduction 42
1.1.3. Convection 43
1.1.4. Évaporation 44
1.2. Capacité thermique 45
1.3. Intervalles de température 45
1.3.1. Neutralité thermique 45

1.3.2. Au cours de l'exercice ... 46
2. Applications des variations de température ... 47
2.1. Thermothérapie ... 47
2.2. Cryothérapie ... 47
2.2.1. Modulation de la réponse inflammatoire ... 47
2.2.2. Diminution de la conduction nerveuse ... 51
2.3. Choix de la température ... 52
V. Osmolarité ... 53
Chapitre 2 – Adaptations physiologiques au déconditionnement physique et à l'immobilisation ... 55
I. Modifications cardiovasculaires ... 55
1. Chez l'Homme ... 55
2. Chez le cheval ... 56
II. Modifications musculaires et métaboliques ... 60
1. Chez l'Homme ... 60
2. Chez le cheval ... 60
III. Ostéopénie de non utilisation ... 63
1. Généralités ... 63
2. Chez le cheval ... 65
IV. Modifications des propriétés tendineuses ... 67
1. Généralités ... 67
2. Chez le rat ... 67
3. Chez l'Homme ... 67
4. Chez le cheval ... 68
V. Modifications au niveau de l'articulation ... 70
1. Physiologie du cartilage articulaire ... 70
2. Étude de l'immobilisation articulaire ... 71
2.1. Chez l'Homme ... 71
2.2. Chez le cheval ... 72
VI. Contracture articulaire ... 74
1. Généralités ... 74
2. Chez le rat ... 74
3. Chez le cheval ... 75
VII. Inhibition musculaire arthrogénique ... 77
1. Généralités ... 77
2. Exemple suite à une rupture du ligament croisé antérieur chez l'Homme ... 78
3. Exemple lors de développement d'ostéoarthrose ... 80
Conclusion partielle ... 81

Chapitre 3 – Thérapie aquatique pour la réhabilitation des athlètes, application à l'espèce humaine 83

I. Présentation générale des différents principes de la réhabilitation de l'athlète 86

II. Diminution de la douleur, du gonflement et amélioration de l'amplitude du mouvement articulaire 88

1. Gonflement articulaire 88
2. Diminution de la douleur 88
3. Diminution des efforts mécaniques sur les structures anatomiques 88
4. Amélioration de l'amplitude du mouvement articulaire 89
5. Application aux lésions des sportifs 89

III. Rétablissement du cycle de marche normal 92

IV. Récupération de la proprioception 94

1. Définitions 94
2. Application aux lésions des sportifs 94
3. Mécanismes d'action du milieu aquatique sur le travail de la proprioception 96

V. Maintenance et récupération de la force et de l'endurance musculaire 98

1. Activation musculaire des membres inférieurs en milieu aquatique ou terrestre 98
2. Évolution de la force et de l'activité musculaire lors d'entrainement en milieu aquatique ou terrestre 98
3. Propriétés physiques de l'eau pour le travail musculaire 100

VI. Maintien et développement de la fonction cardiorespiratoire 101

1. Évaluation de l'intensité et prescription de l'exercice aquatique 101
2. Course en eau profonde *(« deep-water running », DWR)* 102
3. Course en eau peu profonde *(« shallow-water running », SWR)* 103
4. Course sur tapis immergé 104
5. Applications aux lésions des sportifs 105

VII. Entrainement à la qualité et coordination des mouvements 108

1. Introduction précoce du réentrainement aux mouvements 108
2. Renforcement de l'activation neuromusculaire 109

VIII. Introduction précoce de l'entrainement pliométrique 111

1. Notion de performance neuromusculaire 111
2. Définitions de l'entrainement pliométrique 111
3. La pliométrie en milieu aquatique 112

IX. Récupération entre les sessions et gestion de la charge optimale des exercices 114

1. Théorie de la surcompensation 114
2. Stratégies de récupération 114
   2.1. Objectifs 114
   2.2. Récupération aquatique par immersion 115

2.2.1. Mécanismes d'action 115
2.2.2. Techniques d'immersion 115
2.3. Course en eau profonde 116
3. Optimisation de la charge de travail 117
X. Retour au sport 118
XI. Application : Exemple d'un protocole de réhabilitation aquatique suite à une chirurgie de reconstruction du ligament croisé antérieur chez des athlètes 119
1. Généralités 119
2. Construction d'un programme de réhabilitation 120
2.1. Stade 1 – Phase précoce de la réhabilitation 121
2.2. Stade 2 – Phase intermédiaire de la réhabilitation 121
2.3. Stade 3 – Phase finale de la réhabilitation 122
2.4. Stade 4 – Retour au sport 123
XII. Application de la thérapie aquatique pour la prise en charge de l'ostéoarthrose 124
1. Généralités 124
2. Intérêts du milieu aquatique 125
Conclusion partielle 127
Chapitre 4 – Les tapis immergés pour la réhabilitation de l'athlète équin 129
I. Caractéristiques techniques, fonctionnement, et entretien des principaux tapis immergés disponibles actuellement chez les équidés 133
II. Analyse de la locomotion équine sur tapis immergé 136
1. Analyse cinématique du mouvement dans l'eau 136
1.1. Variations de l'amplitude du mouvement des articulations des membres lors d'immersion 136
1.1.1. Augmentation de la profondeur de l'eau à vitesse constante 139
1.1.2. Augmentation de la vitesse à profondeur d'eau constante 141
1.2. Variations de l'amplitude du mouvement du dos 142
1.2.1. Effets de la profondeur d'immersion et de la vitesse sur l'amplitude du mouvement en flexion-extension, flexion latérale et rotation axiale de la région thoraco-lombaire 146
1.2.2. Effets de la profondeur d'immersion et de la vitesse sur les déplacements dorso-ventraux, crânio-caudaux et médio-latéraux de la ligne médiane (de la nuque au sacrum) et du bassin 149
1.2.3. Interprétation de la réponse cinématique du dos à la démarche adoptée sur tapis immergé 150
1.3. Variations des mouvements de protraction et rétraction des membres lors de marche sur tapis immergé 151
1.3.1. Réponses à l'augmentation de la hauteur de l'eau 152
1.3.2. Réponse à l'augmentation de la vitesse 153
2. Analyse cinétique du mouvement dans l'eau 154

2.1. Forces de réaction du sol 154
2.2. Étude des paramètres d'accélérométrie 156
2.2.1. Paramètres spatiotemporels de la foulée : fréquence, longueur et durée de la foulée 158
2.2.2. Paramètres énergétiques de la foulée 160
3. Effets du travail sur tapis immergé sur la démarche terrestre 163
3.1. Effets immédiats après une session de travail sur tapis immergé 163
3.2. Effets sur le long terme 164
III. Physiologie du cheval sur tapis immergé 166
1. Définition des paramètres d'évaluation de la condition physique (fitness) et de la charge de travail 166
1.1. La consommation d'oxygène maximale ou capacité maximale aérobie 166
1.2. La fréquence cardiaque 167
1.3. La concentration sanguine en lactates 167
2. Variations des différents paramètres physiologiques du cheval sur tapis immergé en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse 168
2.1. Fréquence cardiaque 168
2.2. Paramètres de la ventilation 171
2.3. Consommation en oxygène 173
2.4. Paramètres métaboliques 174
3. Adaptations physiologiques chroniques à l'exercice sur tapis immergé 177
3.1. Composante cardiovasculaire 177
3.2. Composantes osseuse et cartilagineuse 180
3.3. Composante musculaire 180
4. Effets de la température de l'eau sur certains paramètres physiologiques 181
4.1. Fréquence cardiaque 181
4.2. Concentration sanguine en lactates 182
IV. Recrutement musculaire lors de marche sur tapis immergé 183
1. Mesure de l'activité musculaire 183
1.1. Études chez le chien 183
1.2. Études chez le cheval 185
2. Développement musculaire 187
V. Réhabilitation aquatique du cheval 189
1. Rappel de l'intérêt des propriétés physiques de l'eau 189
2. Résumé des propriétés de l'exercice sur tapis immergé 190
3. Applications du tapis immergé à la réhabilitation 191
3.1. État des lieux des affections prises en charge par l'intégration du tapis immergé aux programmes de réhabilitation 191

3.2. Lésions articulaires 193
3.3. Lésions tendineuses et ligamentaires 194
3.3.1. Tendon du muscle fléchisseur superficiel du doigt (SDFT) 194
3.3.2. Tendon du muscle fléchisseur profond du doigt (DDFT) 195
3.3.3. Ligament suspenseur du boulet 195
3.4. Dorsalgies 196
3.5. Fractures 197
3.6. Maintien des conditions cardiorespiratoire et musculaire 198
3.7. Prévention de la fourbure d'appui du membre sain controlatéral lors d'immobilisation d'un membre 198
3.8. Équilibre psychologique du cheval 199
4. L'ostéoarthrose chez l'athlète équin 201
4.1. Stabilité posturale 202
4.2. Étude biomécanique 205
4.3. Modifications articulaires 206
4.4. Intérêt préventif 207
5. Exemples de mise en pratique de la réhabilitation sur tapis immergé 208
5.1. Réhabilitation suite au retrait d'un fragment ostéochondral chez des chevaux de course 208
5.2. Réhabilitation suite à une fracture 209
5.3. Réhabilitation suite à une lésion tendineuse légère à modérée 211
6. Contre-indications et précautions à la thérapie aquatique 212
VI. Mise en pratique : fonctionnement d'un centre de réhabilitation équine (Haras de la Belletière) – Cas clinique 213
1. Présentation générale 213
2. Réhabilitation physique d'un athlète 215
2.1. En phase post-traumatique 215
2.2. En phase de préparation physique 220
3. Cas clinique – Exemple d'introduction d'une technique de thérapie aquatique dans le programme de réhabilitation d'un cheval avec une tendinite du tendon du muscle fléchisseur superficiel du doigt 221
3.1. Signalement et anamnèse 221
3.2. Évaluation initiale au 7 novembre 2023 221
3.3. Réévaluation au 15 janvier 2024 223
3.4. Réévaluation au 5 mars 2024 224
3.5. Réévaluation au 5 avril 2024 225
3.6. Réévaluation au 16 avril 2024 226
3.7. Réévaluation au 30 mai 2024 227

3.8. Poursuite du programme de réhabilitation 229
3.9. Commentaires 229
VII. Construction d'un protocole de réhabilitation 230
1. Quels protocoles sont aujourd'hui utilisés ? 230
1.1. Préparation du cheval pour la session et l'après-session 230
1.1.1. Avant une session 230
1.1.2. Après une session 231
1.2. Habituation du cheval 231
1.2.1. Contention 231
1.2.2. Introduction à l'exercice 231
1.3. Risques associés à l'utilisation des tapis immergés 232
2. Pertinence de la construction d'un protocole fixe sur tapis immergé : problèmes de variations individuelles et souvent d'association de plusieurs affections musculosquelettiques 233
3. Paramètres de construction d'un protocole 234
3.1. État des lieux des différents paramètres de protocoles 234
3.2. Paramètres généraux 235
4. Méthodes d'évaluation d'un protocole sur tapis immergé 237
4.1. Mesure de la fréquence cardiaque et du temps de récupération cardiaque 237
4.2. Contrôle du mouvement sur le tapis immergé 237
4.3. Activité plasmatique de la créatinine kinase 239
4.4. Évaluation quantitative de la régression de la lésion 239
4.5. Exemple de critères de contrôle au sein d'un programme de réhabilitation sur tapis immergé pour une lésion tendineuse légère à modérée 240
Conclusion partielle 241
Conclusion 243
Bibliographie 245
Annexes 265

Table des annexes

Annexe 1 : Objectifs de l'entrainement et types d'exercices aquatiques associés pour l'athlète humain, *d'après Thein et Brody (1998)*..... 265

Annexe 2 : Exemple de programme de réhabilitation de l'athlète après une chirurgie de reconstruction du ligament croisé antérieur du genou intégrant la thérapie aquatique – Exercices spécifiques, critères d'entrée pour chaque stade, *d'après Buckthorpe, Pirotti, et Villa (2019).* 267

Annexe 3 : Caractéristiques des principaux tapis immergés présents sur le marché au niveau européen et international, *source : Delacharlerie Aurore.* 269

Annexe 4 : Protocoles des différentes études sur l'utilisation des tapis immergés chez le cheval, *source : Delacharlerie Aurore*. 282

Annexe 5 : Exemple de programme de réhabilitation sur tapis immergé utilisé à l'Université du Tennessee en 2011 par Adair pour une lésion tendineuse légère à modérée, *source : Delacharlerie Aurore.* 288

Annexe 6 : Guide pour l'utilisation des tapis immergés, recensant les différents paramètres pour la construction de protocoles de réhabilitation, proposé par l'Université de Hartpury. 289

Table des figures

Figure 1 : Bilan des forces s'appliquant sur un corps solide immergé dans un liquide en équilibre, *source : Delacharlerie Aurore.* 30
Figure 2 : Points de référence utilisés dans l'étude menée par McClintock, Hutchins et Brownlow en 1987, *d'après McClintock, Hutchins, et Brownlow (1987).* 32
Figure 3 : Moyenne ± écart-type du pourcentage de réduction du poids apparent du cheval pour chaque point de référence, *d'après McClintock, Hutchins, et Brownlow (1987).* 33
Figure 4 : Schéma illustrant la différence de pression entre deux points A et B dans un fluide incompressible, *source : Delacharlerie Aurore.* 38
Figure 5 : Exemple de bottes commerciales en caoutchouc (Soft-Ride Ice Spa Pro®) à gauche et en polychlorure de vinyle (Jack's Whirlpool Boots®) à droite, *source : Lavado, Lewis, et Montgomery (2023)*. 49
Figure 6 : Exemple de sacs en polychlorure de vinyle fixés au cheval avec du *duct tape*, *source : Lavado, Lewis, et Montgomery (2023)*. 49
Figure 7 : Exemple d'une poche de perfusion découpée puis fixée au cheval avec du Tensoplast®, *source : van Eps et Orsini (2016).* 49
Figure 8 : Baignoire de bois contenant de l'eau à hauteur du carpe, *source : van Eps et Pollitt (2009).* 50
Figure 9 : Exemple d'une botte commerciale permettant l'application de trois packs de glace au niveau du sabot et du paturon*, source : Morgan et al. (2018)*. 50
Figure 10 : Prototype d'une méthode de refroidissement à contact « sec », *source : van Eps et Orsini (2016).* 51
Figure 11 : Modèle schématique des voies moléculaires impliquées dans le processus d'ostéopénie de non utilisation, *d'après Rolvien et Amling (2022).* 64
Figure 12 : Dessin schématique représentant les mécanismes de la chondrogenèse induite mécaniquement, d*'après O'Conor, Case, et Guilak (2013) et van Weeren (2016).* 71
Figure 13 : Photographie d'un rat avec le dispositif d'immobilisation du genou en extension en place, *source : Zhou et al. (2023)*. 75
Figure 14 : Diagramme résumant les mécanismes proposés contribuant à l'inhibition musculaire arthrogénique*, d'après Rice et McNair (2010).* 78
Figure 15 : Illustration de course en eau profonde à hauteur des épaules, *source : Delacharlerie Aurore.* 84
Figure 16 : Illustration de course en eau peu profonde à hauteur de la taille, *source : Delacharlerie Aurore.* 84
Figure 17 : Illustrations de course sur tapis immergé, *source : HydroWorx.* 85
Figure 18 : (E) Exercice de marche sur terre et (F) adaptation dans l'eau sur tapis immergé, *source : Kim et al. (2010).* 90
Figure 19 : Détails du protocole conventionnel (Groupe 1) et du protocole aquatique (Groupe 2), *d'après Peultier-Celli et al. (2017).* 91
Figure 20 : Plateforme de posturographie pour analyse du contrôle postural*, source : Peultier-Celli et al. (2017).* 96
Figure 21 : Posturographie – Trajet du centre de pression du pied, lorsque le sujet a les yeux ouverts (bleu) et fermés (rouge), *source : Peultier-Celli et al. (2017).* 96
Figure 22 : Exemple d'exercice pliométrique réalisé dans l'eau, *source : Buckthorpe, Pirotti, et Villa (2019).* 112
Figure 23 : Utilisation de la thérapie aquatique dans le processus de réhabilitation après ACLR, *d'après Buckthorpe, Pirotti, et Villa (2019).* 120

Figure 24 : Étapes d'une session d'exercice sur tapis immergé pour la réhabilitation de patients avec arthrose de la hanche ou du genou*, d'après Bressel et al. (2014).* 126
Figure 25 : Photographie d'un tapis immergé, *source : ecb Aqua Treadmill.* 129
Figure 26 : Photographie d'un tapis immergé, *source : ecb Aqua Treadmill.* 130
Figure 27 : Photographie d'un tapis immergé, *source : ecb Aqua Treadmill.* 130
Figure 28 : Photographie d'une piscine circulaire. 131
Figure 29 : Photographie d'un marcheur aquatique, *source : Equine Health Centre Seawalker.* 132
Figure 30 : Photographie d'un marcheur aquatique, *source : Equine Health Centre Seawalker.* 132
Figure 31 : Cycle de la foulée du membre antérieur droit chez le cheval, *d'après Eric Barrey (2014).* 136
Figure 32 : Illustration de la disposition des marqueurs pour la mesure des angles articulaires des membres, *source : Nankervis et al. (2023).* 136
Figure 33 : Hauteurs d'eau jusqu'auxquelles une augmentation de la flexion des articulations est observée (à adapter aux variations individuelles), *source : Delacharlerie Aurore.* 141
Figure 34 : (A) Visualisation des mouvements de base du dos à travers les rotations d'une vertèbre autour des trois axes d'un système de coordonnées orthogonales. (B) Visualisation des trois mouvements de base du dos du cheval : flexion-extension, latéroflexion, rotation axiale. *D'après van Weeren (2018).* 142
Figure 35 : Illustration des différents facteurs influençant la mobilité du dos selon le « *bow and string concept* », *d'après van Weeren (2018).* 143
Figure 36 : Illustration de la disposition des marqueurs sur le cheval pour la mesure des angles articulaires et des mouvements du squelette axial, *source : Nankervis et al. (2023).* 144
Figure 37 : Récapitulatif de la réponse des différentes régions du dos à l'augmentation de la hauteur de l'eau lors de marche sur tapis immergé, *source : Delacharlerie Aurore.* 148
Figure 38 : Illustration de l'angle de rétraction (negative Θ) sur le membre antérieur droit et de l'angle de protraction (positive Θ) sur le membre postérieur gauche donnés par rapport à la verticale et à l'axe du membre, *source : Nankervis et Lefrancois (2018).* 152
Figure 39 : Exemple de graphique représentant les mesures prises par l'accéléromètre placé au niveau du sabot durant un exercice sur tapis immergé à quatre hauteurs d'eau (sec, mi-canon, carpe, grasset) à une vitesse de 1,39 m/s, *d'après Greco-Otto et al. (2019).* 154
Figure 40 : Exemple de graphique représentant les pics d'accélération du sabot, canon et radius aux quatre hauteurs d'eau (sec, mi-canon, carpe, grasset) pour une vitesse de 0,83 m/s, *d'après Greco-Otto et al. (2019).* 155
Figure 41 : Axes anatomiques chez le cheval, *source : Delacharlerie Aurore.* 157
Figure 42 : Représentation de la position des accéléromètres (en orange) pour l'étude menée par Saitua *et al.* en 2020*, source : Saitua et al. (2022).* 160
Figure 43 : Bilan graphique de l'évolution des paramètres physiologiques du cheval lors de marche sur tapis immergé à vitesse constante et pour différents niveaux d'immersion, d'après les résultats des études menées par Greco-Otto *et al.* en 2017 et 2020. *Source : Delacharlerie Aurore.* 176
Figure 44 : Exemple d'une image thermique de l'arrière main d'un cheval, *source : Yarnell et al. (2014).* 187
Figure 45 : Anatomie de l'extrémité distale du membre antérieur du cheval, *d'après Smith et Goodship (2008).* 194
Figure 46 : Photographie d'un cheval en position normale au carré sur deux plateformes de force (une pour les membres antérieurs et une pour les postérieurs) avec un bandeau sur les yeux pour le retrait des informations visuelles, pour la mesure du balancement postural en position statique, *source : King et al. (2013b).* 203
Figure 47 : Photographie d'un cheval en immersion dans la rivière, *source : Delacharlerie Aurore...* 213
Figure 48 : Photographie d'un cheval sur le plateau vibrant avec solarium, *source : Delacharlerie Aurore.* 214

Figure 49 : Photographie d'un cheval sur tapis à sec, *source : Delacharlerie Aurore.* 214
Figure 50 : Photographie d'un cheval sur tapis à sec, *source : Delacharlerie Aurore.* 214
Figure 51 : Photographie d'un cheval sur tapis immergé, *source : Delacharlerie Aurore.* 216
Figure 52 : Photographies de chevaux sur tapis immergé, *source : Delacharlerie Aurore.* 217
Figure 53 : Photographie montrant l'apparition de croûtes en face palmaire du paturon suite à des immersions répétées, *source : Delacharlerie Aurore.* 219
Figure 54 : Photographie du harnais pour la collection des crottins lors du travail sur tapis immergé, *source : Delacharlerie Aurore.* 219
Figure 55 : Enrênement en col de cygne – longe bleue qui passe des deux côtés du mors et au-dessus de la nuque, *source : Delacharlerie Aurore.* 220
Figure 56 : Échographie en coupe transversale de la déformation en région palmaire moyenne du troisième métacarpe gauche à deux jours post-lésion, *d'après le Haras de la Belletière*. 221
Figure 57 : Échographie en coupe transversale de la déformation en région palmaire moyenne du troisième métacarpe gauche à deux mois post-lésion*, d'après le Haras de la Belletière*. 223
Figure 58 : Échographie en coupe transversale de la déformation en région palmaire moyenne du troisième métacarpe gauche à quatre mois post-lésion*, d'après le Haras de la Belletière*..... 224
Figure 59 : Échographie en coupe transversale de la déformation en région palmaire moyenne du troisième métacarpe gauche à cinq mois post-lésion*, d'après le Haras de la Belletière*..... 225
Figure 60 : Échographie en coupe transversale de la déformation en région palmaire moyenne du troisième métacarpe gauche à cinq mois et une semaine post-lésion*, d'après le Haras de la Belletière*. 226
Figure 61 : Photographie de Pajaro sur tapis immergé, *source : Delacharlerie Aurore.* 227
Figure 62 : Aspect visuel de la déformation en relief dans la région palmaire moyenne du canon antérieur gauche de Pajaro à six mois et demi post-lésion, *source : Delacharlerie Aurore.* 228
Figure 63 : Échographie en coupe transversale de la déformation en région palmaire moyenne du troisième métacarpe gauche à six mois et demi post-lésion*, d'après le Haras de la Belletière*..... 228
Figure 64 : Positions du cheval sur tapis immergé, *source :* Equine Hydrotherapy Working Group (2020). 239

Table des tableaux

Tableau I : Pourcentage de réduction du Poids apparent du corps lors d'immersion à différentes hauteurs d'eau, *d'après Harrison et Bulstrode (1987).* 30
Tableau II : Pic des forces verticales de réaction du sol lors de course dans l'eau à différents niveaux d'immersion et vitesses, *d'après Haupenthal et al. (2013).* 31
Tableau III : Pourcentage de réduction du Poids apparent des chiens en fonction de la hauteur d'immersion dans l'eau, *d'après Levine et al. (2010).* 31
Tableau IV : Pourcentage de réduction du Poids apparent des chevaux en fonction de la hauteur d'immersion dans l'eau salée à 9 g/L, *d'après McClintock, Hutchins, et Brownlow (1987)*. 33
Tableau V : Evolution de la viscosité dynamique de l'eau en fonction de la température, *d'après Kestin, Sokolov, et Wakeham (1978).* 35
Tableau VI : Exemples de valeurs numériques pour le coefficient d'échange convectif h, *source : Mergui (2023).* 44
Tableau VII : Températures d'immersion pour différents objectifs thérapeutiques chez l'Homme, *d'après Becker (2009).* 52
Tableau VIII : Résultats de l'étude menée par Mukai *et al.* en 2017, après 12 semaines de déconditionnement par comparaison aux valeurs post-entrainement, *source : Delacharlerie Aurore.* 57
Tableau IX : Résultats des études menées par Serrano, Quiroz-Rothe, et Rivero (2000) et McGowan *et al.* (2002), sur la réponse des paramètres musculaires et métaboliques à l'entrainement puis au déconditionnement, *source : Delacharlerie Aurore.* 61
Tableau X : Rapport des forces isocinétiques des muscles quadriceps du genou avec ACLR et du genou sain, à 90°/s en fonction du temps, *d'après Heijne et Werner (2010) et Gokeler et al. (2014).* 79
Tableau XI : Comparaison de l'activation des différents groupes musculaires des membres inférieurs pour des exercices en milieu aquatique et terrestre, *d'après Silva et al. (2020).* 98
Tableau XII : Estimation de l'intensité d'un exercice cardiorespiratoire*, d'après l'American College of Sports Medicine et Liguori (2021).*..... 102
Tableau XIII : Comparaison des pics de consommation d'oxygène pour de la course en milieu aquatique ou terrestre, *source : Delacharlerie Aurore.* 107
Tableau XIV : Caractéristiques générales des principaux tapis immergés présents sur le marché international actuellement, *source : Delacharlerie Aurore.* 135
Tableau XV : Résultats des études s'intéressant aux variations de l'amplitude du mouvement des articulations des membres du cheval lors de marche sur tapis immergé, *source : Delacharlerie Aurore.* 137
Tableau XVI : Résultats des études s'intéressant aux déplacements crânio-caudal, dorso-ventral, et médio-latéral du dos du cheval lors de marche sur tapis immergé, *source : Delacharlerie Aurore.*... 144
Tableau XVII : Résultats des études s'intéressant aux mouvements du dos (RA, LB, FE) du cheval lors de marche sur tapis immergé, *source : Delacharlerie Aurore.* 145
Tableau XVIII : Résultats des études s'intéressant aux mouvements de protraction et rétraction des membres en fonction de la profondeur de l'eau et de la vitesse lors de marche sur tapis immergé, *source : Delacharlerie Aurore.* 151
Tableau XIX : Récapitulatif de la réponse en protraction et rétraction des membres du cheval à une augmentation de la hauteur de l'eau lors de marche sur tapis immergé, s*ource : Delacharlerie Aurore*. 153
Tableau XX : Description des paramètres accélérométriques, *d'après López-Sanromán et al. (2012), Barrey (2014) et Saitua et al. (2020).* 156
Tableau XXI : Résultats des études s'intéressant à l'évolution des paramètres spatiotemporels de la foulée (longueur, fréquence, durée) en fonction de la profondeur de l'eau et de la vitesse lors de marche sur tapis immergé, *source : Delacharlerie Aurore.* 158

Tableau XXII : Récapitulatif de l'évolution des paramètres spatiotemporels de la foulée (longueur, fréquence, durée) lors de marche sur tapis immergé, *source : Delacharlerie Aurore.* 159
Tableau XXIII : Description des protocoles de l'étude menée par Saitua *et al.* (2020), *source : Delacharlerie Aurore.* 160
Tableau XXIV : Caractéristiques et protocole de l'étude menée par Tranquille *et al.* (2022b), *source : Delacharlerie Aurore.* 163
Tableau XXV : Résultats des études s'intéressant à l'évolution de la fréquence cardiaque en fonction de la profondeur de l'eau et de la vitesse lors de marche sur tapis immergé, *source : Delacharlerie Aurore.* 170
Tableau XXVI : Résultats de l'étude menée par Greco-Otto *et al.* (2017) s'intéressant à l'évolution des paramètres de la ventilation en fonction de la profondeur de l'eau et de la vitesse lors de marche sur tapis immergé, *source : Delacharlerie Aurore.* 172
Tableau XXVII : Résultats des études s'intéressant à l'évolution de la consommation en oxygène en fonction de la profondeur de l'eau et de la vitesse lors de marche sur tapis immergé, *source : Delacharlerie Aurore.* 173
Tableau XXVIII : Résultats des études s'intéressant à l'évolution de la concentration plasmatique en lactates en fonction de la profondeur de l'eau et de la vitesse lors de marche sur tapis immergé, *source : Delacharlerie Aurore.* 175
Tableau XXIX : Résultats de l'étude menée par Greco-Otto *et al.* (2020), *source : Delacharlerie Aurore*. 179
Tableau XXX : Propriétés physiques de l'eau utiles pour la réhabilitation et leurs effets thérapeutiques, *d'après Muñoz et al. (2019).* 189
Tableau XXXI : Récapitulatif des modifications cinématiques, cinétiques, cardiovasculaires et musculaires induites lors d'augmentation de la hauteur de l'eau sur tapis immergé, *source : Delacharlerie Aurore.* 190
Tableau XXXII : Affections ou circonstances pour lesquelles un tapis immergé est utilisé au sein d'un programme de réhabilitation, *d'après Tranquille et al. (2018).* 192
Tableau XXXIII : Récapitulatif des indications et contre-indications à l'utilisation du tapis immergé au sein d'un programme de réhabilitation d'une affection musculosquelettique d'un membre, *source : Delacharlerie Aurore.* 200
Tableau XXXIV : Description des protocoles des études menées par King *et al.* (2013b ; 2017) sur l'effet d'un exercice sur tapis immergé sur la réhabilitation de chevaux suite à l'induction expérimentale d'une ostéoarthrose du carpe, *source : Delacharlerie Aurore.* 202
Tableau XXXV : Caractéristiques de l'étude rétrospective menée par Potenza *et al.* (2020), *source : Delacharlerie Aurore.* 208
Tableau XXXVI : Résultats des performances post chirurgie de l'étude rétrospective menée par Potenza *et al.* (2020), *source : Delacharlerie Aurore.* 209
Tableau XXXVII : Considérations générales pour la réhabilitation sur tapis immergé d'une fracture au niveau d'un membre, *d'après King, Johnson, et Daglish (2022).* 211
Tableau XXXVIII : Caractéristiques du tapis immergé utilisé au Haras de la Belletière (Horse-Trainer®), *source : Delacharlerie Aurore.* 216
Tableau XXXIX : Programme de réhabilitation mis en place suite à la tendinite de Pajaro au cours des semaines 1 à 10, *source : Delacharlerie Aurore.* 222
Tableau XL : Programme de réhabilitation mis en place suite à la tendinite de Pajaro au cours des semaines 11 à 17, *source : Delacharlerie Aurore.* 223
Tableau XLI : Programme de réhabilitation mis en place suite à la tendinite de Pajaro au cours des semaines 18 à 22, *source : Delacharlerie Aurore.* 224
Tableau XLII : Programme de réhabilitation mis en place suite à la tendinite de Pajaro au cours des semaines 24 à 30, *source : Delacharlerie Aurore.* 226

Tableau XLIII : État des lieux des valeurs utilisées lors de sessions d'entrainement ou de réhabilitation sur tapis immergé dans 41 centres, selon l'enquête menée par Tranquille *et al.* en 2018, *source : Delacharlerie Aurore.* 235
Tableau XLIV : Paramètres à prendre en considération lors du développement et de la progression du programme de réhabilitation d'un cheval sur tapis immergé, *source : Delacharlerie Aurore.* 236

Liste des abréviations

AAEP : *« American Association of Equine Practitioners »*

ACLR : *« Anterior Cruciate Ligament Reconstruction »*, chirurgie de reconstruction du ligament croisé antérieur

AL-DDFT : *« Accessory Ligament of the Deep Digital Flexor Tendon »*, ligament accessoire du tendon du muscle fléchisseur profond du doigt

ALP : isoenzyme de la Phosphatase ALcaline

AMI : Inhibition Musculaire Arthrogénique

RA : Rotation Axiale

bpm : Battement cardiaque Par Minute

CavO2 : différence artério-veineuse en oxygène

CK : Créatine phosphoKinase

CPT : Concentration en Protéines Totales

CS : Citrate Synthase

CTX-1 : C-Télopeptide du collagène de type 1 *cross-links*

CWI : *« Cold Water Immersion »*, immersion dans l'eau froide

DDFT : *« Deep Digital Flexor Tendon »*, tendon du muscle fléchisseur profond du doigt

DVD : Déplacement Dorso-Ventral

DVP : *« Dorso-Ventral Power »*, activité dorso-ventrale

DWR : *« Deep-Water Running »*, course en eau profonde

E : Efficacité en myographie acoustique

EDD : muscle Extenseur Dorsal du Doigt

FC : Fréquence Cardiaque

FCmax : Fréquence Cardiaque maximale

FE : Flexion-Extension

FR : Fréquence Respiratoire

GAG : GlycosAminoGlycane

HAD : 3-Hydroxyacyl-coenzyme A Déshydrogénase

HDC : Hypothermie Digitale Continue

IO III : muscle InterOsseux III

LB : *« Lateral Bending »*, flexion latérale

LCA : Ligament Croisé Antérieur

LDH : Lactate DésHydrogénase

LSB : Ligament Suspenseur du Boulet

LT : *« Land Treadmill »*, tapis de course à sec

RFD : *« Rate of Force Development »*, taux de développement de la force

S : amplitude du signal en myographie acoustique

SDFT : *« Superficial Digital Flexor Tendon »*, tendon du muscle fléchisseur superficiel du doigt

SWR : *« Shallow-Water Running »*, course en eau peu profonde

T : Fréquence de recrutement des fibres musculaires en myographie acoustique

TEOS-10 : *« Thermodynamic Equation Of Seawater 2010 »*, équation thermodynamique de l'eau de mer en 2010

TGF-β *: « Transforming Growth Factor-β »*

UNESCO : Organisation des Nations Unies pour l'Éducation, la Science et la Culture

v140, v170, v200, vFCmax: Vitesse que le cheval peut atteindre à des fréquences cardiaques sub-maximales (respectivement 140, 170 et 200 battements par minute) ou à Fréquence Cardiaque maximale

vLa4 : Vitesse pour laquelle la concentration sanguine en Lactates atteint 4 mmol/L

VM : Volume Minute

VO2 : consommation en Oxygène ou capacité aérobie

VO2max : consommation maximale en Oxygène ou capacité maximale aérobie

VT : Volume Tidal

vVO2max : Vitesse de course à laquelle la VO2max est atteinte

WT : *« Water Treadmill »*, tapis immergé

Introduction

Si le cheval a d'abord été gibier, puis monture de guerre, cheval de trait, bête de somme, moyen de transport, il occupe désormais une place importante en tant que compagnon de loisirs et athlète à part entière. Les exigences physiologiques et mécaniques, associées aux différentes disciplines équestres et auxquelles est soumis l'athlète équin, sont comparables à celles de l'athlète humain. Pour répondre à cette nouvelle place du cheval, se sont développés au cours des vingt dernières années les domaines de la médecine du sport et de la réhabilitation équine.

La réhabilitation est définie chez l'Homme, selon le *Medical Subject Headings,* comme l'ensemble des procédures visant à la restauration de la fonction chez une personne malade ou blessée. Une extrapolation des grandes étapes de la réhabilitation de l'athlète humain et de certains procédés peut être faite pour l'athlète équin. Néanmoins, la comparaison directe entre les exercices et techniques de mobilisation mis en place chez l'Homme et le cheval a ses limites. En effet, il est difficile d'empêcher complètement la mobilité et le support du poids du corps par un membre chez le cheval ; certains procédés de stabilisation musculosquelettique utilisés chez l'Homme pour une remise en charge précoce mais contrôlée, comme les bottes de marche orthopédique ou les béquilles par exemple, sont pratiquement inexistants chez le cheval ; de même il n'est pas possible de prescrire au cheval des exercices spontanés de renforcement, de mobilisation articulaire ou d'équilibre comme chez l'Homme. Une solution partielle à ces enjeux est l'utilisation de la thérapie aquatique, qui fait partie intégrante de la réhabilitation d'affections musculosquelettiques de nombreux sportifs. Toujours selon le *Medical Subject Headings*, elle est définie comme l'administration de physiothérapie, de sorte à promouvoir, maintenir, ou restaurer le bien-être physique et physiologique d'un individu, alors que le corps est immergé dans l'eau. Parmi les thérapies aquatiques, le tapis immergé est devenu populaire ces dernières années dans le monde équin. Pourtant, les données scientifiques disponibles à ce jour sur la réponse des chevaux à l'exercice sur tapis immergé sont limitées.

L'objectif ici est de présenter et d'apporter des réflexions sur l'intérêt de l'utilisation des tapis immergés pour la réhabilitation des athlètes équins. Il est donc important pour cela de rappeler les propriétés physiques de l'eau et leur application thérapeutique, ainsi que les adaptations physiologiques au déconditionnement et à l'immobilisation soulignant l'intérêt d'une réhabilitation précoce. L'utilité d'intégrer la thérapie aquatique aux grands principes de réhabilitation des athlètes humains est ensuite soulignée. L'étude se concentre principalement sur la réhabilitation des membres inférieurs de l'Homme, de sorte à permettre un parallèle avec le cheval. Les résultats des différentes publications existantes aujourd'hui sur la réponse biomécanique et physiologique des chevaux à l'exercice sur tapis immergé peuvent alors être mieux appréhendés et mis en perspective pour l'utilisation de cet outil dans le cadre de la réhabilitation de l'athlète équin.

Chapitre 1 – Propriétés physiques de l'eau et mécanismes d'action de la thérapie aquatique

L'environnement aquatique possède un vaste potentiel de rééducation, allant du traitement et de la réhabilitation de blessures aiguës aux atteintes chroniques, particulièrement lors d'affections musculosquelettiques. Les effets des thérapies aquatiques ont été étudiés depuis leur description par Charles Leroy Lowman en 1911[1], premier à introduire des baignoires thérapeutiques pour traiter les patients atteints de paralysie cérébrale et de spasticité. L'immersion dans l'eau a de nombreux effets biologiques, qui s'étendent à tous les systèmes homéostatiques (Pipino *et al*. 2023). La compréhension des propriétés physiques de l'eau est intéressante pour une meilleure appréhension des mécanismes d'actions de la thérapie aquatique. Les applications thérapeutiques des différentes propriétés physiques de l'eau sont énoncées dans ce chapitre de façon générale et seront détaillées davantage concernant l'athlète humain et équin dans les Chapitres 3 et 4.

I. Densité et flottabilité

1. Généralités

La **masse volumique** (ρ) d'une substance est définie par le rapport entre la masse (m) de la substance et le volume (v) qu'elle occupe, en kilogrammes par mètres cubes (kg/m^3). La masse volumique de l'eau pure vaut 1 000 kg/m^3 à la température de référence de 3,98°C.

La densité d'une substance est définie comme le rapport entre la masse volumique de cette substance et la masse volumique de l'eau. La densité de l'eau pure vaut 1.
La densité de l'eau augmente avec la quantité de substances qui y sont dissoutes (osmolarité), de sorte que la densité de l'eau de mer est supérieure à celle de l'eau pure.
Si la densité d'un corps est supérieure à 1, il aura tendance à couler dans l'eau ; alors que si sa densité est inférieure à 1, il aura tendance à flotter.
Chez l'Homme[2], la densité moyenne du corps est de 0,974, les hommes ayant une densité supérieure à celle des femmes. La masse de corps maigre, qui comprend les os, les muscles, le tissu conjonctif et les organes a une densité voisine de 1,1, alors que la masse de corps gras a une densité de 0,9 (Becker 2009).
Un animal maigre ou très musclé aura davantage tendance à couler, et devra donc faire un effort physique plus intense pour maintenir la tête hors de l'eau lors de la nage par exemple. Un animal avec beaucoup de tissu adipeux aura tendance davantage à flotter. Il faut tenir compte de ces variations individuelles lors de l'élaboration d'exercices dans l'eau.

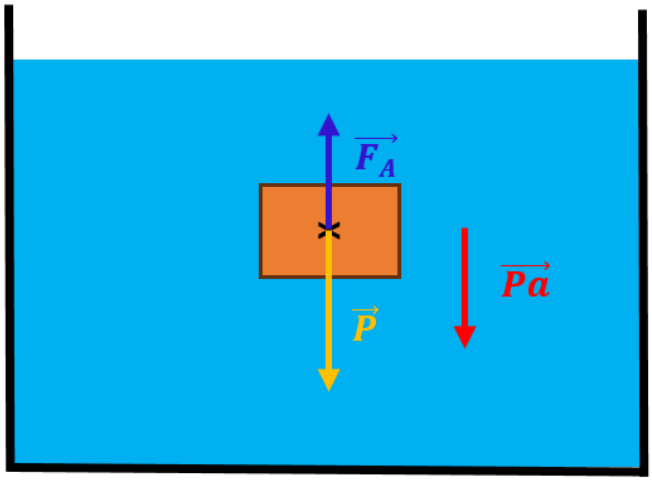
Le principe d'Archimède énonce que « tout corps plongé dans un fluide éprouve une poussée verticale, dirigée de bas en haut, égale au poids du volume de fluide qu'il déplace et appliquée au centre de gravité du fluide déplacé, ou centre de poussée », qui correspond au centre de gravité du volume de fluide déplacé. Cette force s'oppose au Poids du corps, fonction de l'intensité de la pesanteur et de la masse du corps, qui s'applique au centre de gravité du corps.

$$Force\ de\ poussée\ d'Archimède = masse\ du\ volume\ de\ fluide\ déplacé\ par\ l'objet * intensité\ pesanteur = masse\ volumique\ du\ fluide * volume\ de\ fluide\ déplacé * intensité\ pesanteur$$

[1] *deVierville J. A history of aquatic rehabilitation. In: Cole A, Becker B (eds). Comprehensive Aquatic Rehabilitation. 2nd ed. Philadelphia PA: Butterworth-Heinemann ; 2004:1-18.*
[2] *Bloomfield J, Fricker P, Fitch K. Textbook of Science and Medicine in Sport. Champaign IL: Human Kinetics Books ; 1992.*

La masse perçue du corps immergé dans l'eau est donc réduite, et cette réduction équivaut à la masse du volume d'eau déplacé.
L'équilibre de flottaison est atteint lorsque les forces de la Poussée d'Archimède et du Poids s'annulent. Un Homme avec une densité de 0,97 atteint cet équilibre quand 97 % de son volume corporel est immergé (Monk 2016).

Si les centre de gravité et de poussée sont sur la même ligne verticale, alors le corps est maintenu en équilibre. En revanche, s'ils ne sont pas sur la même ligne verticale, la résultante des deux forces crée une force tournante, qui entraine une rotation du corps jusqu'à trouver un nouveau point d'équilibre[3] (Monk 2016).



<u>Figure 1</u> : Bilan des forces s'appliquant sur un corps solide immergé dans un liquide en équilibre, *source : Delacharlerie Aurore.*
Un corps solide immergé dans un liquide en équilibre est soumis à deux forces verticales et de sens contraires : son Poids $\vec{P}$ et la Poussée d'Archimède $\overrightarrow{F_A}$. Son poids perçu est donné par son Poids apparent $\overrightarrow{Pa}$.

2. <u>Applications de la flottabilité</u>

2.1. <u>Réduction du Poids apparent et des forces verticales de réaction du sol chez l'Homme</u>

Lors d'immersion dans l'eau, **le Poids apparent** du corps diminue avec l'augmentation de la hauteur de l'eau chez l'homme et la femme, en fonction des pourcentages évalués dans le tableau I (Harrison, Bulstrode 1987).

<u>Tableau I</u> : Pourcentage de réduction du Poids apparent du corps lors d'immersion à différentes hauteurs d'eau, *d'après Harrison et Bulstrode (1987).*

	Pourcentage de réduction du Poids apparent	
Niveau d'immersion	Chez l'homme	Chez la femme
Épine iliaque antérieure et supérieure	44 à 50 %	49 à 60 %
Processus xiphoïde	63 à 70 %	69 à 75 %
7^{e} vertèbre cervicale	90 à 93 %	91 à 94 %

Exemple : Le Poids apparent d'une femme immergé à hauteur de la 7^{e} vertèbre cervicale correspond donc à 6 à 9 % de son poids corporel.

Les forces de réaction du sol ont trois composantes : le point d'application, la magnitude et la ligne d'action. La magnitude et la ligne d'action varient au cours du cycle de marche. La magnitude de la force de réaction du sol est supérieure au poids du corps durant le début et la fin de la phase d'appui,

[3] *Edlich, F.R., Towler, M.A., Goitz, R.J., et al. 1987, Bioengineering principles of hydrotherapy. J. Burn Care Rehab. 8(6): 580–584.*

inférieure durant le milieu d'appui, du fait de l'accélération vers le bas puis vers le haut du centre de masse du corps (Meadows, Bowers, Owen 2019).

Le pic des forces verticales de réaction du sol, qui s'applique sous la surface du pied, correspond en moyenne à (Haupenthal *et al*. 2013) :

- 1,2 fois le poids corporel lors de la marche sur terre ;
- 0,25 à 0,5 fois le poids corporel lors de la marche dans l'eau, à hauteur de la hanche et de la poitrine respectivement ;
- 1,6 à 4 fois le poids corporel lors de la course sur terre, selon la vitesse.

Les effets de la profondeur d'immersion, de la vitesse de course et du genre sur le pic des forces verticales de réaction du sol sont analysés par Haupenthal *et al.* en 2013, lors de la course dans l'eau, sur 20 athlètes amateurs. Les mesures sont effectuées avec une plateforme de force placée au milieu d'une piste de course de huit mètres dans une piscine, et les bras des coureurs sont croisés sur la poitrine pendant la course. L'expérience est réalisée à deux niveaux d'eau : le processus xiphoïde ou la crête iliaque ; et à deux niveaux de vitesse de course : faible (0,6 m/s ± 10 %) ou rapide (0,9 m/s ± 10 % à hauteur de la crête iliaque, 0,7 m/s ± 10 % à hauteur du processus xiphoïde).
Le pic des forces verticales de réaction du sol qui s'applique sous la surface du pied correspond alors chez l'homme et la femme en moyenne aux valeurs présentées dans le tableau II.

Tableau II : Pic des forces verticales de réaction du sol lors de course dans l'eau à différents niveaux d'immersion et vitesses, *d'après Haupenthal et al. (2013).*

		Vitesse	
		Faible	Rapide
Hauteur d'eau	Crête iliaque	0,84 (H) à 0,91 (F) fois le poids corporel	0,97 (H) à 1,16 (F) fois le poids corporel
	Processus xiphoïde	0,69 (H) à 0,87 (F) fois le poids corporel	0,73 (H) à 0,95 (F) fois le poids corporel

(H) : homme, et (F) : femme.

À retenir :
Les forces verticales de réaction du sol diminuent donc significativement avec la diminution de la vitesse et l'augmentation de la hauteur d'eau.

2.2. Réduction du Poids apparent chez le chien

Les forces verticales de réaction du sol à l'arrêt ont été comparées par Levine *et al.* (2010) chez dix chiens sur terre et dans un tapis immergé à différentes hauteurs d'eau, à l'aide d'une balance pour chaque membre. La moyenne de la somme des forces pour chacun des quatre membres permet d'estimer la réduction du Poids apparent de l'animal dans les différentes conditions (Tableau III).

Tableau III : Pourcentage de réduction du Poids apparent des chiens en fonction de la hauteur d'immersion dans l'eau, *d'après Levine et al. (2010).*

Hauteur d'eau	Pourcentage de réduction du Poids apparent
Articulation du tarse (malléole latérale)	9 %
Articulation du grasset (épicondyle fémoral latéral)	15 %
Articulation de la hanche (grand trochanter)	62 %

Les forces verticales de réaction du sol apparaissent significativement supérieures au niveau des membres thoraciques par rapport aux membres pelviens avant immersion et pour les trois niveaux d'immersion. Les chiens placent entre 63 à 64 % de leur poids corporel sur les membres thoraciques avant immersion et pour un niveau d'eau au tarse et au grasset. En revanche, le rapport augmente

significativement pour l'immersion à la hanche, avec 71 % du poids du corps placé sur les membres thoraciques. Néanmoins, les forces verticales de réaction du sol qui s'appliquent sur les membres thoraciques restent inférieures pour l'eau au niveau des hanches par rapport aux niveaux d'eau inférieurs.

2.3. Réduction du Poids apparent chez le cheval

La réduction du Poids apparent du cheval suite à une immersion partielle dans l'eau a été étudiée par McClintock, Hutchins, et Brownlow en 1986(a) et 1987 à l'aide d'une cuve de flottaison remplie d'eau salée à 9 grammes par litre, à une température maintenue à 36 ± 1 °C. La détermination du Poids apparent (Pa) suite à une immersion partielle, est permise par l'utilisation du principe d'Archimède, et est donnée par la différence entre la masse du cheval à sec (Ms), et la masse du volume d'eau déplacé (Mv) (en kg) : $Pa = Ms - Mv$.

Les mesures ont été effectuées en 4 points, déterminés en divisant la hauteur entre la pointe de l'olécrane (point 1) et le sommet du garrot en quatre segments égaux (Figure 2). Une relation linéaire avec un faible écart-type, entre la hauteur d'eau et la réduction du poids apparent, a ainsi pu être établie, et permet de prédire le degré de réduction du poids apparent pour une hauteur donnée pour n'importe quel cheval (Figure 3 et Tableau IV).

Figure 2 : Points de référence utilisés dans l'étude menée par McClintock, Hutchins et Brownlow en 1987, *d'après McClintock, Hutchins, et Brownlow (1987).*
Les points de référence sont déterminés en divisant la hauteur entre la pointe de l'olécrane (point 1) et le sommet du garrot en quatre segments égaux.

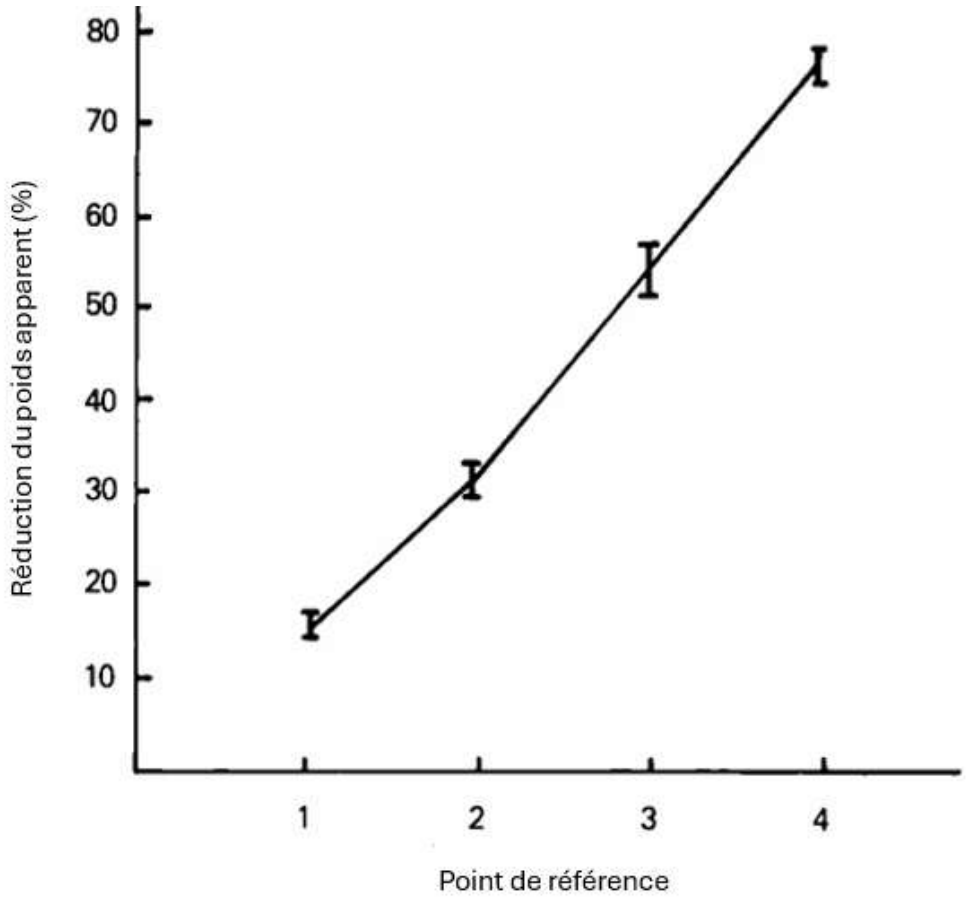


Figure 3 : Moyenne ± écart-type du pourcentage de réduction du poids apparent du cheval pour chaque point de référence, *d'après McClintock, Hutchins, et Brownlow (1987).*

À retenir :

Tableau IV : Pourcentage de réduction du Poids apparent des chevaux en fonction de la hauteur d'immersion dans l'eau salée à 9 g/L, *d'après McClintock, Hutchins, et Brownlow (1987).*

Hauteur d'eau	Pourcentage de réduction du Poids apparent
Point 1 : Pointe de l'olécrane	10,5 %
Point 2	31 %
Point 3	54 %
Point 4 : Pointe de la hanche	75 %

Il est possible de s'interroger sur l'effet de la salinité de l'eau sur la variation du Poids apparent dans cette étude. La masse volumique de l'eau salée peut être calculée grâce à l'Equation d'État Internationale de l'Eau de Mer 1980, publiée par l'UNESCO (Organisation des Nations Unies pour l'Éducation, la Science et la Culture) en 1981, puis réadaptée en Équation Thermodynamique de l'Eau de Mer en 2010 (TEOS-10) et qui dépend de la salinité de l'eau (en kg/m^3), de la pression (en décibar) et de la température (en °C) (Commission océanographique intergouvernementale, Comité scientifique de la recherche océanique, Association internationale des sciences physiques de l'océan 2010 ; Thermodynamic Equation of SeaWater 2010 (TEOS-10) 2010).

Dans l'expérience décrite par McClintock, Hutchins et Brownlow (1987), l'immersion se fait dans l'eau salée à 9 grammes par litre, à une température maintenue à 36 ± 1 °C. Selon le programme TEOS-10, la masse volumique de l'eau correspond alors à 1 000,69 kg/m^3 ; par opposition à la masse volumique de l'eau douce à la même température qui est de 994,33 kg/m^3. Le rapport entre les masses volumiques des deux fluides donne un coefficient de 1,006, que l'on peut raisonnablement considérer comme négligeable. La salinité dans l'expérience influence donc peu la variation du poids apparent.

Il faut noter que lorsque le niveau d'eau devient suffisamment important (au niveau de l'abdomen et au-dessus), il peut être observé une perte de stabilité et un « roulement » chez certains chevaux. Comme chez le chien, un rapport plus élevé entre les forces verticales de réaction du sol sur les membres thoraciques et celles sur les membres pelviens peut être observé à ces profondeurs, bien que les forces verticales de réaction du sol sur les membres thoraciques restent inférieures à celles observées pour des niveaux d'immersion inférieurs. L'abdomen du cheval s'élargit vers l'arrière, de sorte que le centre de flottabilité se trouve derrière le centre de masse ; cela peut contribuer à un transfert de poids vers les membres thoraciques en cas d'eau suffisamment haute et/ou à la tendance accrue du cheval à « rouler » dans une eau profonde (Nankervis, Launder, Murray 2017).

Du fait de la position quadrupède chez le chien et le cheval, la réduction du Poids apparent avec l'augmentation de la hauteur d'eau est moins importante que chez l'Homme.

2.4. Intérêts de la flottabilité

À retenir :

- L'augmentation de la flottabilité, en augmentant le niveau d'immersion dans l'eau, permet de **réduire le Poids apparent du corps, et donc le stress mécanique qui s'exerce sur les articulations et les tissus mous environnants**, ce qui aide à réduire la douleur et l'inflammation qui peuvent être associées aux exercices avec des charges d'impact. Notamment lors de la marche, la poussée d'Archimède permet de réduire les forces axiales qui s'exercent sur les articulations, en réduisant les forces verticales de réaction du sol, qui sont inversement proportionnelles à la hauteur de l'eau (King 2016).
- Les forces de gravité peuvent être partiellement ou complètement contrebalancées avec l'immersion, de sorte que **seuls les couples de force musculaire agissent sur les os et articulations**, permettant de développer l'amplitude du mouvement articulaire de manière assistée active, et de travailler doucement la force musculaire et la démarche (Becker 2009).

II. Viscosité et force de trainée

1. Généralités

La viscosité est une propriété du fluide, qui se manifeste quand le fluide est en mouvement. Elle est due aux frottements qui s'opposent au glissement des couches fluides les unes sur les autres. La viscosité du fluide diminue avec l'augmentation de la température. L'eau présente une viscosité dynamique environ 55 fois supérieure à celle de l'air (Nankervis, Launder, Murray 2017).

Tableau V : Evolution de la viscosité dynamique de l'eau en fonction de la température, *d'après Kestin, Sokolov, et Wakeham (1978).*

Température (en °C)	Viscosité (Pa.s)
0	$1{,}791.10^{-3}$
5	$1{,}519.10^{-3}$
10	$1{,}307.10^{-3}$
15	$1{,}138.10^{-3}$
20	$1{,}002.10^{-3}$
25	$0{,}890.10^{-3}$
30	$0{,}797.10^{-3}$
35	$0{,}719.10^{-3}$
40	$0{,}652.10^{-3}$

La force de résistance qui s'oppose aux mouvements dans l'eau est liée à la force de trainée et aux turbulences lorsqu'elles sont présentes (Becker 2009 ; Monk 2016 ; Silva *et al.* 2020). Cette force de trainée est due en partie au travail qui doit être effectué contre la viscosité du fluide, le corps étant en mouvement dans ce fluide, et en partie au travail qui résulte de l'énergie cinétique donnée au fluide qui est laissé en mouvement dans le sillage du corps. L'importance relative des forces visqueuses ou d'inertie dépend du nombre de Reynolds, qui prend en compte la taille du corps, la vitesse du mouvement, et les propriétés du fluide. Par exemple, lorsqu'un poisson se déplace dans l'eau, il travaille contre la force hydrodynamique qui s'oppose à son mouvement. Une partie du travail est nécessaire pour vaincre la viscosité de l'eau sur sa couche limite (la fine couche d'eau au contact de la peau), et l'autre est donnée sous forme d'énergie cinétique à l'eau qui reste en mouvement dans son sillage, perturbée par le passage du poisson (Alexander 2003).
La force de trainée d'un corps se déplaçant dans un fluide est définie par la formule suivante (Alexander 2003 ; Tranquille *et al.* 2017) :

$$Force\ de\ trainée = \frac{1}{2}\ \rho\ A\ v^2 C_D$$

Pour laquelle :

- ρ correspond à la densité du fluide ;
- v la vitesse du corps ;
- C_D le coefficient de trainée (sans dimension), fonction du nombre de Reynolds et du type d'écoulement ;
- A l'aire de référence, c'est-à-dire l'aire du plan frontal du corps en mouvement immergé dans l'eau.

À retenir :
De cette formule il découle que la force de trainée augmente en fonction de la vitesse du corps au carré et avec la hauteur d'immersion du corps dans le fluide.
La densité du fluide et le coefficient de trainée sont essentiellement constants au cours d'une session d'exercice, de sorte que **la vitesse des mouvements et la hauteur d'immersion sont les principaux paramètres déterminant la force de trainée expérimentée par un cheval se déplaçant dans l'eau.**

2. Intérêts de la force de trainée

- L'augmentation de travail nécessaire à la réalisation des mouvements dans l'eau contre la force de trainée permet a priori **d'augmenter l'activation musculaire, d'améliorer le renforcement musculaire et le contrôle moteur, et ainsi d'améliorer la stabilité articulaire** (King 2016 ; Muñoz *et al.* 2019). L'analyse électromyographique lors d'exercice aquatique chez des patients humains montre une augmentation de l'activation des muscles agonistes pendant les contractions concentriques. Une activité accrue des muscles agonistes est nécessaire pour accélérer le membre dans la direction du mouvement[4] (King 2016).
- L'eau agit comme un **travail en résistance accommodante** : c'est-à-dire que la résistance au mouvement égale la force ou l'effort appliqués par le patient. Ainsi, la probabilité d'exacerber ou de réinduire une lésion est diminuée (Prins, Cutner 1999).
- Il est néanmoins **possible d'augmenter la résistance de l'eau et les turbulences**, de sorte à augmenter le renforcement musculaire : utilisation de jets d'eau qui s'opposent au mouvement ou d'accessoires qui permettent d'augmenter l'aire de référence (exemple : palmes, plaquettes pour les mains) (Monk 2016).
- Par opposition, le travail musculaire **diminue** lorsque le mouvement est effectué dans le même sens que le flux turbulent. Des jets d'eau dans le sens du mouvement par exemple peuvent donc être utilisés pour assister le mouvement (Monk 2016).
- Les exercices de renforcement dans l'eau ne sont pas limités en direction et dépendent uniquement de la mobilité des articulations sollicitées. **La résistance de l'eau est multidirectionnelle et permet donc une augmentation de travail pour des mouvements réalisés dans toutes les directions.** L'une des limites des appareils de renforcement conventionnels est l'isolement de l'activité articulaire. De nombreux appareils de musculation sont conçus avec des barres rigides qui guident la résistance ; cela limite l'utilisateur à des mouvements dans des plans fixes. En revanche, les exercices de renforcement aquatiques peuvent être conçus pour correspondre étroitement aux mouvements quotidiens et, par conséquent, offrir des adaptations neuromusculaires mieux appropriées aux activités de la vie quotidienne.
- La résistance visqueuse aux mouvements augmente d'autant plus que la force du mouvement qui s'exerce contre elle augmente. Mais elle présente l'intérêt de **s'arrêter presque immédiatement lorsque la force du mouvement cesse**, car il y a une faible inertie du mouvement, du fait de l'atténuation de celle-ci par la viscosité de l'eau. La viscosité de l'eau est donc utile pour contrôler la force appliquée sur les structures atteintes lors d'exercices de réhabilitation. Par exemple, lors du travail d'un membre lésé dans l'eau, si l'animal ressent de la douleur et arrête le mouvement, la force exercée sur le membre diminue précipitamment, la viscosité de l'eau étouffant le mouvement presque instantanément. Cela permet donc d'améliorer le contrôle des exercices de renforcement, en respectant le seuil de douleur (Becker 2009 ; Pipino *et al.* 2023).
- Les animaux présentant des **déficits d'équilibre** sur terre peuvent être aidés par l'immersion dans l'eau. La résistance aux mouvements dans l'eau offre un milieu avec davantage de

[4] *Poyhonen T, Keskinen K, Kyrolainen H, et al. Neuromuscular function during therapeutic knee exercise underwater and on dry land. Arch Phys Med Rehabil 2001 ; 82:1446–52.*

maintien, et de stabilité, et donc permet d'augmenter la stabilité des articulations et réduit les risques de tomber tout en offrant davantage de temps pour corriger les pertes d'équilibres. Par exemple, des patients avec une lésion vertébrale sont souvent capables de marcher sur tapis immergé avant de marcher sur terre (Monk 2016).

À retenir :

La force de trainée associée aux mouvements dans l'eau présente plusieurs intérêts thérapeutiques :

- Augmentation de l'activation musculaire, amélioration du renforcement musculaire et du contrôle moteur, et ainsi amélioration de la stabilité articulaire ;
- Travail en résistance accommodante ;
- Possibilité d'augmenter ou diminuer la résistance de l'eau via des jets d'eau ou des accessoires qui permettent d'augmenter l'aire de référence ;
- Résistance de l'eau multidirectionnelle, qui permet donc une augmentation de travail pour des mouvements réalisés dans toutes les directions ;
- Arrêt presque immédiat de la résistance visqueuse aux mouvements lorsque la force du mouvement cesse ;
- Milieu plus sécuritaire pour des patients présentant des déficits d'équilibre.

III. Pression hydrostatique

1. Généralités

Dans un liquide, la pression exercée sur un point représente le Poids de la colonne de liquide sur une surface qui se trouve à la même profondeur que le point.
Par ailleurs, il existe un équilibre horizontal du fluide, selon le principe de Pascal : « Dans un liquide en équilibre de masse volumique uniforme, la pression est la même en tout point du liquide et cela aussi longtemps que ces points sont à la même profondeur ».

En considérant la Figure 4, soit A et B deux points dans un fluide incompressible (masse volumique (ρ) du fluide étant constante), dans le champ de pesanteur (g) seul, aux profondeurs z_A et z_B. Selon le principe fondamental de l'hydrostatique, la différence de pression entre A (P_A) et B (P_B) est donnée par :

$$P_A - P_B = \rho * g * (z_A - z_B)$$

En considérant B à la surface de l'eau, la pression en B correspond à la pression atmosphérique (P_{atm}). Ainsi la pression (P) à une profondeur donnée h correspond à :

$$P = \rho * g * h + P_{atm}$$

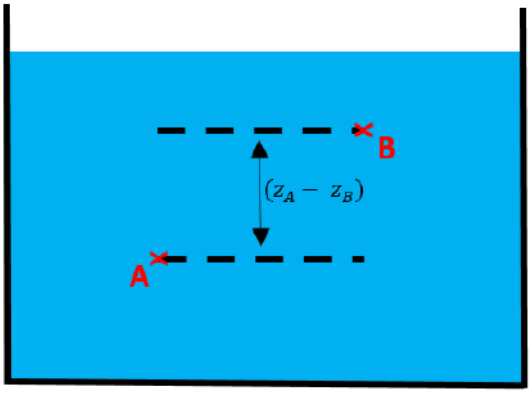


Figure 4 : Schéma illustrant la différence de pression entre deux points A et B dans un fluide incompressible, *source : Delacharlerie Aurore.*

À retenir :
La pression hydrostatique en un point est donc directement proportionnelle à la densité du liquide et la profondeur d'immersion, quand le fluide est incompressible. L'eau exerce en moyenne une pression de 1 mmHg pour 1,36 cm de profondeur (Becker 2009).

2. Intérêts de la pression hydrostatique

2.1. Fonction neuromusculaire et perception de la douleur

2.1.1. Récepteurs articulaires

Le cartilage articulaire est un tissu aneural et avasculaire chez les individus matures. Les autres structures articulaires : l'os sous-chondral, la capsule articulaire, les ligaments intra et extra articulaires et le ménisque, sont innervés. Il y a quatre types de récepteurs afférents dans les tissus articulaires (van Weeren 2016) :

- Les récepteurs de type 1 : mécanorécepteurs à faible seuil, localisés dans la capsule articulaire fibreuse, avec une fonction de proprioception.
- Les récepteurs de type 2 : mécanorécepteurs à faible seuil, localisés à la jonction entre la capsule articulaire fibreuse et le tissu adipeux sous synovial. Ils sont actifs uniquement quand l'articulation est en mouvement. Ils agissent comme des capteurs proprioceptifs dynamiques.

- Les récepteurs de type 3 : mécanorécepteurs et nocicepteurs à haut seuil, localisés à l'insertion osseuse des ligaments intra-articulaires et périarticulaires. Ils sont habituellement inactifs lors de position statique ou lors de mouvements limités passifs, et deviennent actifs lorsque le mouvement articulaire atteint ses limites physiologiques. Ils agissent comme des mécanismes de sécurité.
- Les récepteurs de type 4 : nocicepteurs à haut seuil, localisés de manière abondante dans toute la capsule articulaire et le périoste directement adjacent aux marges articulaires, et de manière plus limitée dans la membrane synoviale. Ils répondent à des stimuli thermiques, chimiques, et mécaniques. Les stimuli chimiques peuvent augmenter la réponse aux stimuli mécaniques, sensibilisant l'articulation.

Ces récepteurs assurent ainsi le signalement de la position et du mouvement des articulations dans l'espace, le contrôle du timing et de la direction du mouvement articulaire, l'initiation de la réponse musculaire réflexe qui maintient la stabilité articulaire et protège les structures articulaires d'une charge excessive ou anormale, et jouent un rôle primaire dans la nociception.

Dans des circonstances normales, l'étirement de la capsule articulaire et des ligaments environnants entraine une augmentation de l'activation des mécanorécepteurs, qui se projettent dans les motoneurones-ɣ de la corne ventrale de la moelle épinière. L'augmentation du signal afférent provenant des mécanorécepteurs articulaires génère un ajustement au niveau de la tension musculaire pour contrebalancer l'effort induit sur les tissus, ce qui par conséquent augmente la stabilité articulaire. Ce mécanisme réflexe médié par les récepteurs articulaires aide à protéger une articulation blessée contre davantage de dommages, par l'inhibition ou l'activation de la garde musculaire en réponse à une douleur articulaire.

Les mécanorécepteurs détectent également les déformations mécaniques de la capsule articulaire et les changements de pression intra-articulaire durant la mise en charge de l'articulation. L'augmentation de la pression intra-articulaire, associée à une effusion articulaire ou une synovite, cause un réflexe afférent d'excitation des interneurones 1b de la corne ventrale de la moelle épinière, ce qui résulte en une inhibition des muscles qui agissent sur cette articulation. **Cette excitation des mécanorécepteurs articulaires induite par l'augmentation de pression intra-articulaire peut être atténuée par les effets de la pression hydrostatique lorsque le membre est immergé.** La réduction de l'inhibition des interneurones 1b permet une augmentation de l'activation des motoneurones-α, ce qui **augmente l'activation et le tonus musculaire** (Haussler, King 2016). L'application de cette propriété d'intérêt sera étudiée dans les chapitres suivants.

2.1.2. Récepteurs sensitifs cutanés

La perception de la douleur peut souvent être soulagée par un stimulus non-nocif comme des frottements ou l'application d'une pression sur la zone sensible, ou par une stimulation nocive comme de l'eau froide. Cependant, le mécanisme permettant l'inhibition de la perception de la douleur à travers une stimulation somatosensorielle est peu clair.
La théorie du *« gate-control »*, publiée par Melzack et Wall en 1965, est souvent évoquée pour expliquer cette inhibition par un stimuli non-nocif. Elle propose que la corne dorsale de la moelle épinière a une fonction de porte qui contrôle les influx nociceptifs. L'activation des fibres Aβ, qui transmettent les stimuli tactiles, augmente l'excitabilité des interneurones inhibiteurs, et l'information nociceptive provenant des fibres Aδ et C est inhibée par une inhibition pré-synaptique (Shimo *et al*. 2022).
Une inhibition de la douleur par une stimulation non-nocive avec des filaments de nylon de la surface du corps douloureuse est obtenue par Mancini *et al*. (2014), appelée analgésie induite par le toucher. Si Shimo *et al*. (2022) n'obtiennent pas de modification significative dans le seuil de perception de la

douleur par un stimuli non-nocif, ils montrent néanmoins qu'un stimulus nocif, par immersion d'une main dans de l'eau froide entre 6 et 8 °C augmente le seuil de perception de la douleur pour les fibres Aδ et C. Ainsi, un stimulus nocif peut inhiber la perception de la douleur, mais peut également agir comme distraction d'une autre information somato-sensorielle, les stimuli nocifs agissant comme des signaux critiques d'alerte.
Ainsi le mécanisme de **réduction de la perception de la douleur** dans l'eau pourrait en parti s'expliquer par la **stimulation des terminaison nerveuses sensorielles cutanées par l'effet de la pression hydrostatique** *(« gate control »)*. La surstimulation sensorielle causée par l'immersion et la force hydrostatique pourrait agir comme un modulateur de la douleur, et augmenter son seuil de perception, d'autant plus que l'eau présente des turbulences ou qu'elle est froide (association d'un stimulus nocif dans ce dernier cas) (Pipino *et al*. 2023 ; Hajouj *et al*. 2021).

2.2. Diminution de l'œdème

L'immersion des membres distaux dans l'eau permet **l'application d'une force de compression circonférentielle** de magnitude égale à une profondeur donnée, permettant une augmentation de la pression hydrostatique extravasculaire, ce qui aide au retour veineux et au drainage lymphatique.
Par exemple, un corps immergé à plus de 109 cm sera soumis à une pression supérieur à 80 mmHg, qui est la pression diastolique sanguine au repos chez l'athlète équin (Poole, Erickson 2008).
La force de pression hydrostatique peut donc aider à la réduction des œdèmes et de l'inflammation des tissus mous. Il pourra en résulter dans un second temps une augmentation de l'amplitude du mouvement articulaire et une diminution de la douleur.
Par ailleurs, la réduction de l'inflammation des tissus mous et de l'effusion articulaire pourra d'autant plus améliorer l'information synaptique au niveau des mécanorécepteurs, comme vu précédemment, et rétablir le contrôle neuromusculaire pour une locomotion optimale (King 2016).

2.3. Augmentation du flux sanguin musculaire

Pendant l'immersion, **l'augmentation du retour veineux** associée à la pression hydrostatique de l'eau est associée à une **augmentation du débit cardiaque**. Il est probable que la majeure partie du débit cardiaque accru soit redistribuée vers la peau et les muscles plutôt que vers le secteur splanchnique. Chez l'Homme, il a été observé une **augmentation du débit sanguin musculaire au repos**, passant d'une valeur de base de 1,8 mL/min/100 g de tissu à sec, à 4,1 mL/min/100 g de tissu lors d'immersion dans l'eau au niveau du cou. Avec une augmentation de 225 % du débit sanguin musculaire dans l'eau par rapport au débit sanguin à sec, il est raisonnable de conclure que **l'apport en oxygène aux muscles et le drainage des catabolites sont significativement augmentés** pendant l'immersion au repos[5]. Le débit sanguin pendant l'exercice est probablement amélioré également. Des recherches soutiennent cette hypothèse, montrant une augmentation de 20 % du débit sanguin musculaire chez des sujets sédentaires d'âge moyen soumis à 12 semaines d'entrainement de natation[6] (Becker 2009 ; Pipino *et al.* 2023).

[5] *Balldin UI, Lundgren CE, Lundvall J, Mellander S. Changes in the elimination of 133 xenon from the anterior tibial muscle in man induced by immersion in water and by shifts in body position. Aerosp Med 1971 ; 42:489-493.*
[6] *Martin WH 3rd, Montgomery J, Snell PG, et al. Cardiovascular adaptations to intense swim training in sedentary middle-aged men and women. Circulation 1987 ; 75:323-330.*

À retenir :

Les intérêts de la pression hydrostatique lors d'immersion dans l'eau sont :

- L'amélioration de la fonction neuromusculaire en renforçant l'activité des fuseaux musculaires par la stimulation des mécanorécepteurs articulaires ;
- La diminution de la perception de la douleur par la stimulation des terminaison nerveuses sensorielles cutanées ;
- La diminution de l'œdème par application d'une force de compression circonférentielle ;
- L'augmentation du débit sanguin musculaire, qui se traduit par une augmentation de l'apport en oxygène aux muscles et du drainage des catabolites.

IV. Température

1. Généralités

Les différents mécanismes de gain ou perte de chaleur au sein du corps humain, qui s'opèrent dans l'eau, peuvent s'exprimer à l'aide d'une expression mathématique basée sur le premier principe de la thermodynamique :

$$S = (M \pm W) \pm (K + R + C) \pm (C_{res} - E_{res}) - E$$

Le taux de changement de la température corporelle (S) chez l'Homme, exprimé en watts (W), dépend du métabolisme de l'organisme (M), du travail mécanique (W), des transferts de chaleur par conduction (K), rayonnement (R), et convection (C), et de l'évaporation. L'évaporation se fait par dissipation de chaleur par la respiration, sous forme de perte d'eau par l'appareil respiratoire, exprimée par la différence entre la perte de chaleur sèche (C_{res}) et la perte de chaleur latente (E_{res}), ainsi que par la transpiration (E) (Ntoumani *et al.* 2023).

Ainsi, chez l'Homme et le cheval, les transferts thermiques s'effectuent par rayonnement, conduction, convection et évaporation (Kang *et al.* 2023).
Néanmoins, **la régulation de la température corporelle dans l'eau est très différente de celle dans l'air, puisque l'évaporation de la transpiration n'est plus possible. Dans l'eau, les transferts thermiques se font majoritairement par convection et conduction** (Monk 2016).

1.1. Transferts thermiques

1.1.1. Rayonnement

Tout corps dont la température est supérieure au zéro absolu émet un rayonnement thermique, dont la longueur d'onde au maximum d'émission est fonction de sa température (loi de Wien). Le transfert de chaleur par rayonnement thermique est créé par « l'émission et l'absorption des ondes électromagnétiques porteuses d'énergie rayonnante et par la transformation de celle-ci en chaleur avec le changement d'état énergétique – énergie interne – des corps qui la retiennent » (Bianchi, Fautrelle, Etay 2004).

Le transfert de chaleur par rayonnement (φ) entre deux corps à des températures différentes (T_p et T_c), séparés par du vide ou un milieu semi-transparent, se produit par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques, donc sans support matériel. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Stefan, avec ε l'émissivité du corps ($0 < \varepsilon \leq 1$) et σ la constante de Stefan ($5{,}67.10^{-8}$ W/m^2/K^4) (Mergui 2023).

$$\varphi = \varepsilon * \sigma * ({T_p}^4 - {T_c}^4)$$

Ce type de transfert thermique varie peu dans les mécanismes de thermorégulation mis en jeu dans l'eau.

1.1.2. Conduction

« L'énergie interne d'un corps solide, liquide ou gazeux correspond à l'énergie cinétique de ses éléments constituants qui se trouvent dans un mouvement permanent (atomes, molécules, électrons libres). La conduction représente le processus de propagation de la chaleur par le contact direct entre les particules d'un corps ou entre des corps ayant des niveaux énergétiques – donc des températures – différents, suite au mouvement de ces particules élémentaires » (Bianchi, Fautrelle, Etay 2004). Le flux de chaleur circule des zones chaudes vers les zones plus froides.

Joseph Fourier propose une loi phénoménologique pour la diffusion de chaleur, qui relie le vecteur densité de flux de chaleur ($\vec{\varphi}$) au gradient de température ($\vec{\nabla}T$) :

$$\vec{\varphi} = -\lambda * \vec{\nabla}T$$

Où φ est le flux de chaleur en W/m², ∇T le gradient de température en Kelvin (K), et λ la conductivité thermique en $W.m^{-1}.K^{-1}$.

La conductivité thermique est spécifique au milieu considéré, et dépend de la température ; elle traduit la capacité d'un matériau à transporter la chaleur par conduction. À une température de 300 K, la conductivité thermique dans l'air, sous 10^5 Pa, est de $2{,}6.10^{-2}$ $W.m^{-1}.K^{-1}$, et de 6.10^{-1} $W.m^{-1}.K^{-1}$ dans l'eau (Mergui 2023).

Par ailleurs, l'expression du flux de chaleur φ qui traverse une surface S, d'épaisseur e, correspond à :

$$\varphi = \frac{\Delta T}{R_{thermique}} \quad avec \quad R_{thermique} = \frac{e}{\lambda * S}$$

À retenir :

Ainsi, le taux de transfert thermique par conduction est directement proportionnel au gradient de température entre la peau et le milieu environnant, et inversement proportionnel à l'épaisseur du pelage. Ces transferts au niveau de la tête, du cou et des membres distaux sont plus efficaces par rapport aux membres proximaux, au thorax et à l'abdomen, du fait d'un ratio surface/masse plus important (McCutcheon, Geor 2008).

La valeur de conductivité thermique de l'eau est 25 fois supérieure à celle de l'air. Ainsi, quand la température de l'eau est supérieure ou inférieure à la température corporelle, les gains ou pertes de chaleur respectivement, sont 25 fois plus rapides entre l'eau et le corps immergé (Becker 2009).

1.1.3. Convection

« La convection est le processus de transfert thermique déterminé par le mouvement des particules élémentaires d'un fluide – liquide ou gaz – entre des zones ayant des températures différentes ; ce mouvement entraine un mélange intense des particules fluides, qui échangent de l'énergie (chaleur) et de la quantité de mouvement (impulsion) entre elles » (Bianchi, Fautrelle, Etay 2004).

La convection peut être :

- Forcée : le mouvement du fluide est causé par l'action des forces extérieures au processus (pompe, ventilateur…), qui lui imprime des vitesses de déplacement assez importantes.
- Naturelle : le mouvement est produit par les différences de densité, entre les particules chaudes et celles qui sont froides, existantes dans un fluide situé dans un champ de forces massiques (par exemple le champ gravitationnel) (Bianchi, Fautrelle, Etay 2004).

Le flux de chaleur ($\vec{\varphi}$) échangé par convection est régi par la loi de Newton, qui stipule que la densité de flux de chaleur échangé à l'interface entre un solide (T_p) et un fluide (T_∞) en écoulement est proportionnelle à l'écart de température qui lui a donné naissance.

$$\vec{\varphi} = h * (T_p - T_\infty)\vec{n}$$

h est une grandeur positive appelée coefficient d'échange convectif, en $W.m^{-2}.K^{-1}$; et $\vec{n}$ un vecteur normal à l'interface. Le coefficient h dépend de nombreux paramètres (fluide, type d'écoulement, état de surface…) et est donc extrêmement difficile à quantifier précisément (Mergui 2023).

Tableau VI : Exemples de valeurs numériques pour le coefficient d'échange convectif h, *source : Mergui (2023).*

Fluide	Type de transfert	h en W.m^{-2}.K^{-1}
Gaz	Convection naturelle	5 – 30
	Convection forcée	10 – 300
Eau	Convection naturelle	100 – 1 000
	Convection forcée	300 – 12 000

À retenir :
Les transferts thermiques par convection peuvent ainsi s'opérer par les mouvements d'air ou d'eau à la surface cutanée, mais également au sein de l'appareil respiratoire via la ventilation pulmonaire. Un mécanisme efficace pour les pertes de chaleur est l'association de la conduction et de la convection : l'air chauffé au contact de la peau par conduction est remplacé par de l'air plus froid par convection, par exemple lorsqu'il y a du vent.

Par ailleurs, l'augmentation du flux sanguin peut aider à la dissipation de la chaleur par convection, via le transfert de la chaleur corporelle depuis les muscles au travail vers la périphérie. L'augmentation de la fréquence respiratoire, permet quant à elle l'expiration plus rapide de l'air chaud, remplacé par l'inhalation d'air plus froid. Une fréquence respiratoire de plus de 200 mouvements par minute peut dissiper jusqu'à 25 % de la chaleur chez le cheval à l'exercice (McCutcheon, Geor 2008 ; Kang *et al.* 2023).

1.1.4. Évaporation

Chez le cheval, le mécanisme le plus important pour les pertes de chaleur est le refroidissement par évaporation, via l'évaporation de la transpiration sur la surface cutanée et de l'eau dans l'appareil respiratoire.

L'efficacité du mécanisme d'évaporation de la transpiration dépend du gradient de pression de vapeur entre la surface corporelle et l'environnement. **Dans des conditions optimales, quand le taux d'humidité est bas, 70 % des pertes de chaleur se font par évaporation chez un cheval à l'exercice.** Plusieurs paramètres environnementaux peuvent influencer l'efficacité de ce mécanisme : la température ambiante, le taux d'humidité relative, le gradient de pression de vapeur avec la surface corporelle, et le taux de mouvement de l'air. Notamment, **à un taux d'humidité élevé, le gradient de pression de vapeur entre la surface corporelle et l'environnement devient faible, empêchant le refroidissement par évaporation, et augmentant le taux de stockage de la chaleur**. La transpiration au lieu de s'évaporer **perle sur la peau, ce qui ne permet d'enlever que 5 à 10 % de la quantité de chaleur qui est normalement perdue par évaporation à la surface de la peau**.

La grande surface de l'appareil respiratoire permet également la dissipation de la chaleur. Le processus repose là encore sur la différence de pression de vapeur entre l'air inspiré et celui au contact de l'épithélium de surface de l'appareil respiratoire. Les naseaux externes du cheval ainsi que l'appareil respiratoire supérieur (avec notamment les narines internes et les volutes de l'ethmoïde) constituent une surface d'échange de chaleur importante, à travers laquelle l'air inspiré entre en contact avec l'épithélium respiratoire très vascularisé. **Les pertes de chaleur via l'appareil respiratoire dépendent de la ventilation minute et également de l'humidité relative**. **Dans le cas d'un air frais et sec, la quantité de transfert thermique par évaporation via l'appareil respiratoire est estimé entre 15 et 25 % du total des pertes de chaleur**. En revanche, **si l'air est chaud et humide**, l'évaporation de la transpiration au niveau de la surface cutanée est compromis, comme vu précédemment, et les pertes par l'appareil respiratoire représentent alors une proportion supérieure, **entre 25 % et plus du total des pertes de chaleur**. La fréquence respiratoire et le volume inspiré augmentent de 10 à 18 fois durant

un effort intense par rapport au repos, ce qui contribue à augmenter le refroidissement par évaporation via le système respiratoire (McCutcheon, Geor 2008 ; Kang *et al.* 2023).

À retenir :
L'immersion dans l'eau aura pour conséquence d'empêcher le refroidissement par évaporation de la transpiration sur la surface cutanée. Il faudra en tenir compte lors de la mise en place d'exercices dans l'eau.

1.2. Capacité thermique

La capacité thermique C d'un système est l'énergie thermique perdue ou gagnée si le système voit sa température diminuer ou augmenter d'un kelvin, exprimée en joule par kelvin.
La capacité thermique massique c d'un système correspond à l'énergie absorbée par 1 kg de ce système pour élever sa température de 1 K. L'air a une capacité thermique massique de 1 005 $J.K^{-1}.kg^{-1}$, et l'eau de 4 185 $J.K^{-1}.kg^{-1}$.
La capacité thermique massique du corps humain a longtemps été considérée égale à 3,47 $kJ.K^{-1}.kg^{-1}$. Une étude récente a calculé cette valeur à partir de 24 tissus constituant le corps humain, et la définit approximativement égale à 2,98 $kJ.K^{-1}.kg^{-1}$, variant entre 2,44 et 3,39 $kJ.K^{-1}.kg^{-1}$ selon les valeurs utilisées pour chaque tissu du corps (Xu, Rioux, Castellani 2023).

À retenir :
L'eau liquide, de part la valeur élevée de sa capacité thermique massique, est utilisable comme un fluide caloporteur, c'est-à-dire pouvant transporter de la chaleur, et ainsi retenir le chaud ou le froid.
La capacité thermique massique de l'eau étant supérieure à celle du corps humain, le corps humain aura tendance à s'équilibrer plus rapidement (Holmberg *et al.* 2021).

1.3. Intervalles de température

1.3.1. Neutralité thermique

La zone de neutralité thermique est définie comme l'intervalle des températures ambiantes pour lequel la régulation de la température interne dépend uniquement des modifications de la circulation sanguine cutanée, sans variations de production de chaleur par le métabolisme basal ou de perte par évaporation.
Cette zone de thermoneutralité est associée à un métabolisme de base répondant aux fonctions vitales et aux pertes d'eau. En dessous de la température critique inférieure, le métabolisme augmente pour maintenir la température corporelle. Au-dessus de la température critique supérieure, les pertes d'eau augmentent du fait d'une redistribution du volume sanguin en périphérie, et de la transpiration (Ntoumani *et al*. 2023 ; Pallubinsky, Schellen, van Marken Lichtenbelt 2019).

Chez l'Homme, la zone de neutralité thermique dans l'air s'étend entre 28 et 32 °C pour une personne nue. Durant une immersion dans l'eau douce à une hauteur entre le diaphragme et le processus xiphoïde de 30 minutes, cette zone de neutralité varie entre 30 et 36 °C, et augmente entre 35,5 et 36 °C pour des immersions de durée supérieure (Ntoumani *et al.* 2023).

Chez le cheval, la zone de neutralité thermique dans l'air est entre 5 et 25 °C (Kang *et al.* 2023). Cette zone de neutralité **n'a pas été définie dans l'eau**. Nankervis, Thomas, et Marlin (2008) supposent que chez le cheval, la zone de neutralité thermique est inférieure à celle donnée pour l'Homme du fait d'un rapport surface sur masse corporelle réduit. Néanmoins, McClintock, Hutchins, Brownlow (1986b) ont proposé une température de 36 °C comme zone de thermoneutralité pour une immersion prolongée (21 jours) dans de l'eau salée.

1.3.2. Au cours de l'exercice

Durant l'exercice, le travail musculaire produit de la chaleur. Le maintien de la température centrale dépend de la balance entre la production de chaleur et sa dissipation. La réponse thermique de l'organisme au cours de l'exercice est influencée par les paramètres de l'environnement, notamment la température ambiante et l'humidité. Quand la température ambiante augmente, le gradient de température entre la peau et l'environnement est réduit, et les pertes de chaleur par conduction, convection, et radiation sont limitées. Si le taux d'humidité est bas alors la diminution de pertes sensibles est contrebalancée par une augmentation de la transpiration et du refroidissement par évaporation. Néanmoins, si le taux d'humidité augmente alors le gradient entre le point de rosée au niveau de la peau et l'environnement réduit, et les pertes par évaporation deviennent également limitées (McCutcheon, Geor 2008).

On comprend alors l'importance de la régulation de la température de l'eau lors de thérapie aquatique.

Chez l'Homme, au cours de l'exercice sur terre et donc dans l'air, la régulation de la température centrale associée à l'augmentation de l'intensité physique, n'est pas affectée par la température ambiante pour un intervalle entre 5 et 35 °C. Dans l'eau, cet intervalle de température est plus restreint, et varie entre 17 et 34 °C en fonction de l'intensité de l'exercice et de la masse adipeuse. Chez l'Homme, l'exercice dans l'eau chaude au-delà de 33 °C génère une sensation de fatigue, d'épuisement et peut induire un stress cardio-pulmonaire. L'exercice dans l'eau froide, en dessous de 18 °C, peut causer une fatigue musculaire et une incapacité à contracter le muscle complètement.
De manière générale, la température adéquate chez l'Homme pour l'exercice dans l'eau se situe plutôt entre 28 et 30 °C, de sorte que peu de chaleur sera stockée et les performances ne seront pas altérées (Monk 2016 ; Ogonowska-Slodownik, Richley Geigle, Morgulec-Adamowicz 2020).

Chez le cheval, cet intervalle de température n'a pas été défini. Néanmoins, il est rapporté que lorsque la température ambiante dépasse la température corporelle (supérieure à 35-36 °C), alors le gradient de température s'inverse et le corps gagne de la chaleur de l'environnement (McCutcheon, Geor 2008). Le taux de stockage de chaleur lors d'exercice dans des conditions chaudes et humides peut s'avérer deux fois supérieur à celui pour un exercice de même intensité dans des conditions fraîches et sèches. Dans une enquête internationale menée en 2018 sur l'utilisation des tapis immergés chez le cheval, Tranquille *et al.* rapportent l'usage de températures d'eau entre 4 et 24 °C, avec une moyenne de 13 °C. En 2017, Tranquille *et al.* avaient **proposé des températures de travail du cheval sur tapis immergé entre 13 et 22 °C**. La différence avec les chiffres de l'enquête peut s'expliquer par les variations dans le lieu et la manière de stockage de l'eau, et la période de l'année à laquelle les études ont été menées.

À retenir :
Chez le cheval, la zone de neutralité thermique dans l'air est entre 5 et 25 °C. Cette zone de neutralité n'a pas été définie dans l'eau, mais elle est supposée inférieure à celle donnée pour l'Homme (entre 30 et 36 °C) du fait d'un rapport surface sur masse corporelle réduit.
Lors de l'exercice sur tapis immergé, il est proposé des températures de l'eau pour le cheval entre 13 et 22 °C.

2. Applications des variations de température

Les propriétés thermodynamiques de l'eau offrent différentes applications thérapeutiques en fonction de la température.

2.1. Thermothérapie

La thermothérapie est souvent utilisée chez l'Homme à la suite de la phase aiguë de l'inflammation, et se définit par une température thérapeutique optimale du tissu entre 40 et 45 °C (King 2016 ; Haussler, King 2016).

- L'immersion dans une eau chaude à 36 °C entraine chez l'Homme et le cheval, une **vasodilatation** qui réduit la résistance vasculaire périphérique et augmente la perfusion tissulaire. Cette **augmentation de perfusion des tissus mous aide à la dissipation des médiateurs de l'inflammation qui sont associés à l'inflammation locale et la douleur**.
- La température de l'eau joue également un **rôle important sur la nociception en agissant sur les récepteurs thermiques locaux, et en augmentant la libération d'opioïdes endogènes**. Des chevaux placés dans une eau de source chaude (38 à 40 °C) pendant 15 minutes montrent une augmentation de l'activité du système nerveux parasympathique[7]. Ce qui suggère qu'une immersion dans l'eau chaude peut avoir un effet relaxant qui aide à la diminution de la douleur, des spasmes musculaires et améliore la cicatrisation. Chez l'Homme, l'immersion dans l'eau chaude a été démontrée efficace pour diminuer la douleur et améliorer ainsi l'amplitude du mouvement articulaire.

2.2. Cryothérapie

La cryothérapie est largement utilisée chez le cheval pour diminuer l'inflammation des tissus mous, et la douleur. Le froid peut pénétrer jusqu'à 1 à 4 cm de profondeur, en fonction de la circulation locale et de l'épaisseur de tissu adipeux (King 2016).

Les bains d'eau froide sont souvent utilisés pour l'entrainement des athlètes humains entre 10 et 15 °C pour diminuer la douleur musculaire et accélérer le temps de récupération pour des blessures liées au surmenage, bien que les études soient contradictoires sur le sujet (Becker 2009) (voir Chapitre 3).

2.2.1. Modulation de la réponse inflammatoire

La cryothérapie induit une modulation de la réponse inflammatoire en entrainant une vasoconstriction périphérique et une diminution de la perfusion des tissus mous jusqu'à 80 %, ce qui permet de :

- **réduire la formation d'œdème et de gonflement** au niveau du site lésé ;
- **réduire le métabolisme tissulaire** via la réduction de la libération de médiateurs inflammatoires, l'inhibition du catabolisme enzymatique, la diminution de la demande cellulaire en oxygène, ce qui permet par conséquent de réduire les lésions d'hypoxie.

[7] *Kato T, Ohmura H, Hiraga A, et al. Changes in heart rate variability in horses during immersion in warm springwater. Am J Vet Res 2003 ; 64:1482–5.*

Application pratique de l'effet de la température de l'eau sur la partie distale du membre chez le cheval – exemple de la prise en charge des fourbures aiguës :

La fourbure est définie comme une dissociation nécrotique du podophylle et du kéraphylle au niveau de la membrane basale, induisant une perte de cohésion entre la boîte cornée et la troisième phalange. Quatre types de fourbure sont définis, associés à une hyper-insulinémie, un sepsis, le non appui du membre controlatéral, ou un trauma. De façon générale, quelque soit le type de fourbure, le traitement inclut des anti-inflammatoires, une restriction de l'activité locomotrice, un support mécanique du pied et une hypothermie digitale.

L'hypothermie digitale continue consiste en une thérapie de refroidissement de l'extrémité distale du membre de façon ininterrompue. Elle vise à retarder la réponse inflammatoire initiale au niveau des lamelles dermiques, en limitant l'arrivée par voie hématogène de facteurs initiateurs (comme des cytokines pro inflammatoires, produits bactériens…), en inhibant la dégradation enzymatique du tissu lamellaire par la réduction de l'expression et de l'activité des métalloprotéinases matricielles, et en modulant l'activité des neutrophiles, leucocytes et collagénases (Lavado, Lewis, Montgomery 2023).

Mise en pratique de l'hypothermie digitale continue (HDC) (Lavado, Lewis, Montgomery 2023) :

- Il est recommandé de maintenir la température de la surface de la boite cornée inférieure à 10°C.
- Pour une meilleure efficacité thérapeutique, le refroidissement devrait être commencé durant la phase de développement de la fourbure, c'est-à-dire entre l'initiation du processus et les premiers signes cliniques. Cette période dure entre 18 et 72 heures pour une fourbure induite par surcharge en carbohydrates, et jusqu'à 5 jours lorsqu'elle est secondaire à une colique par exemple. En pratique, l'HDC devrait être initiée dès qu'une condition associée à un haut risque de fourbure se présente (colique, surcharge en carbohydrates, endotoxémie…).
- Il est recommandé de continuer l'HDC pendant 24 à 48 heures après résolution des signes cliniques et paracliniques d'inflammation (fréquence cardiaque, pouls digité, température rectale, couleur des muqueuses, leucogramme…). L'arrêt de l'hypothermie digitale doit être progressif sur 12 à 24 heures, et non abrupt ce qui pourrait redéclencher le processus.
- Il faut éviter une hypothermie digitale intermittente qui causerait de la vasodilatation, néfaste au processus.

Il existe plusieurs méthodes d'hypothermie digitale continue :

- **Méthodes à contact « humide » :**
    - Immersion dans des bottes ou sacs (par exemple en caoutchouc[8,9,10] ou polychlorure de vinyle[11] ou poches de perfusion) remplies d'un mélange d'eau et de glace, ou uniquement de glace.

[8] Cassimeris, L., Armstrong, C., Burger, Q.C., Stokes, S., van Eps, A., Galantino-Homer, H., 2021. Continuous digital hypothermia reduces expression of keratin 17 and 1L–17A inflammatory pathway mediators in equine laminitis induced by hyperinsulinemia. Veterinary Immunology and Immunopathology 241, 110326.

[9] Stokes, S.M., Belknap, J.K., Engiles, J.B., Stefanovski, D., Bertin, F.R., Medina-Torres, C. E., Horn, R., van Eps, A.W., 2019. Continuous digital hypothermia prevents lamellar failure in the euglycaemic hyperinsulinaemic clamp model of equine laminitis. Equine Veterinary Journal 51, 658–664.

[10] Dern, K., van Eps, A., Wittum, T., Watts, M., Pollitt, C., Belknap, J., 2018. Effect of continuous digital hypothermia on lamellar inflammatory signaling when applied at a clinically-relevant timepoint in the oligofructose laminitis model. Journal of Veterinary Internal Medicine 32, 450–458.

[11] Burke, M.J., Tomlinson, J.E., Blikslager, A.T., Johnson, A.L., Dallap-Schaer, B.L., 2018. Evaluation of digital cryotherapy using a commercially available sleeve style ice boot in healthy horses and horses receiving i.v. endotoxin. Equine Veterinary Journal 50, 848–853.

Figure 5 : Exemple de bottes commerciales en caoutchouc (Soft-Ride Ice Spa Pro®) à gauche et en polychlorure de vinyle (Jack's Whirlpool Boots®) à droite, *source : Lavado, Lewis, et Montgomery (2023)*.

Figure 6 : Exemple de sacs en polychlorure de vinyle fixés au cheval avec du *duct tape*, *source : Lavado, Lewis, et Montgomery (2023)*.

Figure 7 : Exemple d'une poche de perfusion découpée puis fixée au cheval avec du Tensoplast®, *source : van Eps et Orsini (2016).*

- « Baignoire » remplie d'eau froide recirculant (van Eps, Pollitt 2009).

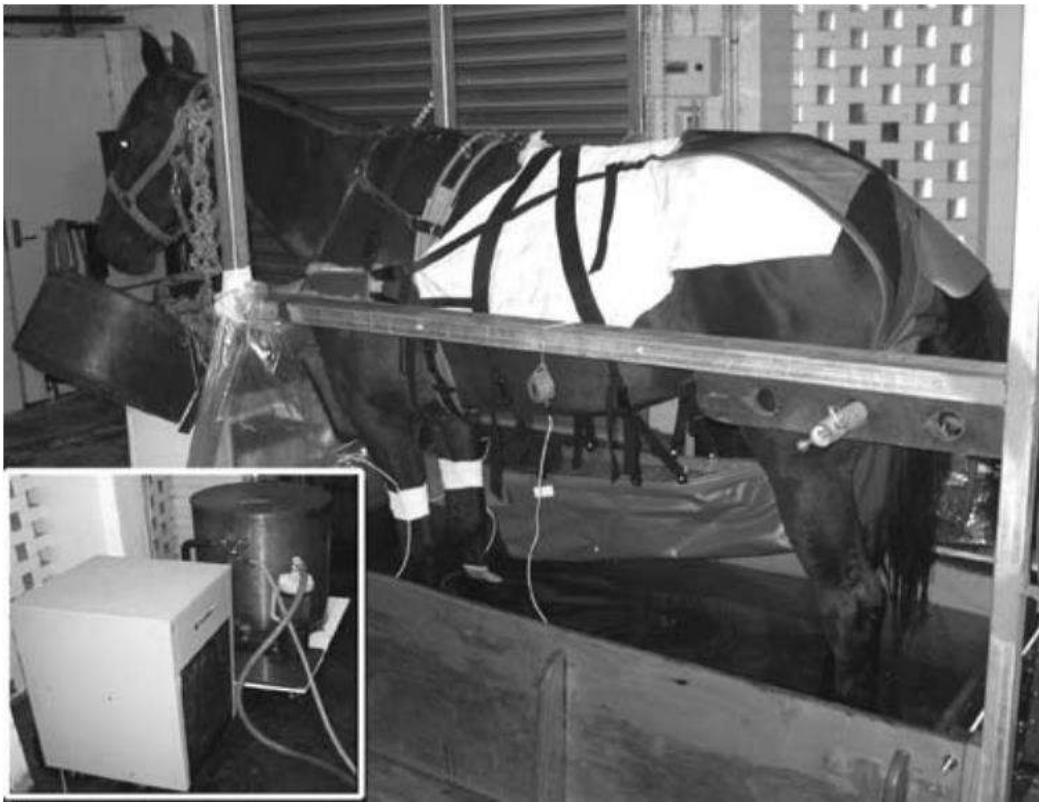


Figure 8 : Baignoire de bois contenant de l'eau à hauteur du carpe, *source : van Eps et Pollitt (2009).*
L'eau est remise en circulation et refroidie à 1 °C par une pompe réfrigérante et un échangeur de chaleur.

- **Méthodes à contact « sec » :**
    - Apposition de packs de glace (Morgan *et al.* 2018).

Figure 9 : Exemple d'une botte commerciale permettant l'application de trois packs de glace au niveau du sabot et du paturon*, source : Morgan et al. (2018)*.

- Prototype de manches dont les parois sont perfusées avec de l'eau froide recirculant (van Eps, Orsini 2016).

Figure 10 : Prototype d'une méthode de refroidissement à contact « sec », *source : van Eps et Orsini (2016).*
Le contact avec le membre distal est permis par la pression de l'air dans un compartiment externe. Le compartiment interne sert d'interface aux transferts de chaleur entre la peau et le sabot et un liquide froid circulant dans un système fermé. Le liquide circule en permanence au travers d'un système de réfrigération (non visualisé sur la photographie).

Les méthodes utilisant des bottes remplies de glace et d'eau ou par apposition de packs de glace nécessitent une surveillance rapprochée afin d'assurer un renouvellement de la glace de façon suffisamment fréquente (en général toutes les deux heures), et ainsi la continuité de l'hypothermie.
La hauteur des composés varie selon les études, pouvant s'étendre du sabot jusqu'au carpe.

Les effets secondaires de l'hypothermie digitale continue incluent œdème, desmite, cellulite, et nécrose des tissus, et concernent principalement les méthodes avec contact direct entre la glace et la peau. Proctor-Brown *et al.* (2018) rapportent des effets secondaires chez 26 % des chevaux traités par application directe de la glace sur les membres pendant au moins 12 heures.

2.2.2. Diminution de la conduction nerveuse

La cryothérapie induit une **diminution de la vitesse de conduction nerveuse apportant un effet analgésique** (Garcia *et al.* 2021).

Chez le cheval, il a été montré par exemple que diminuer la température de surface de la peau de la partie distale des membres à moins de 7 °C, par immersion dans de l'eau à moins de 2 °C pendant 30 minutes, peut réduire la réponse à la stimulation mécanique de la surface de la région considérée chez des chevaux en bonne santé. Une réduction supplémentaire de la température, en dessous de 7 °C, est associée à une augmentation de la force mécanique nécessaire pour provoquer une réponse suggérant une gêne. Il est permis de supposer que le refroidissement de la région distale des membres des chevaux a un effet analgésique potentiel direct en réponse à la stimulation mécanique de la peau (Rainger *et al*. 2021). Par ailleurs, chez des chevaux dont la boiterie est induite par des fers modifiés

avec une vis générant une pression solaire, Quam *et al.* (2021) ont montré une amélioration transitoire des scores de boiterie après cryothérapie. La cryothérapie consiste alors au maintien de la partie distale du membre jusqu'au métacarpe proximal, dans une botte contenant un mélange de glace et d'eau pendant 1 heure. Une réduction du score de boiterie jusqu'à 10 minutes après la fin de la cryothérapie est observé par rapport aux valeurs de base, suggérant un effet analgésique modéré transitoire.

À retenir :
Les effets physiologiques de la cryothérapie et de la thermothérapie sur le tonus vasculaire et le métabolisme tissulaire, ainsi que sur la perception de la douleur, constituent un moyen intéressant de prise en charge des différents stades de l'inflammation lors d'atteinte musculosquelettique.

2.3. Choix de la température

Le Tableau VII recense les différents intervalles de température correspondant aux différentes utilisations thérapeutiques de l'eau chez l'Homme (Becker 2009). Ces valeurs ne sont pas encore arrêtées chez le cheval. Il faut noter que :

- La plupart des piscines publiques ont une température entre 27 et 29 °C, ce qui est trop bas pour des exercices de réhabilitation, où les individus sont peu actifs dans l'eau. Une piscine thérapeutique doit varier entre 33,5 et 35,5 °C, des températures qui permettent une immersion relativement longue et la réalisation d'exercices de faible intensité, permettant un effet thérapeutique sans refroidissement ou surchauffe.
- Les bains d'eau chaude sont maintenus entre 37,5° et 41°C. Une température jusqu'à 41°C est rarement supportable plus de quelques minutes. Cet intervalle de température ne permet pas la réalisation d'exercices actifs.

Tableau VII : Températures d'immersion pour différents objectifs thérapeutiques chez l'Homme, *d'après Becker (2009).*

	Températures de l'eau (en °C)				
Activités	Froid (10 à 15)	Frais (26 à 29,5)	Neutre (33,5 à 35,5)	Chaud (36 à 38,5)	Très chaud (37,5 à 41)
Thérapie aquatique générale (exercices de faible intensité)			✓		
Récupération post-effort	✓				
Bains contrastes	✓			✓	✓
Exercices vigoureux		✓			
Arthrite			✓		
Réhabilitation cardiaque			✓		
Sclérose en plaques		✓			
Lésion de la moelle épinière			✓		
Maladie de Parkinson			✓		
Relaxation				✓	✓

À retenir :
Il est important de retenir de cette partie, d'après les différentes lois exposées, la particularité du stockage de chaleur lors d'exercice du cheval dans l'eau. L'absence d'évaporation et l'augmentation de la conductivité thermique associées aux exercices aquatiques nécessitent d'adapter les températures de l'eau et l'intensité des exercices. Nankervis, Thomas, et Marlin (2008) rapportent une dérive cardiovasculaire pour un exercice de faible intensité dans de l'eau dès 19°C.

V. Osmolarité

Les tests in vitro et les études cliniques ont montré que certains minéraux hydrosolubles peuvent être absorbés à travers la peau dans le système sanguin. Les effets bénéfiques des eaux minérales sont liés à leurs propriétés physiques et chimiques, telles que la température, la composition en sels, les concentrations, la pression osmotique et la conductivité électrique. Parmi les molécules inorganiques qui composent généralement les eaux minérales, le **soufre** est actuellement reconnu comme un élément crucial aux fonctions variées, notamment lorsqu'il se présente sous forme de sulfure d'hydrogène (H2S). Bien que les méthodes expérimentales, les techniques de traitement et les procédures de culture cellulaire varient d'une étude à l'autre, un nombre croissant de recherches a confirmé les **effets anti-inflammatoires, analgésiques, antioxydants, chondroprotecteurs et immunosuppressifs des eaux minérales** (Cheleschi, Gallo, Tenti 2020 ; Ma *et al.* 2021).

Chez l'homme, deux semaines d'exercice quotidien dans de l'eau minérale a montré une augmentation des seuils mécaniques de nociception (c'est-à-dire une réduction de la douleur) sur la face médiale d'articulations fémoro-tibiales avec de l'ostéoarthrose[12]. Une étude italienne[13] a montré que pour les personnes souffrant d'ostéoarthrose, une thérapie par immersion dans des spas d'eau salée est associée à une réduction du taux d'admission à l'hôpital, des thérapies physiques et pharmacologiques, et du taux d'absence au travail dans l'année suivant la thérapie par comparaison à l'année précédente. De même, chez des patients atteints de fibromyalgie, des améliorations significatives des scores de douleur jusqu'à 3 mois après la réalisation d'exercices thérapeutiques dans une piscine au soufre ont été rapportées[14]. Il a également été montré que l'immersion dans des spas avec un haut pourcentage de sodium réduit les paramètres associés à des inflammations chroniques cutanées[15] et respiratoires[16].

Des chevaux diagnostiqués avec des lésions au niveau des membres distaux ont été immergés dans des **bains salins froids** (5 à 9 °C) pendant 10 minutes, trois jours par semaine pendant quatre semaines. Les bains étaient composés de 20 g/L de chlorure de sodium et 30 g/L de sulfate de magnésium. Ces chevaux ont montré à la fois une guérison clinique et ultrasonographique des lésions du tendon du muscle fléchisseur superficiel du doigt et du ligament suspenseur du boulet. Des améliorations visuelles du degré d'enflure des tissus mous ont également été démontrées dans les 8 jours suivant le début de la thérapie saline froide. Chez ces chevaux, la tendinite et la desmite surveillées par échographie ont montré une réduction de l'œdème péri-tendineux et péri-ligamentaire, une diminution de l'infiltration inflammatoire et une amélioration de l'alignement des fibres de collagène après les 4 semaines de thérapie saline froide (Hunt 2001).

À retenir :
Les composants minéraux ajoutés dans l'eau produisent un effet osmotique, réduisant l'inflammation et l'œdème des tissus mous, diminuant la douleur et améliorant finalement l'amplitude du mouvement articulaire[17] (King *et al.* 2013a).

[12] *Yurtkuran, M., Yurtkuran, M., Alp, A., Nasircilar, A., Bingol, U., Altan, L. and Sarpdere, G. (2006) Balneotherapy and tap water therapy in the treatment of knee osteoarthritis. Rheumatol. Int. 27, 19-27.*
[13] *Fioravanti A, Valenti M, Altobelli E, Di Orio F, Nappi G, Crisanti A, et al. Clinical efficacy and cost-effectiveness evidence of spa therapy in osteoarthirits. The results of "Naiade" Italian project. Panminerva Med 2003 ; 45:211e7.*
[14] *McVeigh, J., McGaughey, H., Hall, M. and Kane, P. (2008) The effectiveness of hydrotherapy in the management of fibromyalgia syndrome: a systematic review. Rheumatol. Int. 29, 119-130.*
[15] *Zoller N, Valesky E, Hofmann M, Bereiter-Hahn J, Bernd A, Kaufmann R, et al. Impact of different spa waters on inflammation parameters in human keratinocyte HaCaT cells. Ann Dermatol 2015 ; 27:709e14.*
[16] *Passali D, De Corso E, Platzgummer S, Streitberger C, Lo Cunsolo S, Nappi G, et al. Spa therapy of upper respiratory tract inflammation. Eur Arch Otorhinolargngol 2013 ; 270:565e70.*
[17] *Bender, T., Karagulle, Z., Balint, G., Gutenbrunner, C., Balint, P. and Sukenik, S. (2005) Hydrotherapy, balneotherapy, and spa treatment in pain management. Rheumatol. Int. 25, 220-224.*

Chapitre 2 – Adaptations physiologiques au déconditionnement physique et à l'immobilisation

L'athlète équin peut être soumis à des périodes de repos et donc de déconditionnement prolongé, suite à une maladie, une blessure, des problèmes locomoteurs et la période de réhabilitation qui s'en suit.
Plusieurs études ont rapporté que les adaptations des muscles squelettiques et de la capacité aérobie du cheval suite à l'entrainement, comme l'augmentation de la capacité aérobie, l'augmentation de la densité capillaire, et l'augmentation de la capacité tampon musculaire, tendent à retourner à leur niveau pré-entrainement en 6 à 12 semaines de déconditionnement. Les complications secondaires à l'immobilisation chez le cheval sont également une faiblesse des tissus structuraux, avec une atteinte des os, des tissus articulaires, des tendons et ligaments, plus ou moins associée lors d'atteinte unilatérale d'un membre à une fourbure d'appui du membre controlatéral (Ortved, Richardson 2021).

L'immobilisation des membres distaux avec un plâtre peut être utilisée comme moyen de traitement pour différentes affections musculosquelettiques, telles que les fractures, les luxations articulaires, lacérations tendineuses, et comme protection contre le stress associé à des fixations internes.
La littérature recense peu d'études sur les effets de l'immobilisation des membres distaux, et il n'y a pas de consensus. La conclusion de ces études, et de celles menées chez l'Homme et les rongeurs s'accordent sur le fait que la sévérité des changements observés dépend de l'âge de l'individu et de la durée de l'immobilisation (Stewart *et al.* 2020).

I. Modifications cardiovasculaires

La consommation maximale d'oxygène (VO2max) est définie comme le taux maximal auquel l'oxygène peut être absorbé puis utilisé par le corps durant un exercice de haute intensité. En général, la VO2max est considérée comme le paramètre le plus efficace pour évaluer la fonctionnalité du système cardiovasculaire humain. La VO2max est également un déterminant des performances d'endurance des athlètes et l'une des méthodes standards pour évaluer les effets de l'entrainement aérobie sur les athlètes (Zheng *et al*. 2022).

1. Chez l'Homme

Plusieurs anciennes études ont montré que la consommation maximale en oxygène décline de 6 à 14 % chez les athlètes entrainés mis au repos pendant 3 à 6 semaines, menant à une perte significative de condition cardiovasculaire (Dimitrakopoulou *et al.* 2023).
La VO2max peut être influencée par plusieurs facteurs :

- Des facteurs centraux tels que la capacité pulmonaire, le débit cardiaque et la capacité de transport de l'oxygène dans le sang ;
- Des facteurs périphériques, tels que l'efficacité des muscles squelettiques dans la diffusion de l'oxygène depuis les vaisseaux capillaires musculaires aux myocytes.

Avec le déconditionnement, le débit cardiaque maximal diminue (Petek *et al*. 2022), tout comme l'extraction de l'oxygène par les muscles squelettiques, associés à une réduction de la force et puissance musculaire. Bien que les deux types de facteurs soient probablement impliqués, les études menées montrent que les facteurs centraux sont les principaux éléments limitants de la consommation maximale d'oxygène (Almeida *et al*. 2018).
Chez des joueurs de football avec une lésion du ligament croisé antérieur, un déconditionnement d'une moyenne de trois mois (entre 1 et 12 mois), lié à l'attente de la chirurgie de reconstruction, est associé à une réduction significative de la VO2max (20 %). Ensuite, même après six mois de

rééducation, la fonction aérobie n'est pas complètement restaurée (réduite de 14 %), de même que la vitesse de course à VO2max (Almeida *et al*. 2018).
De la même façon, dans leur revue sur l'athlète humain, Zheng *et al*. (2022) ont montré des diminutions significatives de la VO2max entre 3,93 % et 9,43 % après une cessation d'entrainement à court terme (moins de 30 jours) et à long terme (30 à 90 jours), respectivement. Sur le long terme, les athlètes ayant une VO2max initialement plus élevée subissent une baisse significative de la VO2max par rapport à ceux ayant un niveau d'entrainement inférieur, et il apparait que la cessation partielle d'entrainement a moins d'effets sur la VO2max que l'arrêt complet. Ces différences sont moins marquées pour une cessation d'entrainement sur le court terme.

À retenir :
Dès 3 à 4 semaines de cessation de l'activité, une diminution de la VO2max des athlètes est observée. Plusieurs mois peuvent ensuite être nécessaires à sa restauration. Ces études suggèrent que les recherches devraient donc se concentrer sur des stratégies visant à réduire le déconditionnement cardiovasculaire des athlètes lors de période de cessation de l'entrainement. Notamment, la cessation partielle d'entrainement a moins d'effets sur la VO2max que l'arrêt complet.

La réduction de la VO2max semble progressive et proportionnelle au niveau de condition physique individuel. Cependant, bien que la VO2max soit souvent considérée comme un marqueur indirect de la capacité d'endurance, les changements de VO2max peuvent ne pas être toujours directement corrélés aux altérations des performances d'endurance. Par exemple, il a été montré qu'une cessation d'entrainement de 4 semaines est associée à une réduction des performances lors d'un test d'effort, sans affecter directement la VO2max chez des athlètes d'endurance bien entrainés (Girardi *et al.* 2020).

2. Chez le cheval

Plusieurs études ont rapporté l'évolution de la capacité maximale aérobie pour différentes périodes de déconditionnement, associée plus ou moins à une diminution concomitante des performances de course. Les résultats divergent en partie avec :

- Un retour de la VO2max au niveau pré-entrainement en deux à trois semaines. La VO2max diminue ainsi de 10 % pour un repos de trois semaines au box avec 15 minutes de marche par jour (Art, Lekeux 1993) et de 11 % pour un repos de deux semaines en paddock[18].
- Un retour partiel de la VO2max au niveau pré-entrainement à partir de six semaines de repos au paddock. La VO2max est ainsi diminuée de 6 % à six semaines de repos et 8 % à 12 semaines de repos. Néanmoins, à 12 semaines de repos au paddock, la VO2max est toujours 15 % supérieure aux valeurs pré-entrainement. Le déconditionnement est évalué suite à 34 semaines d'entrainement (Tyler *et al*. 1996).
- Un maintien de la VO2max pendant les 15 semaines de repos avec marche quotidienne de 20 minutes. Le déconditionnement est évalué suite à six mois d'entrainement[19].

Plus récemment, Mukai *et al*. (2017) se sont proposés d'étudier l'effet de différents types de déconditionnements sur 27 pur-sang anglais. Les chevaux sont entrainés sur un tapis de course incliné à 6 %, cinq jours par semaine, pendant 18 semaines ; puis ils sont soumis à une période de **déconditionnement de 12 semaines** selon trois protocoles pouvant être utilisés pour certaines affections fréquentes chez le cheval de course :

[18] *Knight, P.K., Sinha, A.K. and Rose, R.J. (1991) Effects of training intensity on maximum oxygen uptake. In: Equine Exercise Physiology 3, Eds: S.G.B. Persson, A. Lindholm and L.B. Jeffcott, KEEP Publications, Davis. pp 77-82.*
[19] *Butler, P.J., Woakes, A.J., Anderson, L.S., Smale, K., Roberts, C.A. and Snow, D.H. (1991) The effect of cessation of training on cardiorespiratory variables during exercise. In: Equine Exercise Physiology 3, Eds: S.G.B. Persson, A. Lindholm and L.B. Jeffcott, ICEEP Publications, Davis. pp 71-76.*

- Canter à 70 % de la VO2max pendant trois minutes par jour, cinq jours par semaine – pour un cheval nécessitant un entrainement moins rapide suite à des douleurs musculaires après une course par exemple ;
- Marche une heure par jour à 1,7 m/s sur un tapis de course, cinq jours par semaine – suite à une tendinite par exemple ;
- Repos au box strict (3 x 3 m) – suite à une fracture par exemple.

Les résultats de l'étude sont donnés dans le Tableau VIII ci-dessous.

Tableau VIII : Résultats de l'étude menée par Mukai *et al.* en 2017, après 12 semaines de déconditionnement par comparaison aux valeurs post-entrainement, *source : Delacharlerie Aurore.*

VO2 max/kg de poids corporel	- Diminution significative de 7,2 % (canter), 12,4 % (marche), 13,2 % (box) - Absence de différence significative entre les groupes
Vitesse de course à laquelle VO2max est atteinte (vVO2max)	- Inchangée pour le canter - Diminution significative de 7,1 % (marche) et 9,6 % (box)
Débit cardiaque et volume d'éjection systolique maximaux/kg de poids corporel	- Diminués significativement (canter, marche, box) - Absence de différence significative entre les groupes
Temps de course avant épuisement	- Inchangé pour le canter - Diminution significative de 26,3 % (marche) et 33,1 % (box)
Vitesse à laquelle la fréquence cardiaque maximale est atteinte (vFCmax)	- Inchangée pour le canter - Diminution significative de 8 % (marche) et 13,4 % (box)
Vitesse à laquelle la concentration en lactates dans le plasma atteint 4 mmol/L (vLa4)	- Inchangée pour le canter - Diminution significative de 14,5 % (marche) et 17,1 % (box)
Différence artério-veineuse en oxygène (CavO2) et concentration en hémoglobine	- Inchangée pour les 3 groupes (canter, marche, box)

Selon la loi de Fick, la VO2 est donnée par $VO2 = débit\ cardiaque * différence\ artério - veineuse\ en\ oxygène$. **La diminution de la VO2max est donc ici liée à une diminution du débit cardiaque maximale**, CavO2 n'étant pas modifiée. La diminution du volume d'éjection systolique observée peut résulter de la diminution du volume de sang total et du volume de plasma sanguin. Il a été montré que deux à quatre semaines d'inactivité chez les athlètes d'endurance humains diminuent le volume sanguin par 9 % pendant l'exercice[20].

Les auteurs s'attendaient à une diminution moins importante de la VO2max post-entrainement pour le groupe suivant le protocole de déconditionnement avec canter, par comparaison aux deux autres protocoles. L'absence de différence significative entre les trois groupes observés dans l'étude doit être interprétée avec prudence, du fait de la variabilité des chevaux au sein d'un même groupe.

Malgré la réduction après déconditionnement de la VO2max/kg dans le groupe avec canter, les chevaux maintiennent le temps de course avant épuisement (qui est un indice de performance), ainsi que les vLa4, vVO2max et vFCmax. Ces résultats suggèrent que certaines adaptations physiologiques en réponse à l'entrainement ne sont pas régulées uniformément et peuvent changer à des taux différents pendant les périodes d'entrainement ou de déconditionnement. Le mécanisme par lequel les valeurs de certaines variables de performance induites par l'entrainement ont été mieux

[20] *Coyle EF, Hemmert MK, Coggan AR. Effects of detraining on cardiovascular responses to exercise: role of blood volume. J Appl Physiol 1986;60:95–99.*

maintenues que les valeurs de certaines variables associées au transport de l'oxygène est intrigant. Une meilleure compréhension de ces relations pourrait être bénéfique pour la conception de protocoles de déconditionnement pour les chevaux de course, minimisant les effets sur la performance et accélérant le retour du cheval en course à niveau après une période de déconditionnement.

Durant la période de déconditionnement, l'intensité de l'exercice et la dépense énergétique quotidienne totale de locomotion ont été estimées à 9 % de la VO2max et 16,1 J/kg, respectivement pour le groupe avec marche ; et 70 % de la VO2max et 10,7 J/kg, respectivement pour le groupe avec canter. Bien que la dépense énergétique totale du groupe avec canter ne représente que les deux tiers de celle du groupe avec marche, le groupe avec canter montre lui un maintien de plusieurs facteurs liés à la performance, notamment les vVO2max, vFCmax, vLa4 et le temps de course avant épuisement. On peut supposer que le groupe avec marche n'a pas réussi à maintenir ces facteurs en raison de son intensité d'exercice plus faible pendant la période de déconditionnement. Cela **suggère que les chevaux nécessitent d'être entrainés à une intensité supérieure à une intensité modérée, au moins périodiquement, pour maintenir le débit cardiaque maximale et la VO2max.** Chez l'Homme, il a été montré que l'intensité d'entrainement est plus importante dans le maintien de la VO2max que la fréquence (Zheng *et al.* 2022).

Le groupe avec déconditionnement au box montre des vFCmax et vVO2max significativement inférieures au groupe avec canter, mais pas le groupe suivant un protocole de marche, ce qui suggère que **même la simple marche pendant la période de déconditionnement pourrait contribuer à maintenir certains facteurs liés à la capacité aérobie induite par l'entrainement**. Pendant la période de déconditionnement, **marcher pendant une heure chaque jour pourrait aider à maintenir les vFCmax et vVO2max, par rapport aux effets du repos au box.**

Quel que soit le protocole de déconditionnement, la concentration artérielle en oxygène n'est pas diminuée chez les chevaux après 12 semaines de déconditionnement.

Ces résultats suggèrent qu'il serait possible d'identifier un seuil d'intensité d'exercice minimal ou un protocole pendant la période de déconditionnement chez les chevaux, qui maintienne les variables liées à la performance et limite les diminutions de la capacité de transport d'oxygène.

L'étude menée par Klein, Anthony, et McKeever (2020) apporte une nuance aux résultats précédents. Huit trotteurs sont entrainés pendant 72 semaines, puis soumis à une période de déconditionnement de 20 semaines. Pendant le déconditionnement, les chevaux sont placés en pâture de 0,8 hectare et ne sont soumis à aucun autre exercice. **Une augmentation significative de 10 % de la VO2 max, du temps de course avant fatigue et de la distance parcourue avant fatigue est observée suite aux 72 semaines d'entrainement, et se maintient sur les 20 semaines de repos**. La période de repos étant effectuée en pâture, une évaluation de l'activité spontanée des chevaux pourrait être pertinente. Il a été rapporté que l'activité quotidienne moyenne (distance parcourue) des chevaux non entrainés en pâture dans des champs de deux hectares pendant environ sept heures par jour en été, était de 6,9 ± 0,4 km/jour[21]. Les résultats suggèrent donc qu'un repos en pâture jusqu'à 20 semaines pourrait être une alternative pour conserver la capacité aérobie et les performances de course acquises suite à un entrainement suffisamment intensif. Cependant, il faut rester prudent sur l'interprétation, et l'étude ne peut être étendue aux modifications physiologiques associées à un repos en box comme certaines affections peuvent l'exiger. Ces résultats sont appuyés par l'étude de Mukai *et al*. (2006). Ils entrainent six pur-sang anglais pendant six mois, puis ils sont mis au repos pendant dix semaines dans un pâturage de deux hectares, huit heures par jour, et au box la nuit. Bien que les chevaux de l'étude montrent une diminution significative de la VO2max/kg de poids corporel après les dix semaines de

[21] *Ohmura, H., Hiraga, A., Matsui, A., Aida, H., Inoue, Y., Asai, Y. and Jones, J.H. (2002) Physiological responses of young Thoroughbreds during their first year of race training. Equine vet. J., Suppl. 34, 140-146.*

déconditionnement (en lien avec l'augmentation du poids corporel), la VO2max globale reste inchangée, suggérant une absence de changement dans la demande mitochondriale en dioxygène à VO2max et indiquant que l'apport en oxygène aux muscles après le déconditionnement est toujours adéquat pour répondre à la demande. Le débit cardiaque et le volume d'éjection systolique restent également inchangés. Cela suggère donc encore qu'une **quantité modeste d'exercice pendant une période de déconditionnement pourrait suffire à maintenir les capacités aérobies et circulatoires chez les chevaux**.

À retenir :

Les différentes études menées sur le déconditionnement cardiovasculaire de l'athlète équin présentent des résultats contradictoires, potentiellement du fait de variations dans les paramètres des études. La condition aérobie des chevaux au début de la période de déconditionnement, et le type de déconditionnement – box strict, ou associé à de la marche ou du trot, ou paddock – diffèrent.

De façon générale, une diminution de la VO2max est observée après 2 à 15 semaines de déconditionnement chez le cheval. Néanmoins, deux études rapportent une conservation de la VO2max après 15 à 20 semaines de repos avec marche quotidienne ou paddock.

Il apparait que des exercices d'intensité suffisante au moins périodiquement, ou qu'une quantité modeste d'exercice quotidiennement (comme de la marche), pourraient suffire à maintenir les capacités aérobies et circulatoires chez les chevaux lors de périodes de déconditionnement.

II. Modifications musculaires et métaboliques

1. Chez l'Homme

Il existe plusieurs études dans la littérature montrant à la fois une diminution significative de la VO2max chez les athlètes entrainés soumis à une période de déconditionnement de trois à six semaines, comme vu dans la partie précédente, mais aussi une réduction de la densité capillaire musculaire, de la capacité oxydative, de l'aire moyenne de coupe transversale des fibres musculaires, de l'activité électromyographique, ainsi que des changements de type de fibres (transition des fibres musculaires lentes à rapides) (Zhang *et al.* 2017 ; Girardi *et al.* 2020 ; Głyk *et al.* 2022). Il a également été montré que de jeunes adultes présentent une diminution de la force volontaire des membres inférieurs et de la force maximale de contraction des muscles extenseurs du genou en réponse à une réduction progressive de l'activité pendant deux semaines (diminution du nombre de pas par jour et sédentarité). Une semaine de réduction du nombre de pas de 91 % entraine par exemple une baisse de 27 % de la synthèse quotidienne des protéines myofibrillaires (Oikawa, Holloway, Phillips 2019 ; Shad *et al.* 2019 ; Tyganov *et al.* 2023).

2. Chez le cheval

Il est admis que la résistance à la fatigue dépend d'une augmentation du nombre de mitochondries et de la capillarisation musculaire, d'une activité accrue des enzymes musculaires oxydatives, d'une diminution de la mobilisation du glycogène endogène et d'une utilisation préférentielle de l'oxydation des lipides comme source d'énergie. Ces adaptations musculaires liées à l'entrainement ont un impact sur les performances athlétiques des chevaux, avec une augmentation significative de la vLa4, utilisée comme indicateur du potentiel aérobie intrinsèque, en réponse à l'entrainement (Serrano, Quiroz-Rothe, Rivero 2000). L'entrainement est associé à une amélioration des capacités aérobies et anaérobies de chevaux (Pösö, Hyyppä, Geor 2008).

Ces adaptations peuvent se perdre lors de périodes prolongées de cessation de l'entrainement. Serrano, Quiroz-Rothe, et Rivero (2000) étudient la réponse musculaire et métabolique du muscle fessier moyen de 16 chevaux à un programme d'entrainement aérobie de huit mois, suivi d'une période de repos au paddock de trois mois. McGowan *et al.* (2002) réalisent une étude similaire chez 13 *Standardbred* (cheval trotteur) avec 34 semaines d'entrainement suivies de 12 semaines de repos au paddock. Les résultats de ces études sont présentés dans le Tableau IX ci-dessous.

<u>Tableau IX</u> : Résultats des études menées par Serrano, Quiroz-Rothe, et Rivero (2000) et McGowan *et al.* (2002), sur la réponse des paramètres musculaires et métaboliques à l'entrainement puis au déconditionnement, *source : Delacharlerie Aurore.*

Indicateurs des capacités aérobies	**Vitesse pour laquelle la concentration sanguine en lactates atteint 4 mmol/L (vLa4)**	Augmentation significative (30 %) après huit mois d'entrainement et diminution significative (15 %) après trois mois de déconditionnement (Serrano, Quiroz-Rothe, Rivero 2000).
	Types de fibres musculaires	Les fibres de type IIX diminuent et les fibres de type IIA augmentent significativement dès trois mois d'entrainement, et les fibres de type I augmentent significativement à huit mois d'entrainement. Avec le déconditionnement, une ré-augmentation significative des fibres de type IIX, et une diminution concomitante non significative des fibres de type IIA et I sont observées (Serrano, Quiroz-Rothe, Rivero 2000).
	Densité capillaire musculaire	Augmentation de la densité capillaire après huit mois d'entrainement, et retour au niveau pré-entrainement après trois mois de déconditionnement (Serrano, Quiroz-Rothe, Rivero 2000).
	Activité des enzymes aérobies - **Citrate Synthase (CS)** - **3 Hydroxyacyl Coenzyme A Déshydrogénase (HAD) (oxydation des lipides)**	- L'activité de la CS augmente de 22 % dès trois mois d'entrainement puis de 30 % à huit mois, et retourne au niveau pré-entrainement après trois mois de déconditionnement. L'activité de la HAD augmente significativement après trois et huit mois d'entrainement, mais diminue significativement après trois mois sans entrainement (Serrano, Quiroz-Rothe, Rivero 2000). - L'activité des CS et HAD augmente après 34 semaines d'entrainement, puis diminue au niveau pré-entrainement en six à huit semaines de repos (McGowan *et al*. 2002).
	Concentration musculaire en glycogène	Augmentation significative avec l'entrainement, et diminution significative lors du déconditionnement (Serrano, Quiroz-Rothe, Rivero 2000).
	Concentration musculaire en triglycérides	Augmentation significative avec l'entrainement, et diminution significative lors du déconditionnement (Serrano, Quiroz-Rothe, Rivero 2000).
Indicateurs des capacités anaérobies	**Capacité tampon musculaire**	La capacité tampon musculaire qui augmente avec l'entrainement diminue, elle, de 11 % après 12 semaines de déconditionnement (McGowan *et al.* 2002).
	Activité des enzymes anaérobies - **Lactate déshydrogénase (LDH)** - **Phosphofructokinase**	- Diminution de l'activité de ces deux enzymes après huit mois d'entrainement. L'activité de la LDH ré-augmente au niveau pré-entrainement après trois mois de déconditionnement (Serrano, Quiroz-Rothe, Rivero 2000). - Diminution de l'activité de la LDH (24 %) après 32 semaines d'entrainement, puis ré-augmentation à la valeur pré-entrainement après 12 semaines de déconditionnement.
	Concentration musculaire en lactates	Réduction de la concentration musculaire en lactates pour une charge de travail donnée après 34 semaines d'entrainement, puis ré-augmentation significative de la concentration après six semaines de déconditionnement (McGowan *et al.* 2002).

À retenir :
Les résultats de ces études montrent une perte des adaptations physiologiques musculaires aérobies et anaérobies en réponse à un déconditionnement dès 6 semaines à 3 mois.

Notamment, l'étude menée par Serrano, Quiroz-Rothe, et Rivero (2000) est en accord avec la transition en type de fibres observée lors d'entrainement d'endurance, avec typiquement une évolution de fibres rapides à métabolisme glycolytique vers des fibres plus lentes à métabolisme oxydatif : IIX → IIA → I (Rivero, Piercy 2008). Elle permet de conclure qu'une période de déconditionnement suffisamment longue (trois mois) induit une transition dans la direction opposée.

Cependant, Essén-Gustavsson *et al.* (1989) ont entrainé intensivement cinq chevaux pendant cinq semaines, suivies de cinq semaines de déconditionnement strictement en box. Ils ont montré, à partir de biopsie du muscle fessier moyen, le maintien des capacités oxydatives (activité de la CS), et de la densité capillaire musculaire. Puis, suite à six semaines de déconditionnement en paddock, Tyler *et al*. (1998) ont eux montré une absence d'altération des caractéristiques des fibres musculaires et de la capillarisation, malgré une diminution de la VO2max (6 %) et du temps de course jusqu'à épuisement (26 %). Ils ont alors supposé que les modifications des fibres musculaires survenaient probablement moins rapidement et que la période de déconditionnement était trop courte pour observer une réponse.

Serrano, Quiroz-Rothe, et Rivero (2000) ont découvert que les altérations induites par l'entrainement et la période de déconditionnement ne sont pas homogènes dans le muscle fessier moyen, et sont plus marquées dans la région profonde du muscle que dans les couches intermédiaires et superficielles. Cela est en accord avec une hypothèse[22], basée sur l'hétérogénéité des caractéristiques musculaires, selon laquelle la région profonde du muscle joue un rôle plus actif dans les exercices d'endurance, contrairement aux zones superficielles qui sont davantage impliquées dans les activités de vitesse et de haute intensité. De manière intéressante, cette hétérogénéité de la réponse musculaire à l'entrainement pourrait expliquer les différences de conclusion des études sur le déconditionnement musculaire chez les chevaux.

[22] *Serrano AL, Petrie JL, Rivero JLL, Hermanson JW (1996) Myosin isoforms and muscle fibre characteristics in equine gluteus medius muscle. Anat Rec 244:444–451.*

III. Ostéopénie de non utilisation

1. Généralités

Chez les équidés comme chez l'Homme, **l'intégrité du squelette est maintenue par le processus de modelage et remaniement osseux** (Lepage, Perron-Lepage, François 1996; 1997), c'est-à-dire l'élimination équilibrée de la vieille matrice osseuse par les ostéoclastes résorbant l'os et le dépôt de nouveau tissu osseux par les ostéoblastes formant l'os. Les paradigmes de modelage et de remaniement osseux, initiés par Julius Wolff, améliorés par Wilhelm Roux (avec la loi de Wolff) et développés par Harold Frost (avec la théorie du mécanostat) ont permis d'établir que le squelette est un tissu dynamique capable de modifier sa masse et sa structure en réponse aux charges mécaniques qui s'appliquent sur lui (Hart *et al*. 2020 ; Rolvien, Amling 2022). Les ostéocytes, qui correspondent à la différenciation terminale des ostéoblastes, sont intégrés à la matrice osseuse dans un système lacuno-canaliculaire, et présentent la capacité de détecter les charges qui s'appliquent sur l'os et de traduire ces signaux mécaniques en signaux biochimiques pour orchestrer le remaniement osseux. Ils jouent un rôle majeur dans la mécanotransduction (Rolvien, Amling 2022).

Il a été démontré que **les conditions de « non utilisation » du tissu osseux se caractérisent par une combinaison défavorable de forte résorption et faible formation osseuse, entrainant une perte de tissu osseux et finalement de l'ostéopénie** voire de l'ostéoporose avec un risque accru de fractures. Par opposition, une mise en charge du squelette entraine une réponse osseuse anabolique avec une augmentation de la formation osseuse. Le terme « ostéopénie de non utilisation » comprend diverses situations cliniques de déchargement mécanique, comme lors d'immobilisation sous plâtre d'un membre chez le cheval (Delguste *et al*. 2007), ou notamment chez l'Homme d'immobilisation suite à des lésions de la moelle épinière, maladies neuromusculaires, l'alitement, des vols spatiaux, associées à une perte osseuse (Rolvien, Amling 2022).

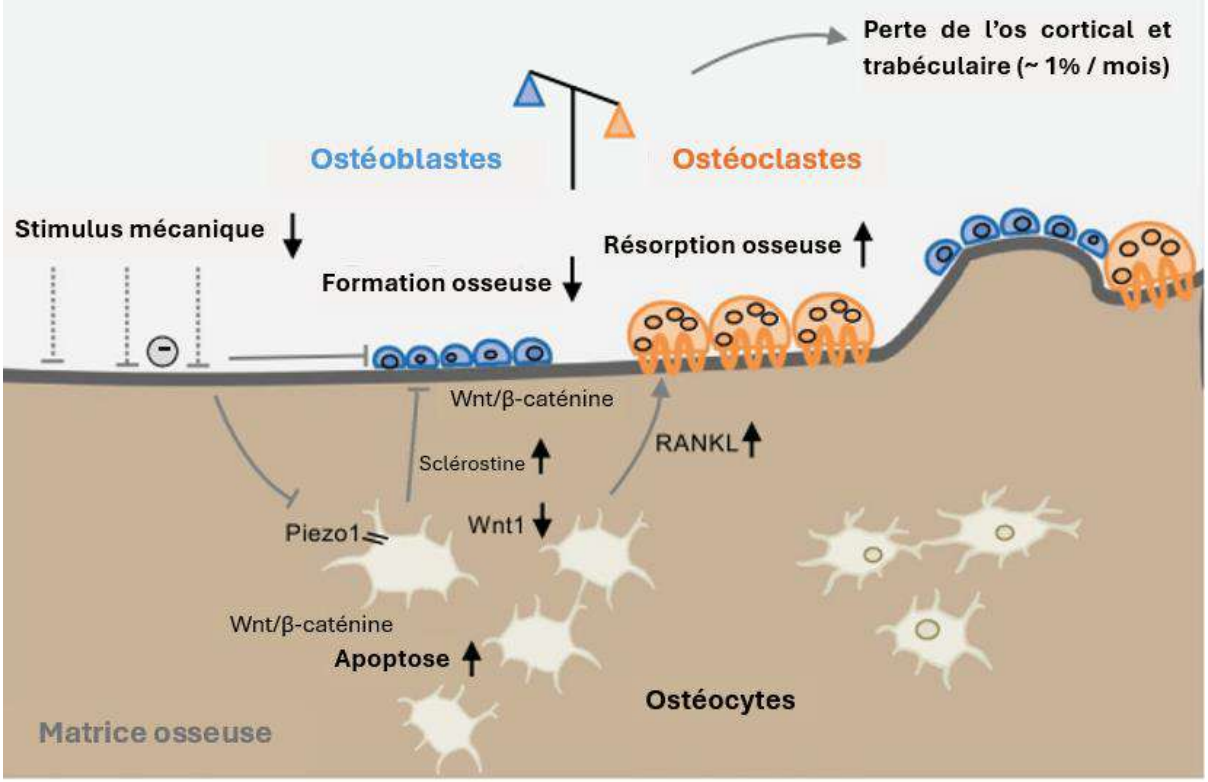
Les muscles squelettiques s'insèrent sur les os et permettent leur mouvement par contraction musculaire. Par conséquent, **les muscles exposent les os à différents types de stimuli mécaniques** en fonction de l'activité musculaire (isométrique, statique, pliométrique, concentrique, excentrique, basse/haute fréquence, etc.), ce qui correspond aux principales contraintes mécaniques qui s'exercent sur les os. Le couplage biomécanique dans l'unité musculosquelettique est expliqué par la théorie du mécanostat, qui stipule que l'os ajuste sa masse et son architecture pour subir des contraintes dans une fenêtre physiologique. Des contraintes supérieures à cette fenêtre induiront la formation osseuse, tandis que des contraintes inférieures entraineront la résorption osseuse. En plus de la transmission de charge entre muscle et os, les deux tissus montrent des adaptations hypertrophiques ou hypotrophiques co-dépendantes. L'activité physique augmente à la fois la masse musculaire et osseuse, tandis que le vieillissement ou la non utilisation entraine une perte de masse dans les deux organes (Maurel, Jähn, Lara-Castillo 2017). **La perte osseuse lors de « non utilisation » est donc due principalement à un manque de mouvement et de tension aux insertions musculaires, mais également à la stimulation mécanique plus faible liée à l'absence de mise en charge.**

A partir de l'étude de l'ulna d'un coq, Rubin et Lanyon (1984)[23] ont examiné la relation entre le nombre de cycles de mise en charge du tissu osseux imposés quotidiennement et l'effet résultant sur la masse osseuse en termes de contenu minéral osseux et de section transversale. La masse osseuse est maintenue avec seulement quatre cycles de chargement par jour, tandis qu'un arrêt complet de la mise en charge entraine une diminution du tissu osseux, principalement par résorption endostéale conduisant à une réduction de l'épaisseur corticale, ainsi qu'à une augmentation de la porosité corticale. Cette étude suggère que **de courtes périodes de déformation ostéogénique cyclique**

[23] *Rubin CT, Lanyon LE. Regulation of bone formation by applied dynamic loads. J Bone Joint Surg (Am) 1984; 66(3):397–402.*

peuvent induire une réponse adaptative osseuse suffisante. En ce qui concerne le conditionnement osseux des athlètes équins, cela pourrait être interprété comme de courtes périodes de trot quotidien. Il faut retenir que le stimulus semble nécessiter une déformation cyclique, car l'application d'une charge constante n'induit pas d'adaptation osseuse (Goodship, Smith 2008).

Il existe de nombreuses études chez les rongeurs s'intéressant à la charge mécanique, au remaniement osseux et à la mécanobiologie des ostéocytes. Chez les souris, le vol spatial est associé à la résorption trabéculaire et corticale ainsi qu'à une augmentation du nombre de lacunes ostéocytaires corticales vides. Des modifications ostéocytaires suite à l'immobilisation sont observées, notamment une augmentation de l'apoptose des ostéocytes (Rolvien, Amling 2022).



<u>Figure 11</u> : Modèle schématique des voies moléculaires impliquées dans le processus d'ostéopénie de non utilisation, *d'après Rolvien et Amling (2022).*

La mécanosensation par les ostéocytes est médiée par le système lacuno-canaliculaire et via les canaux ioniques de la famille Piezo (principalement Piezo1). L'inactivation de Piezo1 entraine une diminution de l'expression de Wnt1. De plus, la sécrétion de sclérostine par les ostéocytes augmente en réponse à l'absence de mise en charge, ce qui inhibe la voie Wnt/β-caténine et entraine une activité ostéoblastique réduite. Le déchargement entraine également une augmentation de l'apoptose des ostéocytes (en partie via la signalisation Wnt/β-caténine) et une augmentation de l'expression de RANKL, favorisant la résorption osseuse accrue. L'irisine, une myokine dérivée du muscle en réponse à l'exercice, est également impliquée dans la mécanotransduction musculosquelettique. La matrice extracellulaire, les cils primaires, les adhérences focales basées sur les intégrines et les jonctions intercellulaires basées sur les connexines ont également été identifiés comme contribuant à la mécanotransduction.

2. Chez le cheval

Les effets de l'immobilisation suivie d'une remise en mouvement, sur le métabolisme osseux des membres chez le cheval, ont été étudiés à travers l'immobilisation dans un plâtre dans plusieurs études. Eagle *et al.* (1982)[24] ont signalé la présence d'ostéopénie après six semaines d'immobilisation complète avec un plâtre des membres de poneys. Delguste *et al.* (2007) se sont intéressés à l'immobilisation dans un plâtre du membre antérieur gauche chez huit trotteurs pendant huit semaines en box, suivie d'une période de remobilisation de quatre semaines, puis d'entrainement de huit semaines. Les CTX-1 (C-télopeptide du collagène de type 1 *cross-links*), marqueurs de la résorption osseuse, sont significativement augmentés pendant la période d'immobilisation (jusqu'à 72 % au dessus des valeurs de base) puis diminuent pendant la remobilisation et augmentent légèrement pendant l'entrainement. Les ALP (isoenzyme de la phosphatase alcaline), marqueurs de la formation osseuse, chutent de 50 à 60 % pendant les périodes d'immobilisation et remobilisation, puis augmentent significativement pendant l'entrainement. **L'augmentation des CTX-1 et la diminution des ALP pendant la période d'immobilisation suggèrent dans l'ensemble une balance négative du remaniement osseux.** Buckingham et Jeffcott (1991)[25] ont rapporté eux la présence d'une ostéopénie légère, avec une diminution significative de la masse osseuse, après huit semaines d'immobilisation dans un plâtre. Après le retrait du plâtre, les chevaux ont été maintenus au box pendant huit semaines, puis mis au paddock pendant quatre semaines supplémentaires. La récupération de la masse osseuse jusqu'aux valeurs pré-immobilisation a semblé se développer plus rapidement pendant la période d'exercice au paddock, par rapport au repos en box seul (van Harreveld *et al.* 2002b).

L'immobilisation de l'articulation métacarpo-phalangienne d'un membre pendant sept semaines chez cinq chevaux sains au box est également étudiée par van Harreveld *et al*. (2002a) et van Harreveld *et al.* (2002b). Suite au retrait du plâtre, les chevaux sont soumis à une période d'exercice d'intensité croissante de huit semaines avec d'abord marche en main puis exercice sur tapis de course.
Ils ont montré une diminution significative persistante, de 20 à 30 %, des forces verticales maximales de réaction du sol pour le membre antérieur immobilisé, par rapport au membre controlatéral, deux semaines après le retrait du plâtre. **Ce pic de forces verticales de réaction du sol est néanmoins restauré aux valeurs pré-immobilisation après les huit semaines d'exercice**.
Au niveau radiographique, une ostéopénie définie comme une diminution de l'opacité minérale et du contenu de l'os cortical du troisième métacarpe, de la première phalange, et des os sésamoïdes proximaux, était apparente pour tous les membres immobilisés au moment du retrait du plâtre. Cette ostéopénie était **toujours objectivée après les huit semaines d'exercice**, bien que la densité osseuse ait semblé s'améliorer chez chaque cheval. En revanche, aucun changement radiographique n'a été identifié sur le membre controlatéral d'aucun cheval pendant l'étude. À la microradiographie, une augmentation du motif trabéculaire a également été observée, et attribuée à une perte présumée de petites trabécules rendant les trabécules restantes plus visibles radiographiquement dans l'os immobilisé.
Il faut noter que la première phalange a été plus affectée par l'immobilisation que la partie distale du troisième métacarpe. Cela peut être attribué à la position anatomique des os dans le plâtre. Le troisième métacarpe était immobilisé dans une position permettant encore le support de poids, fournissant ainsi un stimulus pour le maintien du contenu minéral osseux, contrairement à la première phalange. Sur la base des résultats rapportés dans ces études, il est possible d'affirmer que **la masse osseuse et la teneur osseuse en minéraux n'ont pas récupéré leurs valeurs normales dans les os immobilisés sept semaines, après huit semaines d'exercice.**

[24] Eagle MT, Koch DB, Whalen JP, et al. Mineral metabolism and immobilization osteopenia in ponies treated with 25-hydroxycholecalciferol. Cornell Vet 1982;72:372-393.
[25] Buckingham SHW, Jeffcott LB. Osteopenic effects of forelimb immobilization in horses. Vet Rec 1991;128:370–373.

Plus récemment, Stewart *et al.* (2020) immobilisent cette même articulation métacarpo-phalangienne dans un plâtre chez huit chevaux sains pour huit semaines, suivies par 12 semaines d'un programme d'entrainement avec marche en main puis tapis de course.
Dans le membre immobilisé, au retrait du plâtre, une **perte de densité osseuse** au niveau des condyles du troisième métacarpe et des os sésamoïdiens proximaux a été observée sur les images de tomodensitométrie ; une augmentation du fluide dans l'os trabéculaire a été objectivée par l'imagerie par résonnance magnétique ; et des ostéophytes, enthésophytes et une fragmentation d'un os sésamoïde proximal ont été rapportés chez certains chevaux. **Un plâtre au niveau du membre distal peut modifier la répartition du poids dans cette région du membre, et une charge articulaire anormale peut alors affecter la densité osseuse globale. Il est donc possible que la diminution de la densité osseuse au niveau des condyles du troisième métacarpe puisse être observée chez les chevaux lors de lésions causant de la douleur et une réticence à la mise en charge du membre et au support du poids du corps.**
Dans les études précédentes, il a été démontré que huit semaines de remobilisation ne suffisent pas à rétablir la densité minérale osseuse, et les résultats de Stewart *et al*. (2020) montrent que prolonger la période de remobilisation à 12 semaines est également insuffisant. La durée nécessaire pour rétablir complètement la densité osseuse d'origine dans les os de l'articulation métacarpo-phalangienne n'est pas définie. Il a été **proposé une période de remobilisation jusqu'à 2 fois la phase d'immobilisation pour restaurer complètement les caractéristiques normales de l'os**[26].

À retenir :
L'immobilisation est associée à une balance négative du remaniement osseux.
De l'ostéopénie est observée chez le cheval dès six à huit semaines d'immobilisation d'un membre dans un plâtre. Il est permis de supposer que lors de lésions causant de la douleur et une réticence à la mise en charge du membre et au support du poids du corps, des effets similaires puissent être observés. Une période de 12 semaines de remobilisation s'avère ensuite insuffisante à rétablir la densité minérale osseuse.
De façon général, les muscles exposent les os à différents types de stimuli mécaniques par les mouvements et tensions aux insertions musculaires ; et de courtes périodes de déformation ostéogénique cyclique sont nécessaires pour induire une réponse adaptative osseuse suffisante.

[26] *Lane NE, Kaneps AJ, Stover SM, et al. Bone mineral density and turnover following forelimb immobilization and recovery in young adult dogs. Calcif Tissue Int 1996 ; 59:401–406.*

IV. Modifications des propriétés tendineuses

1. Généralités

Les tendons sont des tissus spécialisés qui relient les muscles aux os et sont composés de fibres de collagène extracellulaires disposées en réseaux réguliers. Ce tissu mécanosensible présente des propriétés mécaniques qui lui permettent de s'adapter et de répondre aux charges transmises par les muscles. Ce transfert de charge constitue le principal stimulus mécanique pour les cellules tendineuses. Il a été démontré que **l'application de charges mécaniques appropriées sur les tendons permet l'amélioration de leurs processus anaboliques**. En revanche, des charges mécaniques trop importantes sont nuisibles aux tendons en provoquant des processus cataboliques tels que la dégradation de la matrice. De la même façon, **l'immobilisation ou la non utilisation des tendons peut mener à des effets cataboliques** (Frizziero *et al.* 2016).

L'arrêt de l'activité provoque des modifications dans le métabolisme des ténocytes et la morphologie des tendons. **L'immobilisation entraine ainsi l'atrophie du tendon, mais en raison d'un taux métabolique et d'une vascularisation faibles, les effets sont lents et moins dramatiques que dans le tissu musculaire.** La résistance à la traction, la capacité de déformation élastique et le poids total du tendon diminuent. Microscopiquement, des modifications sont observées notamment dans la synthèse du collagène de type I et III, l'organisation du collagène, la cellularité, la vascularisation, et la teneur en protéoglycanes (Kannus *et al.* 1997 ; Frizziero *et al.* 2016).

2. Chez le rat

Les ténocytes du tendon rotulien de rats, soumis à un entrainement de dix semaines sur tapis de course et à un déconditionnement soudain en cage sans exercice pendant **quatre semaines**, ont été examinés. Il a été constaté que le **déconditionnement à court terme altère l'activité synthétique et métabolique des ténocytes**[27]. Au niveau histologique, des altérations de la morphologie du tendon et de son enthèse sont observées suite à l'arrêt de l'entrainement[28,29]. Ces altérations sont associées à une **faible teneur en protéoglycanes** et une modification de l'organisation des fibres de collagène avec une **augmentation du collagène de type III et une diminution du collagène de type I, ce qui signifie une diminution de la résistance au stress** et donc un risque accru de rupture (Frizziero *et al.* 2016).

3. Chez l'Homme

Une étude réalisée chez des hommes[30] s'intéresse à la **réponse du tendon patellaire** suite à des exercices d'extension isométrique unilatérale du genou en position assise quatre fois par semaine pendant trois mois, suivis d'un **arrêt de l'entrainement pendant les trois mois suivants**. Les résultats de cette étude ont montré que la rigidité du tendon est considérablement augmentée après trois mois d'entrainement, tandis que l'allongement maximal reste inchangé. En revanche, **suite à la période de déconditionnement (retour aux niveaux habituels d'activité physique), le tendon a montré des valeurs d'élongation maximale plus élevées par rapport à l'après-entrainement, et une diminution de la rigidité du tendon au niveau pré-entrainement dès deux mois sans exercices.**

---

[27] Salamanna, F., Frizziero, A., Pagani, S., Giavaresi, G., Curzi, D., Falcieri, E., et al. (2015). Metabolic and cytoprotective effects of in vivo peri-patellar hyaluronic acid injections in cultured tenocytes. Connect. Tissue Res. 56, 35–43. doi: 10. 3109/03008207.2014.979166.

[28] Frizziero, A., Fini, M., Salamanna, F., Veicsteinas, A., Maffulli, N., and Marini, M. (2011). Effect of training and sudden detraining on the patellar tendon and its enthesis in rats. BMC Musculoskelet. Disord. 12:20. doi: 10.1186/1471- 2474-12-20.

[29] Frizziero, A., Salamanna, F., Giavaresi, G., Ferrari, A., Martini, L., Marini, M., et al. (2015). Hyaluronic acid injections protect patellar tendon from detrainingassociated damage. Histol. Histopathol. 30, 1079–1088. doi: 10.14670/ HH-11-605.

[30] Kubo, K., Ikebukuro, T., Yata, H., Tsunoda, N., and Kanehisa, H. (2010). Effects of training on muscle and tendon in knee extensors and plantar flexors in vivo. J. Appl. Biomech. 26, 316–323.

L'effet de **quatre semaines de déconditionnement** sur les propriétés mécaniques de **l'aponévrose du muscle gastrocnémien médial** suite à un entrainement pliométrique est également analysé chez l'Homme. La **résistance à l'effort de l'aponévrose apparait diminuée** avec l'arrêt de l'entrainement, avec une **réduction des performances de saut** du complexe muscle-tendon de la cheville[31].

Une autre étude menée chez l'Homme[32], a examiné l'effet de **deux semaines d'immobilisation** dans un plâtre de l'extrémité distale d'une jambe sur le **tendon d'Achille**. L'immobilisation et l'absence de mise en charge du membre n'a **pas eu d'effet significatif sur la synthèse de collagène** dans le tendon et **l'aire de la section transversale du tendon**. Cependant, l'absence de modifications significatives peut être liée à la courte durée de l'étude, les tendons réagissant lentement aux variations de stimulations mécaniques. **Les tendons semblent assez résistants aux périodes courtes de déchargement** (Frizziero *et al.* 2016).

4. Chez le cheval

Récemment chez le cheval, Stewart *et al.* (2020) ont examiné l'effet de **huit semaines d'immobilisation** dans un plâtre de l'articulation métacarpo-phalangienne, suivies de 12 semaines d'entrainement. Il apparait que sur les huit chevaux de l'étude, sept ont présenté des **modifications du tendon du muscle fléchisseur profond du doigt** (DDFT) pour le membre immobilisé au retrait du plâtre. **À l'imagerie par résonnance magnétique**, des anomalies du DDFT ont été objectivées sous forme **d'augmentation de l'intensité du signal**, avec le plus souvent une atteinte dans la moitié proximale des os sésamoïdiens proximaux, se prolongeant proximalement jusqu'à la métaphyse distale du troisième métacarpe. L'aspect palmaire du DDFT était le plus fréquemment touché, et chez certains chevaux, l'augmentation d'intensité du signal s'étendait à l'aspect dorsal du tendon. **Bien que ces changements n'aient pas été statistiquement significatifs, ils ont peut-être contribué à la boiterie clinique observée**. Il semble pertinent de postuler que, pour de vrais cas cliniques, ces modifications du DDFT peuvent **affecter la capacité d'un cheval à reprendre sa carrière sportive** ou rendre les tissus mous plus susceptibles de lésions.

[31] Kannas, T. M., Amiridis, I. G., Arabatzi, F., Katis, A., and Kellis, E. (2015). Changes in specific jumping performance after detraining period. J. Sports Med. Phys. Fitness 55, 1150–1156.

[32] Moerch, L., Pingel, J., Boesen, M., Kjaer, M., and Langberg, H. (2013). The effect of acute exercise on collagen turnover in human tendons: influence of prior immobilization period. Eur. J. Appl. Physiol. 113, 449–455. doi: 10.1007/s00421- 012-2450-5.

À retenir :

Il a été montré chez le rat, l'Homme, le cheval, qu'un déconditionnement de quatre à huit semaines d'un tendon peut induire une diminution de la résistance au stress, à l'effort, ou générer de l'inflammation tendineuse.

En pratique, il est admis que l'intensité de la charge mécanique influence le métabolisme des tendons. Une charge mécanique adaptée peut stimuler la synthèse du collagène et constitue un facteur essentiel dans la prévention de la dégénérescence des tendons. Néanmoins, du fait d'un taux métabolique et d'une vascularisation faibles, les tendons réagissent lentement aux variations de stimulations mécaniques. Le niveau et le taux de mise en charge sont des facteurs importants à considérer, car le stress mécanique répétitif peut également favoriser l'activité des métalloprotéinases et induire des lésions au niveau des fibres de collagène.

Lors d'un processus de cicatrisation puis de réhabilitation tendineuse chez l'Homme, une mobilisation précoce et une augmentation progressive de la mise charge ont montré des effets bénéfiques sur la cicatrisation en favorisant la synthèse de collagène dans la phase de prolifération et l'orientation correcte des fibres de collagène dans la phase de remaniement. Cependant, lors de la phase aiguë d'une lésion tendineuse, la zone affectée doit être protégée pour éviter les lésions secondaires et l'aggravation des lésions. Outre l'application de froid, le repos et différentes interventions médicales, l'immobilisation est indiquée. En médecine vétérinaire, le même principe s'applique. Il existe peu de preuves scientifiques sur la période optimale d'immobilisation ; il est recommandé chez les patients humains d'utiliser l'immobilisation uniquement pendant la phase aiguë, soit environ cinq à sept jours (Bosch *et al.* 2010).

Il est intéressant de noter que de nombreuses données existent sur la rupture du tendon d'Achille chez l'Homme et les sections tendineuses avec des modèles animaux, mais ces lésions correspondent mal aux lésions centrales du tendon majoritairement observées chez les chevaux. Par conséquent, les extrapolations doivent être faites avec prudence (David *et al*. 2012).

V. Modifications au niveau de l'articulation

1. Physiologie du cartilage articulaire

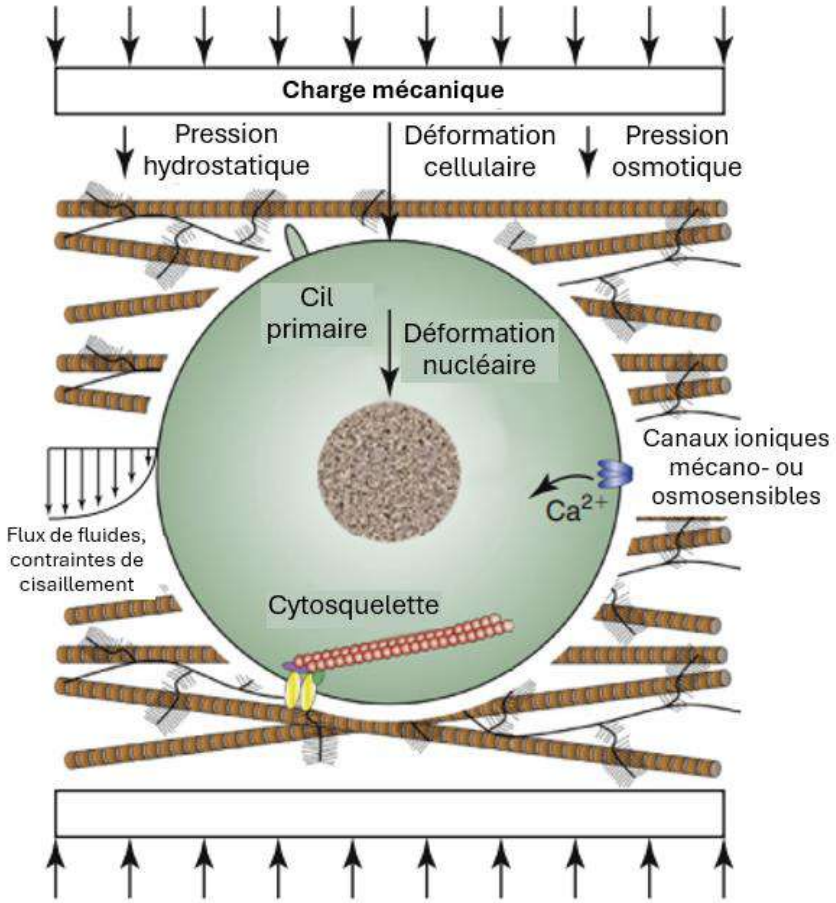
Le cartilage articulaire est avasculaire. Sa nutrition et l'élimination des déchets du métabolisme résultent d'échanges rapides entre le plasma sanguin et le liquide synovial. Ces échanges sont permis par la différence de pression hydrostatique et de pression osmotique entre les deux milieux. La locomotion joue un rôle majeur dans la création des différences de pression hydrostatique, puisqu'elles dépendent notamment des angles articulaires. Ainsi la pression articulaire est surtout sub-atmosphérique (entre -2 et -6 cmH2O) et favorise l'ultrafiltration dans l'articulation, mais elle peut varier avec la position articulaire.

Durant la locomotion, les forces de pression intermittentes qui s'exercent sur la matrice extracellulaire du cartilage, liées à la charge puis à la décharge, sont comparables à une pompe, causant un influx et un efflux de liquide synovial à travers le cartilage articulaire. La nutrition du cartilage se fait ainsi par diffusion assistée du liquide synovial (imbibition). La distance sur laquelle cette diffusion reste possible est limitée, ce qui explique que l'épaisseur du cartilage est limitée à six millimètres.

Par ailleurs, l'homéostasie cartilagineuse repose sur un équilibre entre cytokines et facteurs de croissance anaboliques et cataboliques, ainsi que sur les charges de compression mécaniques dynamiques. En effet, **les chondrocytes sont très sensibles aux stimuli mécaniques, qui sont le principal signal de l'homéostasie cartilagineuse et de sa maintenance dans les conditions physiologiques**. Une charge régulière du cartilage articulaire provoque des changements importants, directes et indirectes, dans l'environnement biomécaniques des chondrocytes. Directement, la charge du cartilage va entrainer une déformation du noyau et de la cellule, générant une réponse cellulaire. Indirectement, la charge provoque des changements de pression hydrostatique, d'osmolalité, et par conséquent de flux du liquide interstitiel. Ce flux a des effets sur l'apport de nutriments et l'élimination des déchets, comme déjà mentionné, mais également peut être un stimulus pour l'activation de substances métaboliquement actives, comme le *transforming growth factor-β* (TGF-β). Les chondrocytes possèdent aussi un cil primaire : un organite avec un rôle important de mécanotransduction.

Ces mécanismes sont particulièrement évidents au cours de la phase juvénile, lorsque la croissance et le développement prévalent. Cependant, **cela semble moins clair chez les individus matures, où la matrice extracellulaire du cartilage est caractérisée par des temps de renouvellement très longs et où un remaniement important ne semble plus être possible.**

Il en ressort **l'importance du mouvement, avec des alternances de charge et décharge pour préserver la viabilité du cartilage et son homéostasie** (van Weeren 2016).



<u>Figure 12</u> : Dessin schématique représentant les mécanismes de la chondrogenèse induite mécaniquement, d'*après O'Conor, Case, et Guilak (2013) et van Weeren (2016).*

La mise en charge articulaire entraine à la fois une déformation cellulaire et nucléaire directe, ainsi qu'un changement des facteurs biophysiques, tels que la pression osmotique et hydrostatique et le flux des fluides.

2. <u>Étude de l'immobilisation articulaire</u>

2.1. <u>Chez l'Homme</u>

L'**immobilisation articulaire** prolongée a été étudiée chez les humains et diverses espèces de laboratoire, et peut entrainer de multiples altérations du cartilage articulaire. Ces altérations comprennent une **diminution de la teneur en glycosaminoglycanes (GAG)**, une **augmentation de la synthèse des GAG** et une **maturation réduite des protéoglycanes**. Cela peut conduire au développement d'**érosions de la surface articulaire**, qui semblent être plus marquées lors d'immobilisation d'un membre avec maintien du support du poids du corps, que lors d'immobilisation avec décharge du membre. Les altérations de la **capsule articulaire** incluent une **augmentation du nombre de globules blancs**, une **hyperplasie des cellules synoviales** et une **production accrue de collagène**. La teneur en glycosaminoglycanes et en eau des tissus conjonctifs périarticulaires peut diminuer avec l'immobilisation, ce qui peut entrainer une **perte de la mobilité articulaire** suivie d'une **contracture de la capsule articulaire (voir partie VI suivante)**. La formation de tissu conjonctif **fibro-graisseux** à l'intérieur d'une articulation peut créer des **adhérences au cartilage articulaire sous-jacent**, qui se développent après 30 à 60 jours d'immobilisation. Une immobilisation de **12 mois ou plus chez les humains** peut entrainer **l'oblitération de l'espace articulaire par prolifération fibro-graisseuse et ankylose fibreuse** (van Harreveld *et al.* 2002a).

2.2. Chez le cheval

Les chevaux peuvent être particulièrement sensibles aux effets de l'immobilisation, car les parties distales des membres manquent de facteurs de protection tels que des muscles environnants et de multiples surfaces articulaires.

Richardson, et Clark (1993) n'ont pas rapporté **d'atrophie significative du cartilage articulaire de l'articulation métacarpo-phalangienne** chez les chevaux après **30 jours d'immobilisation dans un plâtre avec support du poids par le membre.**

Après sept semaines d'immobilisation de l'articulation métacarpo-phalangienne dans un plâtre avec support du poids par le membre, van Harreveld *et al.* (2002a) rapportent des modifications au niveau du liquide synovial. **Les concentrations en protéines totales (CPT) du liquide synovial des membres immobilisés et controlatéraux sont significativement augmentées depuis le retrait du plâtre jusqu'à la fin de l'étude**, par comparaison aux valeurs de référence au commencement de l'étude, avec une augmentation nettement supérieure au sein des articulations immobilisées après le retrait du plâtre. L'augmentation de la CPT pourrait être attribuable à l'inflammation ou à des altérations induites de la perméabilité de la membrane synoviale. Même sans augmentation significative des globules blancs dans les articulations immobilisées, l'inflammation seule peut être la principale cause de l'augmentation observée de la CPT. **L'immobilisation articulaire peut donc entrainer une synovite légère à modérée.** Les résultats de l'étude pourraient également indiquer que l'immobilisation altère la capacité de la membrane synoviale à produire un liquide articulaire normal.

Après huit semaines d'immobilisation de l'articulation métacarpo-phalangienne dans un plâtre avec support du poids par le membre, suivies de 12 semaines d'entrainement, Stewart *et al.* (2020) rapportent des anomalies supplémentaires **au sein de l'articulation des membres plâtrés et non plâtrés**, observées lors de la nécropsie. Des **lignes d'usure *(wear line)*, des érosions du cartilage articulaire** sur les condyles et des **lésions d'arthrose** palmaire au niveau du troisième métacarpe, ainsi que la fragmentation des os sésamoïdiens proximaux, étaient présents lors de l'évaluation macroscopique de l'articulation métacarpo-phalangienne, tant pour les membres plâtrés que pour les membres non plâtrés, sans différence entre eux. Il est difficile de statuer du caractère significatif ou non de ces observations sur la base de ce qui a été précédemment observé lors d'autopsies d'autres athlètes équins[33].
Concernant les effets de l'application d'un plâtre sur le membre controlatéral, une augmentation du fluide osseux trabéculaire a été observée après la période d'immobilisation sur les images par résonance magnétique dans le membre non plâtré. Ces modifications s'ajoutent aux lignes d'usure, érosions du cartilage articulaire et lésions d'arthrose palmaire du troisième métacarpe observées macroscopiquement. Natasha M. Werpy rapporte l'observation de changements similaires sur les images par résonance magnétique chez des chevaux placés en repos au box suite à des lésions cliniques. Il est également courant en pratique de placer le membre controlatéral au plâtre dans une chaussure surélevée ou un support de sabot afin d'équilibrer la répartition du poids. Cela n'a pas été réalisé dans cette étude et pourrait avoir contribué à une augmentation de la charge sur le membre non plâtré et à une diminution de la charge sur le membre plâtré. Il est possible de soutenir que les **modifications observées dans le membre non plâtré de cette étude pourraient représenter, au moins en partie, les changements qui peuvent survenir chez les athlètes équins placés en repos au box pour la gestion de blessures**. Bien que le repos en box strict prolongé ne soit généralement pas recommandé pour une blessure, les modifications observées au cours de cette étude soulignent que tout

[33] Barr ED, Pinchbeck GL, Clegg PD, Boyde A, Riggs CM. Post mortem evaluation of palmar osteochondral disease (traumatic osteochondrosis) of the metacarpo/metatarsophalangeal joint in Thoroughbred racehorses. Equine Vet J. 2009;41:366-371.

changement brutal d'activité et/ou un retour violent à des performances athlétiques peuvent entrainer des modifications irréversibles au sein de l'articulation métacarpo-phalangienne (Stewart *et al.* 2020).

À retenir :

Le mouvement est fondamental, avec des alternances de charge et décharge, pour préserver la viabilité du cartilage et son homéostasie.

L'**immobilisation articulaire** prolongée chez l'Homme peut être associée à de multiples altérations du cartilage articulaire. Chez le cheval, plusieurs études ont montré que l'immobilisation d'une articulation métacarpo-phalangienne dans un plâtre induit des effets sur l'articulation immobilisée et controlatérale dès sept semaines. La présence de synovite, d'érosions du cartilage, et lésions d'arthrose sont rapportées. Les résultats sont d'autant plus intéressants que les changements observés sur le membre controlatéral pourraient correspondre, au moins en partie, à ceux qui surviennent chez les athlètes équins placés en repos au box pour la gestion de blessures.

VI. Contracture articulaire

1. Généralités

Il est connu que l'immobilisation de genoux d'animaux sains entraine des contractures articulaires. Une **immobilisation à court terme** provoque principalement des contractures articulaires via des **facteurs myogéniques** (amplitude du mouvement déterminée par les muscles, les tendons et fascias), tandis qu'une **immobilisation prolongée** provoque principalement des contractures articulaires via des **facteurs arthrogéniques** (amplitude du mouvement déterminée par les os, le cartilage, les capsules articulaires et les ligaments) (Kaneguchi, Ozawa, Yamaoka 2023).

La contracture du genou est une affection courante et se caractérise par une **diminution de l'amplitude du mouvement articulaire** secondairement à une fibrose de la capsule articulaire, un raccourcissement de la membrane synoviale et une hyperplasie des tissus conjonctifs intermusculaires périarticulaires. Le mécanisme pathologique caractéristique de la contracture articulaire est la prolifération de myofibroblastes (fibroblastes actifs) et le dépôt de protéines dans la matrice extracellulaire de la capsule articulaire et des tissus conjonctifs intermusculaires. À terme, la réduction de l'amplitude du mouvement articulaire peut avoir des conséquences sur la nutrition du cartilage articulaire et donc sa viabilité, comme abordé dans la partie précédente. **La cause la plus fréquente de contracture du genou est l'immobilisation prolongée, qui est utilisée cliniquement comme traitement aigu des affections musculosquelettiques pour soulager la douleur et réduire l'inflammation** (Kaneguchi *et al.* 2020 ; Zhou *et al.* 2023).

De nombreux modèles animaux ont été développés pour simuler la contracture de flexion du genou ; cependant, peu de modèles animaux de contracture d'extension du genou ont été rapportés. Pourtant, le modèle de contracture d'extension est cliniquement pertinent car il imite mieux l'immobilisation associée aux fractures ou à l'alitement chez l'Homme, que le modèle de contracture de flexion (Zhou *et al*. 2023).

2. Chez le rat

Le genou de rats est **immobilisé en flexion** à 140° pendant **quatre semaines**. Il est observé que l'immobilisation induit une **diminution de l'amplitude du mouvement** du genou par rapport au groupe contrôle, avec une accentuation à quatre semaines par rapport à deux semaines. En revanche, une myotomie, par section des muscles fléchisseurs du genou, montre une augmentation de l'amplitude du mouvement des genoux immobilisés à deux et quatre semaines, mais qui reste malgré tout inférieure au groupe contrôle. Ces résultats suggèrent que les **muscles fléchisseurs du genou limitent initialement l'extension du genou**, et que l'amplitude du mouvement articulaire avant myotomie est principalement limitée par la contracture myogénique liée à l'immobilisation. La restriction d'amplitude du mouvement qui persiste après myotomie représente la contracture arthrogénique. Le **raccourcissement de la membrane synoviale** est considéré dans cette étude comme le facteur principal, mais il est également mentionné dans d'autres études **l'épaississement de la capsule articulaire postérieure**. L'immobilisation articulaire induit une diminution de la longueur de la membrane synoviale postéro-supérieure et postéro-inférieure (Kaneguchi, Ozawa, Yamaoka 2023).

L'immobilisation en extension du genou est étudiée chez 60 rats (Zhou *et al.* 2023). L'étude présente un groupe contrôle, puis des groupes immobilisés pendant 1, 2, 3 jours ou 1, 2, 3, 4, 6, 8 semaines. Durant l'expérience, les rats sont libres de se déplacer dans leur cage avec le dispositif d'immobilisation du genou en place (voir Figure 13).
Dans l'étude, la contracture myogénique est le type de contracture prédominant au cours des deux premières semaines d'immobilisation. Une transition vers une contracture articulaire à dominante

arthrogénique s'opère de la deuxième à la troisième semaine d'immobilisation. La contracture arthrogénique se présente principalement sous forme d'une réponse fibrotique de l'intérieur de la capsule articulaire. La capsule articulaire postérieure contribue à la formation de la contracture de flexion du genou induite par l'immobilisation (Sasabe *et al.,* 2017), tandis que **la capsule articulaire antérieure a le plus grand impact sur la contracture d'extension du genou. Le degré d'hyperplasie de la membrane synoviale antérieure augmente de façon continue avec la durée d'immobilisation jusqu'à se stabiliser** à quatre semaines. Cette prolifération du tissu synovial intra-articulaire est le principal responsable de la limitation de l'amplitude du mouvement articulaire observée dans l'étude. Il est également rapporté une augmentation de la quantité de dépôt de collagène intermusculaire dès la première semaine d'immobilisation, puis une diminution après quatre semaines d'immobilisation. Des études antérieures ont montré que cela pourrait être associé à la résolution progressive de la réponse inflammatoire et fibrotique après l'immobilisation[34] (Zhou *et al.* 2023).

Figure 13 : Photographie d'un rat avec le dispositif d'immobilisation du genou en extension en place, *source : Zhou et al. (2023)*.

3. Chez le cheval

Chez des chevaux dont une articulation métacarpo-phalangienne est immobilisée dans un plâtre pendant sept semaines, suivies d'une période de huit semaines d'exercice, une boiterie constante après les sept semaines d'immobilisation et les huit semaines de remobilisation est observée (van Harreveld *et al.* 2002a). L'origine de la boiterie a été localisée à l'articulation métacarpo-phalangienne grâce à des examens physiques et de boiterie, et par scintigraphie, étayée par l'analyse des résultats d'une plateforme de forces. La boiterie peut avoir de nombreuses origines possibles, mais la douleur est la cause la plus fréquente. Cependant, **à la fin de l'étude, une boiterie mécanique (liée à une raideur articulaire) pourrait avoir contribué à une partie du score de boiterie, car l'analyse des forces de réaction au sol n'a pas permis de détecter de différence significative entre le membre antérieur** immobilisé et le controlatéral. **À la fin de l'étude, la raideur de l'articulation métacarpo-phalangienne, détectée par la réduction de l'amplitude du mouvement articulaire et l'augmentation de la circonférence**, peut avoir modifié la charge biomécanique de l'articulation, créant ainsi l'impression clinique de boiterie.
En effet, une diminution significative de l'amplitude du mouvement et une augmentation significative de la circonférence de l'articulation métacarpo-phalangienne immobilisée, par comparaison aux valeurs de référence ipsilatérale et controlatérale, étaient apparentes pour chaque cheval après le retrait du plâtre. Ces modifications se sont maintenues pendant toute la durée de l'étude, avec une diminution de 20,5 % de l'amplitude du mouvement articulaire et une augmentation de 10,8 % de la circonférence de l'articulation observées à la fin de l'étude. La diminution persistante de l'amplitude du

[34] *Kaneguchi A, Ozawa J, Minamimoto K, Yamaoka K. Formation process of joint contracture after anterior cruciate ligament reconstruction in rats. J Orthop Res 2021; 39: 1082-1092 [PMID: 32667709 DOI: 10.1002/jor.24800].*

mouvement articulaire et l'augmentation de la circonférence articulaire, sans amélioration pendant les huit semaines de remobilisation, étaient des résultats inattendus de cette étude.
Certaines améliorations ont été documentées chez d'autres espèces. L'immobilisation de l'articulation de l'épaule d'un chien pendant 12 semaines entraine une diminution significative de l'amplitude du mouvement[35]. Cette amplitude du mouvement reste inchangée après quatre semaines de remobilisation. Le même auteur rapporte dans une étude ultérieure[36], utilisant un protocole similaire, que 12 semaines de remobilisation de l'articulation permettent un retour à la fonction normale. van Harreveld *et al*. (2002a) suggèrent que des résultats similaires auraient pu être obtenus dans leur étude si un protocole d'exercice plus long ou différent avait été utilisé.

Il faut noter que certaines études rapportent que les contractures articulaires induites par quatre semaines ou plus d'immobilisation ne récupèrent pas complètement de manière spontanée (Kaneguchi, Ozawa, Yamaoka 2023).

À retenir :
L'immobilisation d'une articulation peut mener à une contracture articulaire, qui se caractérise par :
- la dominance de facteurs myogéniques, lors d'une immobilisation sur le court terme ;
- la dominance de facteurs arthrogéniques, lors d'une immobilisation à plus long terme ;
- des variations selon la position en flexion ou extension de l'articulation.

La contracture articulaire mène dans tous les cas à une diminution de l'amplitude du mouvement articulaire, qui peut avoir des conséquences sur les capacités locomotrices et la viabilité du cartilage articulaire.
Chez le cheval, une diminution de l'amplitude du mouvement de l'articulation métacarpo-phalangienne est observée dès sept semaines d'immobilisation sous plâtre ; et huit semaines de remobilisation ne suffisent pas à un rétablissement.

Cette conséquence de l'immobilisation articulaire permet de souligner l'importance du travail précoce de l'amplitude du mouvement articulaire au cours d'un programme de réhabilitation.

[35] *Schollmeier G, Uhthoff HK, Sarkar K, et al. Effects of immobilization on the capsule of the canine glenohumeral joint. Clin Orthop 1994 ; 226:37–42.*
[36] *Schollmeier G, Sarkar K, Fukuhara K, et al. Structural and functional changes in the canine shoulder after cessation of immobilization. Clin Orthop 1996 ; 228:310–315.*

VII. Inhibition musculaire arthrogénique

1. Généralités

L'inhibition musculaire arthrogénique (AMI) est une réponse réflexe persistante après une lésion articulaire. Le terme décrit **l'incapacité à contracter complètement un muscle malgré l'absence de lésion structurelle du muscle ou du nerf innervant**. L'AMI est considérée comme une réponse réflexe à la lésion articulaire car elle échappe au contrôle conscient et volontaire. Bien que l'AMI soit plus probablement un mécanisme protecteur après une lésion articulaire, elle peut devenir une limitation durant la réhabilitation (Hart *et al.* 2010).
L'AMI est **observée dans le cadre de nombreuses affections articulaires du genou chez l'Homme**, avec des **déficits significatifs d'activation du muscle quadriceps** observés chez les patients atteints d'ostéoarthrose, de polyarthrite rhumatoïde, de douleur antérieure du genou, de contusion de la patella, suite à une rupture du ligament croisé antérieur et à sa reconstruction, après des lésions méniscales et une méniscectomie, ainsi que chez les patients ayant subi une arthroplastie du genou ; elle **concerne principalement le muscle ipsilatéral, mais peut être présente bilatéralement**. Il semble que l'AMI soit plus sévère dans les premiers jours suivant la lésion articulaire, avant de diminuer quelque peu, de se stabiliser à moyen terme (jusqu'à 6 mois) et de décliner lentement à plus long terme (18-33 mois) (Rice, McNair 2010).

Les mécanorécepteurs articulaires fournissent un influx sensoriel continue au système nerveux central concernant les conditions mécaniques dans et autour des articulations. Ils sont responsables de la signalisation de la position et du mouvement des articulations, contribuent à contrôler le moment (timing) et la direction des mouvements articulaires, participent à l'initiation de réponses musculaires réflexes qui maintiennent la stabilité articulaire et jouent un rôle primordial dans la nociception articulaire. Les mécanorécepteurs fonctionnent à la fois comme des propriocepteurs et des modulateurs de l'activité musculaire, monitorant ainsi la stabilité articulaire et protégeant les structures articulaires contre des charges anormales ou excessives.
Dans des circonstances normales, l'étirement de la capsule articulaire et des ligaments environnants entraine une augmentation de l'activité des mécanorécepteurs articulaires ; ces derniers se projettent au niveau des motoneurones-γ dans la corne ventrale de la moelle épinière et induisent des ajustements fins de la tension musculaire qui influencent la stabilité et l'équilibre articulaires. Une douleur musculosquelettique déclenche des mécanismes réflexes médiés par les mécanorécepteurs articulaires, et une articulation lésée est protégée contre d'autres dommages soit par l'inhibition des muscles, soit par la stimulation d'un réflexe de protection musculaire (Hart *et al*. 2010 ; King *et al.* 2013b).

L'AMI est causée par une modification de la décharge des récepteurs sensoriels dans ou autour de l'articulation du genou endommagé. Les facteurs susceptibles de modifier la décharge afférente comprennent l'enflure, l'inflammation, la laxité articulaire et les lésions des récepteurs sensoriels articulaires. Par exemple, en injectant du liquide dans l'articulation du genou d'humains, les chercheurs ont montré que l'enflure réduit l'activité électromyographique du muscle quadriceps[37]. L'importance de l'effet de l'enflure est mise en évidence par la découverte qu'aussi peu que 10 mL de liquide peuvent provoquer une inhibition notable, tandis que des injections entre 20 et 60 mL sont capables de réduire la force musculaire maximale isocinétique du quadriceps de 30 à 40 %. Une relation linéaire existe entre

[37] *Palmieri R, Tom J, Edwards J, et al. Arthrogenic muscle response induced by an experimental knee joint effusion is mediated by pre- and post-synaptic spinal mechanisms. J Electromyogr Kinesiol 2004;14:631–640.*

l'augmentation de la pression intra-articulaire et le degré d'inhibition du muscle quadriceps [38] (Rice, McNair 2010).

Des influx nerveux anormaux issus des afférences articulaires du genou peuvent ainsi altérer l'excitabilité des voies réflexes de la moelle épinière, ce qui finit par réduire l'excitabilité des motoneurones du quadriceps et empêche l'activation complète du muscle. À ce jour, trois principales voies réflexes ont été identifiées comme impliquées dans l'AMI. Il s'agit du réflexe d'inhibition non réciproque (interneurones inhibiteurs Ib), du réflexe de flexion et de la boucle-γ. Bien qu'il semble probable que chacune de ces voies joue un rôle dans l'AMI, l'importance relative de celles-ci (et éventuellement d'autres voies réflexes) reste à découvrir et peut varier selon les différentes affections articulaires du genou. L'influence potentielle des centres supraspinaux sur l'AMI est vaste, mais commence tout juste à être explorée (Rice, McNair 2010 ; Dauty *et al*. 2022).
Ainsi, une altération des influx sensoriels normaux issus des mécanorécepteurs articulaires peut entrainer une diminution de l'excitabilité des motoneurones et une réduction de l'activation musculaire.

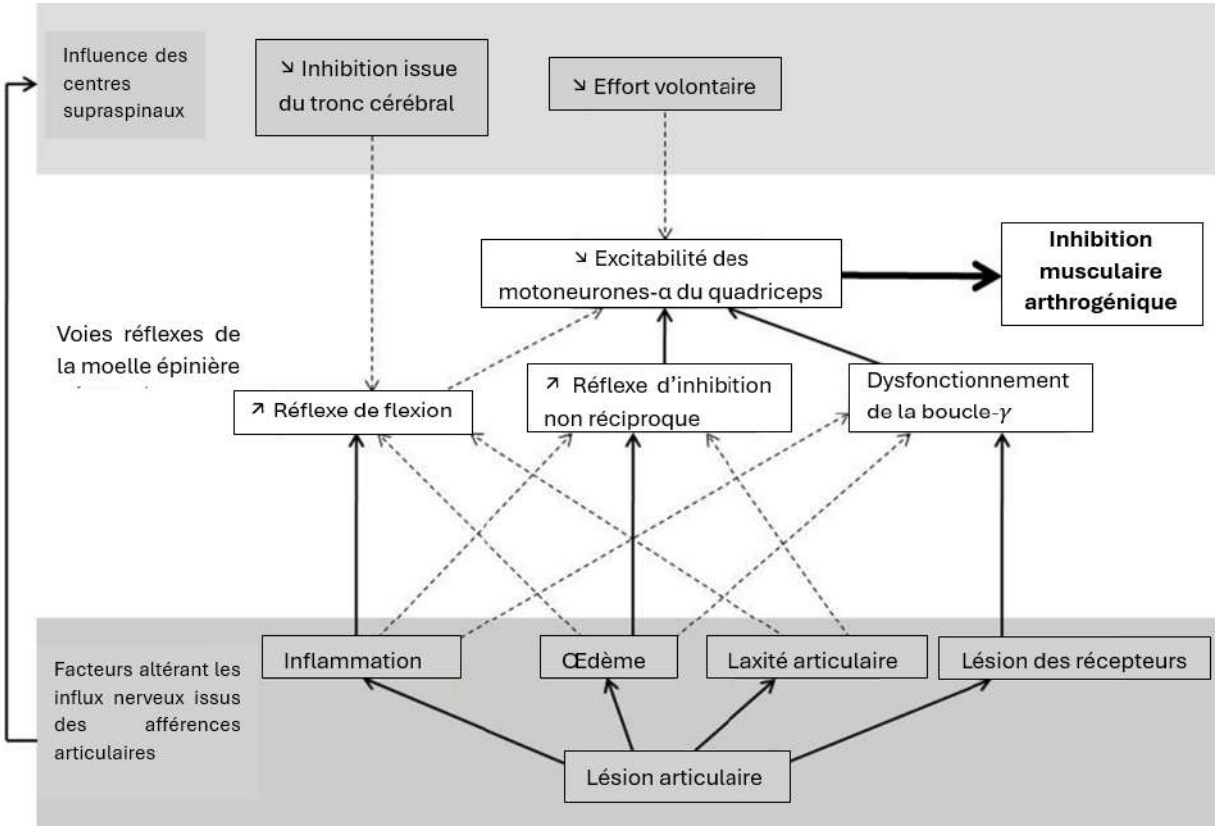


Figure 14 : Diagramme résumant les mécanismes proposés contribuant à l'inhibition musculaire arthrogénique*, d'après Rice et McNair (2010).*
Les flèches pleines indiquent les mécanismes avec une évidence plus forte.

2. Exemple suite à une rupture du ligament croisé antérieur chez l'Homme

Après une blessure suivie d'une reconstruction du ligament croisé antérieur, la perturbation de l'homéostasie articulaire (par exemple, douleur, gonflement, laxité) entraine des altérations du contrôle neural. Par ailleurs, la perte de mécanorécepteurs du ligament croisé antérieur est supposée perturber le réflexe ligament-muscle entre le ligament croisé antérieur et le quadriceps, ce qui entraine une incapacité à recruter activement les unités motrices à haut seuil d'activation lors des contractions

[38] *Hopkins J, Ingersoll C, Edwards J, et al. Changes in soleus motoneuron pool excitability after artifical knee joint effusion. Arch Phys Med Rehabil 2000;81:1199–1203.*

volontaires du quadriceps. Il est donc supposé que l'AMI est présente après une chirurgie de reconstruction du ligament croisé antérieur et contribue au déficit persistant de force des muscles extenseurs du genou. Heijne et Werner (2010) comparent la force isocinétique du muscle quadriceps après ACLR avec autogreffe du tendon patellaire, suivie de programmes de réhabilitation avec des exercices de renforcement musculaire, et montrent pour des tests à 90°/s une diminution de la force du muscle quadriceps du côté opéré persistante jusqu'à deux ans après chirurgie par rapport au muscle quadriceps côté sain (voir Tableau X).

<u>Tableau X</u> : Rapport des forces isocinétiques des muscles quadriceps du genou avec ACLR et du genou sain, à 90°/s en fonction du temps, *d'après Heijne et Werner (2010) et Gokeler et al. (2014).*

Temps	Rapport des forces isocinétiques des muscles quadriceps : genou avec ACLR/genou sain
Pré-opération	88,7 %
Après 3 mois	55,8 %
Après 5 mois	67,3 %
Après 7 mois	76,9 %
Après 9 mois	82 %
Après 1 an	85 %
Après 2 ans	94 %

Souvent, il n'est pas assez pris en compte l'idée que si un patient ne parvient pas à surmonter l'AMI, il sera incapable de restaurer de manière optimale sa masse et force musculaire. **L'AMI peut limiter le niveau d'activation neuromusculaire nécessaire pour améliorer la fonction du muscle quadriceps grâce à un entrainement en résistance volontaire, limitant ainsi l'efficacité de tout programme classique de renforcement musculaire et de conditionnement.** Les déficits résiduels de la taille et de la force des muscles extenseurs du genou après la reconstruction du ligament croisé antérieur sont associés à une **réduction de la fonction du genou et constituent un obstacle majeur à la progression fonctionnelle**. La faiblesse des extenseurs du genou est également associée à diverses complications importantes, telles que des modifications biomécaniques lors de la marche.
En théorie, la faiblesse du muscle quadriceps en lien avec l'AMI post-traumatique persistante réduit la capacité à générer de la force et, par conséquent, à assurer un contrôle musculaire excentrique efficace lors de la phase de mise en charge de l'articulation lors de la marche. **L'incapacité des stabilisateurs dynamiques à absorber efficacement les forces d'impact pendant la marche peut entrainer des lésions de la surface articulaire**. Il est ainsi observé une stabilité dynamique réduite, des douleurs persistantes au genou, un **risque accru d'arthrose du genou** et de moins bons résultats pour le retour au sport (Buckthorpe *et al.* 2024). **L'altération des schémas de marche après la reconstruction de l'articulation du genou peuvent persister pendant 8 à 12 mois et même des années après un traumatisme majeur** (Hart *et al*. 2010).

Cela **souligne l'importance clinique de prescrire des thérapies visant à éliminer l'AMI avant le commencement d'exercices de renforcement**. Il est fortement recommandé d'utiliser des **interventions ciblant spécifiquement l'AMI** dans le cadre de la rééducation. Restaurer la fonction des quadriceps en éliminant les mécanismes inhibiteurs neuronaux peut être essentiel pour faciliter une récupération neuromusculaire complète après une blessure ou une chirurgie du genou, permettant ainsi un retour au sport rapide et sécuritaire, tout en évitant le développement d'ostéoarthrose (Hart *et al.* 2010).

3. Exemple lors de développement d'ostéoarthrose

L'association d'AMI à l'ostéoarthrose a été montrée par **étude électromyographique**[39] du muscle quadriceps chez des patients atteints d'ostéoarthrose du genou, montrant une **diminution de la force musculaire et une altération des temps d'activation**. Un délai dans l'activation du muscle quadriceps entraine, comme décrit précédemment, une **altération de sa fonction de stabilisation du genou et d'atténuation des forces de charge durant la locomotion**. L'instabilité articulaire modifie la distribution du poids sur les surfaces articulaires et induit une augmentation de recrutement des muscles adjacents pour aider à la stabilisation. Il en résulte **des déséquilibres fonctionnels entre les groupes musculaires agonistes-antagonistes**, ce qui en fait renforce l'instabilité, altère la biomécanique du membre, et contribue à la **progression de l'ostéoarthrose et de mécanismes compensatoires chroniques inappropriés** (King *et al.* 2013a ; Koch *et al.* 2020).
La douleur, l'inflammation et l'effusion articulaire associées à l'ostéoarthrose altèrent les influx sensoriels normaux au niveau des mécanorécepteurs articulaires, ce qui peut diminuer l'excitabilité des motoneurones et donc réduire l'activation, et altérer les délais d'activation musculaire (King *et al.* 2013a).

À retenir :
L'inhibition musculaire arthrogénique se définit comme l'incapacité à contracter complètement un muscle malgré l'absence de lésion structurelle du muscle ou du nerf innervant. Cette inhibition est liée à la modification de la décharge des récepteurs sensoriels dans ou autour de l'articulation endommagée.
Elle est observée par exemple chez l'Homme lors d'ostéoarthrose du genou, ou suite à une rupture du ligament croisé antérieur et à sa reconstruction :

- l'AMI limite l'efficacité de tout programme classique de renforcement musculaire et de conditionnement ;
- la faiblesse des quadriceps se traduit par l'incapacité des stabilisateurs dynamiques à absorber efficacement les forces d'impact pendant la marche, ce qui peut entrainer des lésions de la surface articulaire ;
- un risque accru de développement d'arthrose du genou est présent ;
- le retour au sport puis à la compétition est plus long et les résultats de l'athlète sont moins bons ;
- l'altération des schémas de marche peut persister plusieurs mois à plusieurs années.

Les conséquences de l'inhibition musculaire arthrogénique permettent de souligner l'importance clinique de prescrire des thérapies ciblant spécifiquement l'AMI dans le cadre de la réhabilitation.

Des mécanismes similaires de faiblesse musculaire induite, délai d'activation musculaire, et instabilité articulaire se produisent a priori dans les articulations lésées et/ou inflammées chez le cheval (King *et al.* 2013a ; Koch *et al.* 2020).

[39] *Dixon, J. and Howe, T. (2005) Quadriceps force generation in patients with osteoarthritis of the knee and asymptomatic participants during patellar tendon reflex reactions: an exploratory cross-sectional study. BMC Musculoskelet. Disord. 6, 1-6.*

Conclusion partielle

De courtes périodes sans mise en charge des tissus sont nécessaires après une lésion aiguë des tissus mous, et une mise en mouvement trop agressive doit être évitée. Cependant, le repos devrait être de durée limitée et restreint à une courte période après le traumatisme. De plus longues périodes sans mise en charge sont néfastes et entrainent des modifications défavorables de la biomécanique et de la morphologie des tissus. Une charge mécanique progressive est plus susceptible de rétablir la force et les caractéristiques morphologiques des tissus.
La stimulation mécanique pendant le mouvement des tissus lésés est ainsi nécessaire pour l'homéostasie tissulaire et le maintien des forces biomécaniques des tissus mous et osseux. La mise en charge des tissus en cicatrisation contribue à réduire les effets néfastes de l'immobilisation par plâtre, tels que l'ostéopénie, la diminution de la mobilité articulaire et la dégradation de la matrice extracellulaire. De plus, les programmes d'exercices contrôlés favorisent une meilleure cicatrisation des muscles, tendons et ligaments. La réhabilitation fonctionnelle s'aligne avec les principes de la mécanothérapie, selon laquelle la charge mécanique incite les réponses cellulaires favorisant les changements structuraux des tissus.
Cependant, le défi clinique consiste à trouver l'équilibre entre la charge et le déchargement pendant la cicatrisation des tissus. Si les tissus sont trop sollicités après une lésion, la stimulation mécanique peut raviver les lésions ou causer des dommages supplémentaires. La protection des tissus vulnérables reste donc un principe important.
Il est nécessaire de trouver pour les différentes étapes de la réhabilitation la « **charge optimale** ». La charge optimale implique un programme de réhabilitation équilibré et progressif, où l'activité précoce encourage une récupération précoce (Bleakley, Glasgow, MacAuley 2012 ; Davidson 2019).

Chez les chevaux, les programmes d'exercices postopératoires consistent généralement en une période de repos au box avec des marches en main. Selon la nature de la lésion, le protocole d'exercice progresse avec des augmentations graduelles et progressives d'intensité. Cependant, les bases d'une stratégie de réhabilitation, telles que des protocoles d'exercices contrôlés détaillés basés sur des preuves, incluant le type d'exercice, le moment de début après la chirurgie, la durée de chaque séance et le taux d'augmentation de l'intensité de l'exercice, n'ont pas encore été établies pour les chevaux (Davidson 2019).

Chapitre 3 – Thérapie aquatique pour la réhabilitation des athlètes, application à l'espèce humaine

Les propriétés physiques de l'eau permettent son action thérapeutique sur différents systèmes de l'organisme : lors d'atteinte cardiopulmonaire, neurologique, musculosquelettique des membres, de gestation (Becker 2009 ; Mooventhan, Nivethitha 2014), et de lombalgie de manière à soulager la douleur associée et améliorer la fonction musculaire (Dundar *et al.* 2009 ; Baena-Beato *et al.* 2014 ; Peng *et al.* 2022 ; Psycharakis *et al.* 2022 ; Heidari, Mohammad Rahimi, Aminzadeh 2023).
Plus précisément chez l'athlète humain, la thérapie aquatique trouve son application dans la réhabilitation des affections musculosquelettiques. Elle regroupe différents types d'exercices, visant : la mobilisation articulaire, le renforcement musculaire, le conditionnement cardiovasculaire, et le travail de la proprioception.
En 1998, Thein et Brody proposent des exemples d'exercices aquatiques et leur application chez le sportif (voir Annexe 1). Un aspect intéressant de la thérapie aquatique est la gamme importante d'exercices nécessitant des mouvements alternés ou symétriques des membres et articulations associées, comme la natation par exemple. Ces mouvements vont encourager à l'implication du membre atteint en l'incitant à égaler l'effort et l'amplitude du mouvement du membre sain (Prins, Cutner 1999).
Lors de la construction d'un programme de réhabilitation, il apparait important d'essayer d'adapter autant que possible les exercices spécifiquement au sport de l'athlète. Par exemple, dans l'eau, les sprinters pourront réaliser des sprints par intervalle, travaillant au pic de leur consommation d'oxygène, avec de la course intermittente pour la récupération. Les marathoniens devront plutôt réaliser des exercices cardiovasculaires de faible intensité sur de longues durées, en maintenant la charge de travail entre 70 et 80 % de la consommation maximale d'oxygène (Thein, Brody 1998).

La réhabilitation des affections musculosquelettiques des membres inférieurs de l'athlète humain, notamment à travers la marche ou la course dans l'eau, est abordée ici plus spécifiquement, par souci de comparaison avec l'athlète équin.

L'intérêt de la marche ou de la course dans l'eau tient en partie de l'environnement physique à faible stress que constitue le milieu aquatique, avec l'application de forces axiales et compressives réduites sur les membres inférieurs par rapport aux activité terrestres, permettant une prescription plus précoce d'exercices de réhabilitation (Prins, Cutner 1999).
La forme la plus courante de course dans l'eau est **la course en eau profonde** *(« Deep Water Running », DWR)* (Figure 15), où les participants courent dans l'eau en portant une ceinture ou un gilet flottant au niveau de l'extrémité la plus profonde de la piscine ou en étant attachés avec un système de poulie. L'immersion est alors généralement au niveau des épaules ou du nez. Cependant, la DWR s'avère différente de la course sur terre en termes de recrutement musculaire des membres inférieurs et de cinématique, du fait de l'absence de phase de soutien au sol et de la résistance supplémentaire due au déplacement dans l'eau.
La course en eau peu profonde *(« Shallow Water Running », SWR)* (Figure 16) est devenue populaire en tant que forme alternative de course dans l'eau en raison de sa ressemblance plus étroite avec la locomotion terrestre. Les participants courent généralement dans le bassin peu profond d'une piscine intérieure, immergés généralement jusqu'à une hauteur de la taille. La SWR combine la résistance accrue dans le plan frontal aux mouvements des membres inférieurs dans l'eau, avec une force de réaction au sol réduite fonction de la profondeur d'immersion.
Enfin, les **tapis immergés** (Figure 17) offrent une solution de SWR qui atténue la résistance frontale en éliminant la composante de locomotion vers l'avant dans l'eau. En conséquence, un schéma de marche plus naturel est possible, ce qui peut améliorer la spécificité de l'entrainement en SWR. Les tapis

aquatiques offrent une grande flexibilité en termes de vitesses du tapis, de niveaux d'immersion dans l'eau et de résistance externe du fluide via l'ajout de jets d'eau (Silvers, Rutledge, Dolny 2007). Les tapis immergés sont aujourd'hui utilisés chez l'Homme pour la réhabilitation des athlètes mais également de patients atteints d'affections diverses : lésion de la moelle épinière, accident vasculaire cérébral, arthrose, maladie coronarienne, et pour promouvoir le flux sanguin cérébral (Parfitt, Hensman, Lucas 2017).

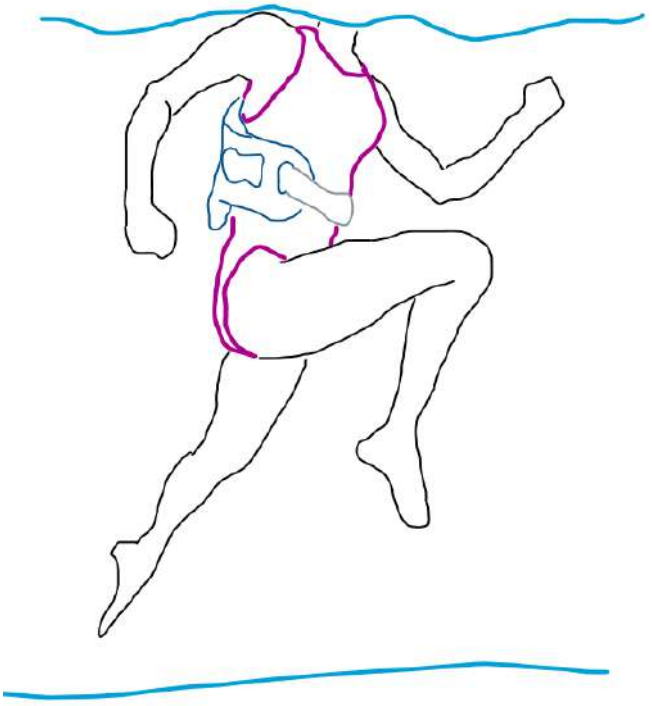


Figure 15 : Illustration de course en eau profonde à hauteur des épaules, *source : Delacharlerie Aurore.*

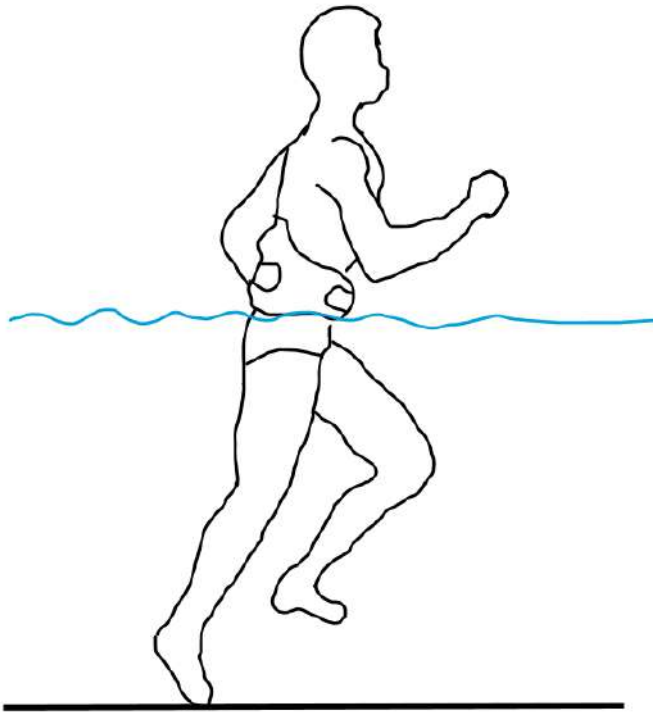
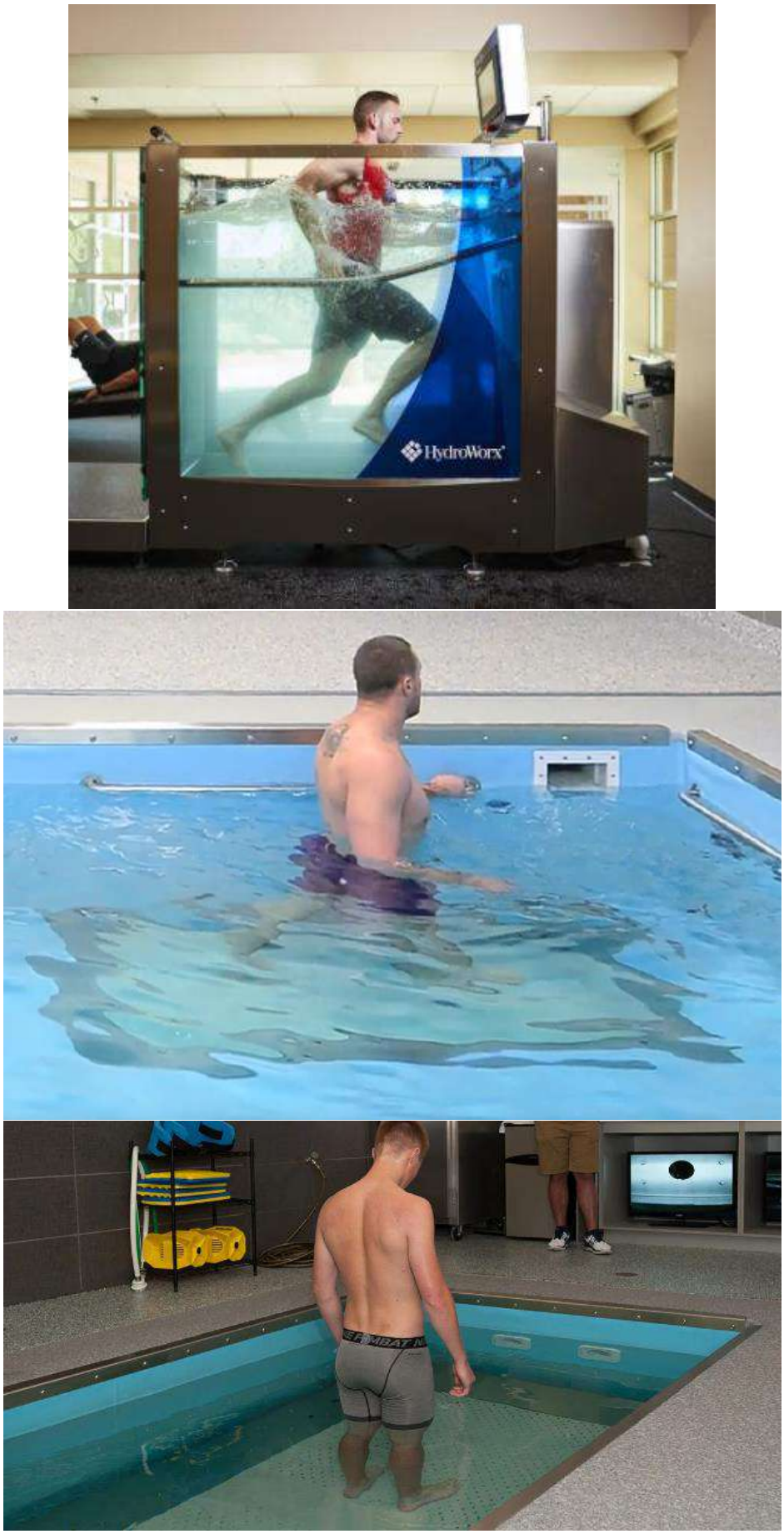


Figure 16 : Illustration de course en eau peu profonde à hauteur de la taille, *source : Delacharlerie Aurore.*



<u>Figure 17</u> : Illustrations de course sur tapis immergé, *source : HydroWorx.*

I. Présentation générale des différents principes de la réhabilitation de l'athlète

Le principal objectif, lors de la réhabilitation d'une lésion chez un sportif, est de permettre à l'athlète de retrouver le niveau d'exercice et de compétition qu'il avait avant sa blessure, voire un niveau supérieur, et cela en un temps minimum tout en respectant les contraintes de la cicatrisation (Li 2018 ; H. Dhillon, S. Dhillon, M S. Dhillon 2017).
Les athlètes immobilisés suite à une lésion sont sujets rapidement à une atrophie musculaire, faiblesse des tissus mous, diminution de la mobilité articulaire et perte de leur condition cardiovasculaire, comme cela a été abordé dans le chapitre précédent. Il est aujourd'hui accepté que les traitements fonctionnels sont supérieurs à l'immobilisation : une réhabilitation fonctionnelle précoce, qui se concentre sur la protection des tissus lésés durant la phase inflammatoire (un à cinq jours après la lésion), puis l'application de stresses contrôlés, est considérée comme l'approche la plus appropriée pour la réhabilitation d'un athlète (Kim *et al.* 2010).

Le processus de réhabilitation du sportif repose sur plusieurs grands principes :

- **Soulager la douleur**
  Le principe POLICE (« *Protection, Optimal Loading, Ice, Compression, Elevation* », que l'on peut traduire par « protection, charge optimale, glace, compression et élévation ») doit être suivi et est un élément central de la prise en charge de lésion aiguë des tissus mous (Bleakley, Glasgow, MacAuley 2012). La douleur affecte en effet la progression entre les différentes étapes de la réhabilitation, ainsi que le statut mental du sportif.
- **Récupérer l'amplitude du mouvement articulaire**
  Beaucoup de lésions chez les sportifs sont localisées à proximité ou sur une articulation. Une immobilisation prolongée de l'articulation à un certain angle peut avoir un effet négatif sur l'amplitude du mouvement articulaire, notamment via une contraction de la capsule articulaire. Une mise en mouvement précoce des articulations est bénéfique pour éviter ce phénomène, et regagner ainsi assez tôt une capacité d'extension passive et active totale. Une mauvaise récupération de l'amplitude du mouvement articulaire affecte négativement le processus de réhabilitation, et risque de retarder le retour au sport (Buckthorpe, Pirotti, Villa 2019).
- **Maintenir la fonction cardio-respiratoire**
  Si toute forme d'entrainement physique cesse suite à la lésion, les capacités cardio-pulmonaires de l'athlète vont diminuer, comme vu Chapitre 2. Le temps nécessaire pour recouvrer les aptitudes pré-lésion allonge la période de réhabilitation, ce qui n'est pas ce que l'on recherche chez un athlète. Il est donc nécessaire de maintenir le niveau cardio-respiratoire via un entrainement physique n'altérant pas le processus de guérison de la région lésée.
- **Récupérer et maintenir la force et l'endurance musculaire**
  L'arrêt de l'entrainement conduit à une diminution des capacités musculaires, comme vu Chapitre 2, qui seront longues à récupérer. La mise en place d'exercices isométriques et isocinétiques au cours du processus de réhabilitation assure une stimulation appropriée des muscles. Ces exercices doivent permettre le maintien des capacités des régions non lésées, et limiter la baisse de performance de la région lésée tout en s'assurant de l'absence de douleur et de lésions secondaires.
- **Récupérer la perception des mouvements du corps dans l'espace, la sensation des mouvements musculaires et l'ajustement neuromusculaire**
- **Maintenir l'équilibre psychologique du sportif**

Pour l'athlète il est primordial de recommencer le sport à un niveau de compétition suffisamment élevé, mais dans des conditions sécuritaires où le risque de récidive de la lésion est limité. Pour cela la réhabilitation se divise en plusieurs étapes successives de progression, mais il n'existe pas de tests *« gold standard »* définissant à quel moment passer à un niveau supérieur. Selon l'affection, plusieurs critères de progression (présence de douleur, angle de flexion ou extension, recrutement musculaire, qualité du mouvement…) ont été néanmoins décrits et peuvent servir d'aide au médecin dans ses décisions de renforcer le programme de réhabilitation (Draovitch *et al.* 2022). Il est également recommandé de surveiller la charge de travail associée, via le ratio de charge aigüe sur charge chronique de travail, afin d'éviter tout pic dans le volume ou l'intensité des exercices, qui pourrait entrainer une récidive de la lésion (H. Dhillon, S. Dhillon, M S. Dhillon 2017).

Le programme de réhabilitation peut se diviser en 3 étapes (Gastaldo, Gokeler, Villa 2022 ; Draovitch *et al.* 2022) :

- **La phase précoce** qui correspond à la phase de cicatrisation. Elle comprend la gestion de la douleur, la diminution de l'inflammation, l'amélioration de l'amplitude articulaire, et l'activation musculaire de la région lésée.
- **La phase intermédiaire** qui comprend le développement de la force musculaire de la région lésée et des régions non lésées, l'évaluation et l'amélioration de la qualité des mouvements via un entrainement neuromusculaire ciblant les mouvements de base altérés, le travail de la forme physique cardio-respiratoire.
- **La phase finale**, dont le but est de retrouver les capacités sportives spécifiques. Des exercices spécifiques du sport sont réalisés sur le terrain, visant le travail des mouvements propres au sport et à optimiser la performance neuromusculaire. L'athlète retourne à l'entrainement, et enfin en compétition et à ses performances.

II. Diminution de la douleur, du gonflement et amélioration de l'amplitude du mouvement articulaire

1. Gonflement articulaire

Lors de l'immersion, le membre est soumis à la pression hydrostatique. Comme vu Chapitre 1, l'eau exerce une pression de 1 mmHg pour chaque 1,36 cm de hauteur d'eau. À une profondeur de 120 cm, l'individu est soumis à une pression proche de 90 mmHg ce qui est légèrement supérieur à la pression diastolique normale. Si la pression exercée par l'eau est supérieure à la pression diastolique alors il se produit un déplacement des fluides forçant leur sortie de l'articulation et optimisant le retour veineux et le système de drainage lymphatique. Ces processus peuvent ainsi aider à la **résolution du gonflement articulaire, ce qui contribue à améliorer l'amplitude du mouvement de l'articulation**. Cette amélioration participe à la restauration d'une démarche normale ou optimale (Buckthorpe, Pirotti, Villa 2019).

2. Diminution de la douleur

L'immersion dans l'eau a également un **effet désensibilisant sur la région lésée via une diminution de la perception de la douleur**. L'action de la pression hydrostatique, de la flottabilité, et de la température de l'eau a été rapportée dans le Chapitre 1. La diminution de la douleur contribue alors également à la réalisation de mouvements avec une amplitude articulaire supérieure à celle qu'on aurait sur terre au même stade de la réhabilitation, **facilitant le rétablissement de l'amplitude du mouvement actif et passif** (Buckthorpe, Pirotti, Villa 2019).

3. Diminution des efforts mécaniques sur les structures anatomiques

Lors d'exercices sur terre supportant le poids du corps, comme la course à pied, les membres inférieurs sont soumis à des contraintes de charge répétées, du fait notamment de l'onde de choc transmise à travers le corps lors de l'impact avec le sol. Au moment de l'impact, les forces de réaction du sol sont deux à cinq fois supérieures au poids du corps. L'onde de choc transmise à travers le corps doit être atténuée pour permettre le bon fonctionnement du système vestibulaire et visuel. L'atténuation des chocs lors de la course est d'environ 60 % entre le tibia distal et la tête, avec une augmentation d'environ 20 % pour chaque augmentation d'un mètre par seconde de la vitesse. Les structures anatomiques qui permettent cette atténuation sont notamment la contraction excentrique des muscles, mais aussi l'élasticité des os, des cartilages, du fluide synovial et des tissus mous. Les contraintes répétées chez les sportifs notamment sont susceptibles de créer des lésions au niveau des membres inférieurs. L'immersion dans l'eau, via la pression hydrostatique et la flottabilité, permet de réduire ces forces d'impact. Macdermid, Fink, et Stannard (2017) comparent la course sur un tapis à sec (*land treadmill*, LT) et un tapis immergé (*water treadmill*, WT) avec une hauteur d'eau au niveau de l'épine iliaque antéro-supérieure. Ils montrent que le pic d'accélération à l'impact et le taux d'accélération à l'impact et au levé du pied, au niveau de la partie distale antéro-latérale du tibia, est significativement inférieure lors de la course sur le tapis immergé par rapport au tapis à sec, avec par conséquent une **atténuation des chocs par les membres pelviens significativement inférieurs lors de la course dans le tapis immergé** (43 % (WT) contre 80 % (LT)). Cette atténuation diminue également avec la hauteur d'eau, comme le montrent Pw *et al*. (2017) en comparant la course sur tapis immergé à hauteur d'eau de mi-tibia, mi-cuisse, et du processus xiphoïde. **Mécaniquement, le travail sur tapis immergé permet de réduire les efforts sur les structures anatomiques, en diminuant la charge excentrique qui s'exerce sur les articulations de la hanche, du genou et des chevilles, typique de la phase d'impact lors de course sur tapis à sec**. Cela confirme les bénéfices des tapis immergés comme un moyen de soulagement du poids du corps lors des exercices, minimisant le stress associé aux

impacts via la flottabilité (lorsque l'eau est au dessus de la taille) et l'effet hydrodynamique de résistance au mouvement (lorsque l'eau est en dessous de la taille), ce qui contribue à diminuer la douleur.

4. Amélioration de l'amplitude du mouvement articulaire

Suite à une chirurgie de reconstruction du ligament croisé antérieur (ACLR) par exemple, la perte de mouvement en extension – du fait de l'immobilisation et d'un développement de contracture articulaire, ou de l'inhibition musculaire arthrogénique – entraine le développement d'une cinématique anormale au niveau des articulations tibio-fémorale et patello-fémorale, qui peut se traduire par des pressions anormales au niveau des surfaces de contact entre les cartilages articulaires. Il a été montré que les patients qui présentent un déficit d'extension du genou après une ACLR ont un risque cinq fois plus élevé de développer des douleurs antérieures du genou[40]. L'incapacité à retrouver une extension complète dans les 3 semaines suivant une ACLR est un facteur prédictif important de développement du syndrome du Cyclope[41]. Par ailleurs, sans amplitude du mouvement articulaire appropriée, la biomécanique de la marche ne peut être normale ou optimale.
Les exercices de travail de l'amplitude du mouvement articulaire en flexion et extension devraient donc être commencés immédiatement après ACLR. Un mouvement articulaire précoce est bénéfique pour éviter le développement d'une contracture articulaire, et diminuer l'œdème et la douleur.

Le milieu aquatique, comme vu précédemment, contribue à diminuer l'œdème et la douleur, ce qui participe à l'amélioration de l'amplitude du mouvement articulaire. Il constitue également un environnement où les efforts mécaniques sur les structures anatomiques sont réduits, du fait de la flottabilité, autorisant la réalisation d'exercices de travail de l'amplitude du mouvement articulaire actif et passif plus précocement, et de façon plus sécuritaire (Buckthorpe *et al.* 2024).

5. Application aux lésions des sportifs

Les **déchirures méniscales** sont particulièrement fréquentes chez les joueurs de football américain, football, basketball, et chez les lutteurs. L'hydrothérapie peut être utilisée dans la phase précoce de la réhabilitation suite à la prise en charge chirurgicale de la déchirure, et permet une mise en charge adaptée du ménisque, et l'ajout d'exercices plus complexes graduellement (Gastaldo, Gokeler, Villa 2022).

Décrite dans les sports tels que le football américain, le football, le basketball, le tennis, le volley, la danse et la lutte, **l'entorse de la première articulation métatarso-phalangienne** est le plus souvent prise en charge sans chirurgie. Dans la phase précoce de la réhabilitation, lorsque la douleur et les gonflements sont en partie résolus, des exercices de renforcement pour restaurer l'amplitude de flexion et extension du gros orteil sont mis en place. Gupta *et al.* (2023) mentionnent pour cela des exercices aquatiques.

Dans la littérature, plusieurs auteurs comparent, suite à une **chirurgie de reconstruction de ligament croisé antérieur**, les effets de la réhabilitation dans l'eau avec des protocoles plus traditionnels sur terre. Il n'y a cependant pas de consensus établi sur la supériorité ou non de la thérapie aquatique. Tovin *et al.* (1994) ont montré que deux mois après la chirurgie, les exercices en piscine ne sont pas aussi efficaces que sur terre pour le renforcement musculaire, mais ont un effet positif sur la diminution de la douleur et de l'œdème. Zamarioli *et al.* (2008) rapportent, quant à eux, qu'après neuf semaines de réhabilitation, les patients ayant suivi une thérapie aquatique tendent à récupérer plus rapidement

[40] Marques FDS, Barbosa PHB, Alves PR, et al. Anterior knee pain after anterior cruciate ligament reconstruction. Orthop J Sports Med. 2020;8(10):2325967120961082.
[41] Pinto FG, Thaunat M, Daggett M, et al. Hamstring contracture after ACL reconstruction is associated with an increased risk of cyclops syndrome. Orthop J Sports Med. 2017;5(1):2325967116684121.

que ceux ayant suivi un protocole conventionnel sur terre, concernant la douleur, l'amplitude du mouvement articulaire, la force musculaire, le gonflement, et la circonférence de la masse musculaire, mais sans différence significative. Peultier-Celli *et al.* (2017) comparent 67 patients divisés en deux groupes, l'un suivant le protocole conventionnel de réhabilitation selon la Haute Autorité de santé Française, et l'autre suivant ce protocole adapté avec une période précoce de 3 semaines d'exercices aquatiques (Figure 19). Les mesures de l'amplitude du mouvement articulaire et de la douleur ne montrent aucune différence significative entre les deux groupes. De la même façon, après une autogreffe à partir des muscles ischio-jambiers pour la reconstruction du ligament croisé antérieur chez 24 patients, Pipino *et al.* (2023) proposent deux protocoles de quatre semaines de réhabilitation, avec trois sessions par semaine. Dans le protocole incluant la thérapie aquatique, les exercices consistent en une mobilisation active de la hanche et du genou, de la marche, du renforcement musculaire, et de la natation pendant les deux premières semaines auxquels sont ajoutés par la suite de la marche sur la pointe des pieds et sur les talons, du renforcement musculaire avec des poids, et le travail de la proprioception. Au cours de la période de réhabilitation, l'angle de flexion du genou et la douleur évaluée par l'échelle visuelle analogique, s'améliorent significativement dans les deux groupes, mais sans différence significative entre les deux groupes.

Vingt-deux athlètes d'élite avec une **entorse de ligament de grade I ou II au niveau de la cheville ou du genou (ligaments collatéraux médiaux ou latéraux)** sont répartis en deux protocoles à base d'exercices réalisés sur terre ou dans une piscine à hauteur d'eau de 1,2 m équipée d'un tapis immergé (Kim *et al.* 2010). Les programmes d'exercices débutent une semaine après la survenue de la lésion et consistent en 5 sessions par semaine pendant 3 semaines consécutives. Les sessions incluent des exercices permettant le travail de l'amplitude du mouvement articulaire, le renforcement musculaire (isométrique et isocinétique), le travail de la proprioception et des exercices fonctionnels. Les deux groupes montrent une amélioration significative du paramètre de la douleur, mais sans différence significative entre les deux groupes. Néanmoins, le taux d'amélioration de la douleur évaluée via l'échelle visuelle analogique est significativement supérieur dans le groupe aquatique à deux et quatre semaines post lésion. Le groupe aquatique s'améliore donc plus rapidement que le groupe sur terre. Ces résultats suggèrent que les athlètes blessés dans le groupe incluant des exercices aquatiques seraient capables de regagner en fonction plus rapidement, notamment durant la période précoce de réhabilitation.

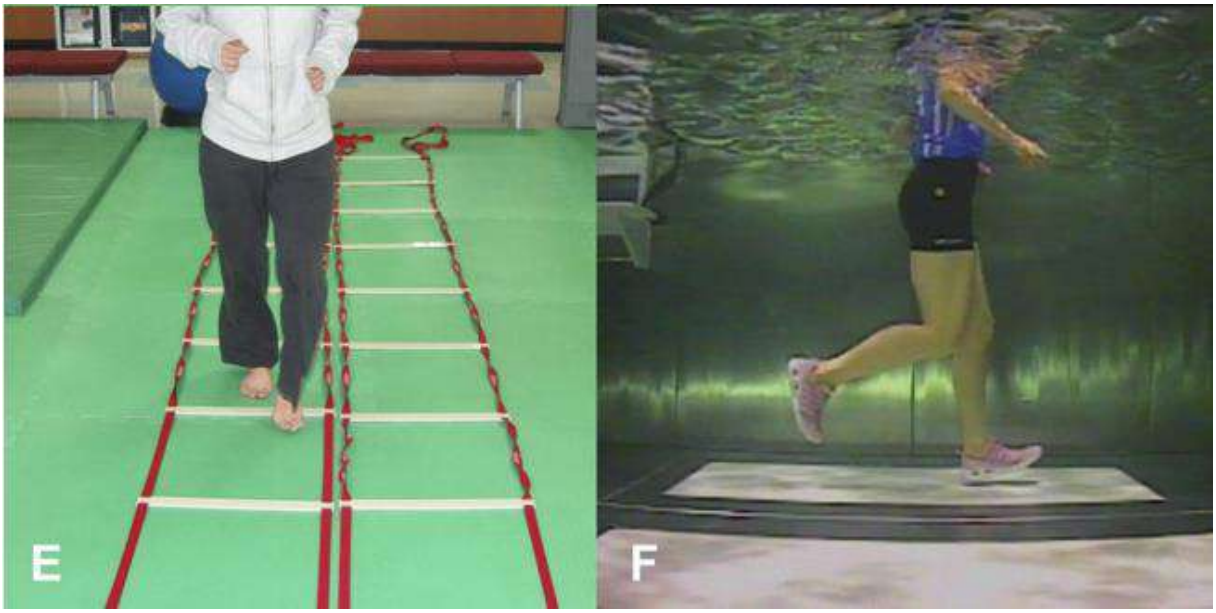


Figure 18 : (E) Exercice de marche sur terre et (F) adaptation dans l'eau sur tapis immergé, *source : Kim et al. (2010).*

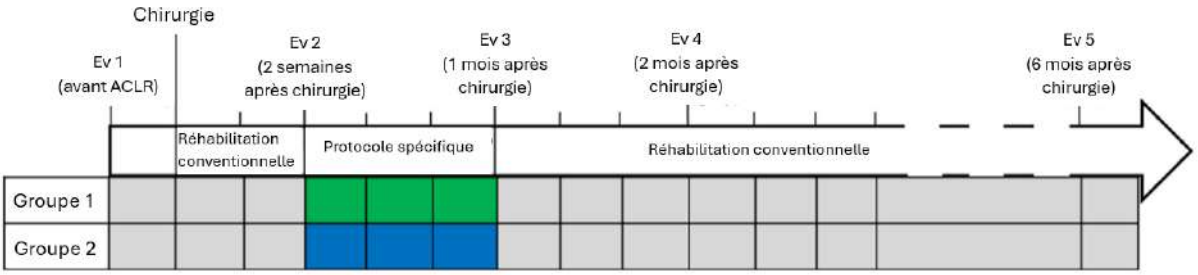


Figure 19 : Détails du protocole conventionnel (Groupe 1) et du protocole aquatique (Groupe 2), *d'après Peultier-Celli et al. (2017). Ev : évaluation.*

Après la chirurgie, les patients effectuent d'abord deux semaines de réhabilitation en suivant le protocole conventionnel jusqu'à cicatrisation, puis pendant 3 semaines ils sont soumis à l'un des deux protocoles spécifiques, pour finir ensuite par le protocole de réhabilitation conventionnel.

À retenir :

La thérapie aquatique lors de la réhabilitation de l'athlète, contribue à :

- la diminution du gonflement articulaire par l'action de la pression hydrostatique, participant à l'amélioration de l'amplitude du mouvement articulaire ;
- la diminution de la perception de la douleur par l'action de la pression hydrostatique, de la flottabilité et de la température, participant à l'amélioration de l'amplitude du mouvement articulaire ;
- l'amélioration de l'amplitude du mouvement articulaire passif et actif ;
- l'atténuation des chocs par les structures anatomiques des membres pelviens lors des phases d'impacts, diminuant ainsi les efforts mécaniques sur ces structures, par l'action de la flottabilité et de la pression hydrostatique.

Ces mécanismes d'action de la thérapie aquatique trouvent leur application pour la réhabilitation de l'athlète suite à une chirurgie de déchirure méniscale, une entorse de la première articulation métatarso-phalangienne, une chirurgie de reconstruction du ligament croisé antérieur, ou une entorse des ligaments collatéraux de la cheville ou du genou, sans supériorité significative par rapport aux méthodes de réhabilitation à sec.

III. Rétablissement du cycle de marche normal

Après une chirurgie de reconstruction du ligament croisé antérieur (ACLR) par exemple, le patient ne peut pas reporter normalement tout son poids sur le genou affecté ou marcher sans béquilles pendant une certaine période, souvent environ quatre semaines. De ce fait, les patients peuvent développer une démarche anormale, du fait des mouvements de compensation pour protéger la zone lésée. Les anomalies de démarche sont associées à une faiblesse articulaire, une diminution des performances fonctionnelles, une insatisfaction des patients après la chirurgie, et des complications post-opératoires comme l'ostéoarthrose (Buckthorpe, Pirotti, Villa 2019).
Rétablir une dynamique de marche normale rapidement après chirurgie du ligament croisé antérieur est une priorité au sein du processus de rétablissement fonctionnel. Les propriétés de l'eau, spécifiquement la densité et la flottabilité, aident à la maintenance d'une démarche optimale ou sa normalisation précoce après chirurgie, du fait de la diminution des effets de la gravité autorisant la pratique de la marche avec un poids du corps et une charge sur les articulations réduits (Prins, Cutner 1999 ; Buckthorpe, Pirotti, Villa 2019). À une hauteur d'eau suffisante, les forces gravitationnelles peuvent être partiellement voire complètement compensées, de sorte que seul le couple de forces musculaires agit sur la région lésée. Ainsi, durant les premiers stades de la réhabilitation suite à une ACLR, l'entrainement au cycle de marche devrait commencer dans une piscine ou un tapis immergé à différentes hauteurs d'eau, progressivement du plus profond au moins profond. L'immersion autorise alors la réalisation active de mouvements, qui seront automatiquement transférés au cycle de marche sur terre (Peultier-Celli *et al.* 2017). De plus, la marche dans l'eau permet de travailler la stabilité dynamique et le contrôle des mouvements, tout cela dans un environnement sécuritaire. Le programme de rééducation à une démarche correcte doit également inclure des exercices avec des mouvements sélectifs de sorte à soutenir le processus de réentrainement moteur, comme par exemple des montées de genoux à l'arrêt avec un contrôle optimal du complexe lombo-pelvi fémoral, et de la flexion des hanches, genoux et chevilles (Buckthorpe, Pirotti, Villa 2019).

Néanmoins, si l'immersion permet un réentrainement précoce au cycle de marche, il faut noter que la résistance hydrodynamique et la flottabilité associées aux mouvements dans l'eau entrainent une modification des paramètres spatio-temporels normalement décrits. Macdermid, Fink, et Stannard (2017) montrent que la course sur tapis immergé à hauteur d'eau au niveau de l'épine iliaque antéro-supérieure entraine une diminution significative de la fréquence de la foulée, et une augmentation significative de la longueur de la foulée en lien avec un allongement de la phase oscillante, par rapport à la course sur tapis à sec. Ces modifications sont d'autant plus marquées que la hauteur d'eau augmente, comme le décrivent Pw *et al.* (2017) en comparant la course sur tapis immergé à hauteur d'eau mi-tibia, mi-cuisse, ou du processus xiphoïde.

Des patients suivant un protocole de réhabilitation adapté avec une période précoce de 3 semaines d'exercices aquatiques parcourent une plus grande distance de marche en six minutes, un mois après chirurgie de ALCR, en comparaison des patients ayant suivi le protocole conventionnel de réhabilitation selon la Haute Autorité de santé Française (Peultier-Celli *et al*. 2017). Six mois après la chirurgie, il n'y a aucune différence entre les deux groupes, ce qui suggère que les patients ayant suivi le protocole innovant retrouvent leurs capacités plus rapidement que le groupe suivant le protocole conventionnel, mais que ceux appartenant au protocole conventionnel rattrapent ce retard au moins à 6 mois post-chirurgie. La réhabilitation aquatique permet un rétablissement plus rapide de la fonction du genou, ce qui empêcherait à court terme la lésion du membre controlatéral en lien avec une surcompensation, et réduirait le risque à long terme de développement d'ostéoarthrose. Parallèlement, Peultier-Celli *et al.* (2017) réalisent des tests de contrôle postural. Quinze jours après la chirurgie, les tests de posturographie montrent que les patients des deux groupes se reportent davantage sur le membre controlatéral au membre atteint. Cette nécessité de compensation diminue dans les deux groupes un

mois après la chirurgie. Cependant, pour la même qualité de contrôle postural, un report moins prononcé du Poids du côté du membre controlatéral à la chirurgie est noté chez les patients ayant suivi le protocole aquatique par rapport au groupe de réhabilitation conventionnelle. La mise en charge progressive de l'articulation lésée, en lien avec la flottabilité lors des exercices aquatiques, peut expliquer la diminution de la latéralisation chez les patients ayant suivi le protocole aquatique par rapport aux autres, un mois après la chirurgie.

Chez des athlètes avec une entorse de ligament de grade I ou II au niveau de la cheville ou du genou (ligaments collatéraux), une amélioration significative lors de la marche du pourcentage de temps d'appui sur le membre lésé est observée pour les patients ayant suivi les protocoles à base d'exercices sur terre ou dans une piscine, sans différence significative entre les deux groupes. Néanmoins, le taux d'amélioration du pourcentage de temps d'appui sur le membre lésé est supérieur à deux et quatre semaines post-lésion chez les patients ayant suivi le protocole aquatique. Cela peut être mis en lien avec le taux d'amélioration de la douleur significativement supérieur pour le groupe aquatique aux mêmes périodes. Ces résultats suggèrent que les athlètes blessés dans le groupe incluant des exercices aquatiques se rapprochent d'une démarche normale plus rapidement que le groupe ayant suivi le protocole standard avec des exercices sur terre, particulièrement durant la phase précoce de réhabilitation (Kim *et al.* 2010).

À retenir :

Lors d'une atteinte musculosquelettique d'un membre pelvien, le patient développe une démarche anormale, du fait des mouvements de compensation pour protéger la zone lésée. Il peut en résulter une diminution des performances fonctionnelles, et le développement d'ostéoarthrose sur le membre controlatéral et celui lésé.

En milieu aquatique, du fait de la flottabilité, les effets de la gravité sont diminués permettant l'entrainement au cycle de marche avec un poids du corps et une charge sur les articulations réduits. En diminuant progressivement la hauteur d'eau, les mouvements seront automatiquement transférés au cycle de marche sur terre.

S'il n'y a pas de différence observée sur le long terme concernant la normalisation de la démarche entre les protocoles de réhabilitation dans l'eau et sur terre, elle apparait plus précoce lors de thérapie aquatique, diminuant les risques de complications sur le long terme.

IV. Récupération de la proprioception

1. Définitions

La proprioception peut être définie comme la perception, consciente ou inconsciente, des différents segments du corps et de leur mouvement dans l'espace. Il s'agit d'un des trois systèmes, avec le système vestibulaire et visuel, contribuant à l'équilibre et au maintien de la position du corps. L'information proprioceptive est issue de terminaisons nerveuses spécialisées, les propriocepteurs, localisés dans les articulations, capsules articulaires, ligaments, muscles, tendons et la peau. La proprioception est généralement évaluée en mesurant la perception de la position articulaire (statesthésie) et du mouvement des membres dans l'espace. La perception de la position articulaire détermine l'aptitude du sujet à intégrer une certaine angulation articulaire puis à reproduire ensuite activement ou passivement le même angle articulaire. La perception du mouvement du membre traduit la détection des mouvements passifs du membre. Toutes les composantes de la proprioception sont importantes pour la génération de mouvements coordonnés, la maintenance de la posture corporelle, le contrôle de l'équilibre, et l'apprentissage et réapprentissage moteur (Ribeiro, Oliveira 2007; Ranjbaran, Shamekhi, Eftekharsadat 2024 ; Valdes, Manalang, Leach 2024).
Le ligament croisé antérieur est un composant structurel essentiel du genou et a un rôle dans la proprioception articulaire. Les récepteurs proprioceptifs du ligament sont activés par l'angulation articulaire, et la vitesse et tension des mouvements. Une lésion du ligament croisé antérieur affecte donc la biomécanique de l'articulation mais aussi le contrôle neurologique des muscles du genou. Relph, Herrington, et Tyson (2014) montrent que les patients dont un ligament croisé antérieur est atteint présentent un déficit proprioceptif, et sont prédisposés à la survenue de lésions. De ce fait, le rétablissement de la proprioception doit être pris en charge activement lors du processus de réhabilitation, et constitue un facteur essentiel influençant le risque de récidive (Li *et al.* 2022).

2. Application aux lésions des sportifs

Dans une étude prospective de réhabilitation suite à une ACLR, 60 patients sont répartis dans deux groupes : un groupe utilisant un tapis immergé et l'autre un tapis de course à sec. Pour le groupe aquatique, la hauteur d'eau est donnée au niveau du processus xiphoïde, la température est de 34,5 °C, et un flux d'eau est généré pour créer de la résistance. Les deux groupes suivent le même protocole avec 24 minutes de marche à une vitesse confortable, au rythme de quatre sessions par semaine pendant trois semaines. La perception passive de la position du genou est utilisée pour quantifier la proprioception des patients. Le genou du sujet est d'abord fixé sous différents angles (30, 45 et 60 degrés), puis à partir d'un angle de 90 degrés, il lui est demandé d'effectuer une extension pour se repositionner aux mêmes angles, et cela les yeux bandés. Les résultats de l'étude indiquent que **les exercices aquatiques induisent une amélioration significative de la perception passive de la position du genou affecté par rapport aux exercices sur le tapis à sec** (Li *et al.* 2022).
De la même façon, Hajouj *et al.* (2021) étudient la réhabilitation de 38 athlètes suite à une ACLR. Le programme est mené comme suit : tous les patients suivent d'abord un protocole conventionnel sur terre pendant sept semaines, puis ils sont répartis en deux groupes, l'un continuant le protocole conventionnel incluant des exercices de renforcement musculaire, de marche, d'entrainement neuromusculaire ; et l'autre effectuant ce même protocole auquel est ajouté un entrainement proprioceptif aquatique avec une hauteur d'eau entre la taille et le sternum, ce pendant six semaines. L'évaluation de la proprioception est effectuée par la perception active de la position du genou et montre une différence significative entre les deux groupes à l'issu des programmes de réhabilitation. **Les sujets appartenant au protocole avec un entrainement proprioceptif aquatique ajouté aux exercices conventionnels présentent un intervalle d'erreur significativement inférieur, traduisant une**

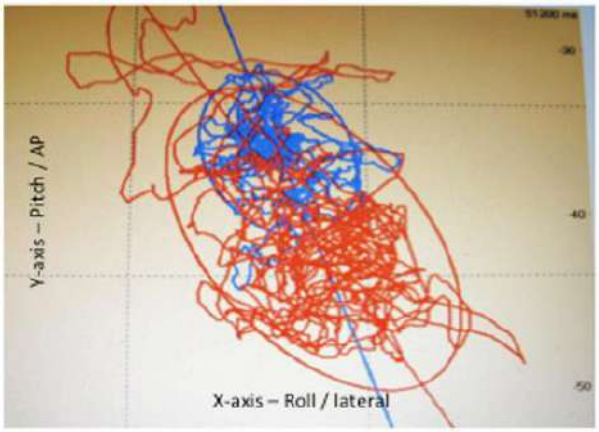
réduction du déficit proprioceptif. Il faut noter que l'amélioration ne peut être attribuée uniquement aux exercices aquatiques, mais possiblement aussi au nombre supplémentaire d'exercices réalisés.

L'avantage apparent de la thérapie aquatique sur la thérapie sur sol sec est nuancé par Peultier-Celli *et al.* (2017). Ils effectuent des tests de contrôle postural sur une plateforme de posturographie et des tests de proprioception par la perception active de la position du genou, chez deux groupes de patients suite à une ACLR. L'un des groupes suit un protocole de réhabilitation adapté comprenant une période précoce de trois semaines d'exercices aquatiques, et l'autre le protocole conventionnel de réhabilitation selon la Haute Autorité de Santé Française (Figure 19). Ils montrent que, **pour le même niveau de contrôle postural six mois après la chirurgie, le groupe réalisant des exercices aquatiques se repose davantage sur la somesthésie par rapport au groupe conventionnel**. Cela signifie que les patients ayant suivi le protocole aquatique ont développé davantage leurs capacités proprioceptives durant la réhabilitation. Néanmoins, les tests de proprioception ne montrent pas de différence significative entre les deux groupes au cours de l'étude.

Chez 22 athlètes avec une entorse d'un ligament collatéral de grade I ou II au niveau de la cheville ou du genou, Kim *et al.* (2010) montrent une **amélioration significative de l'équilibre statique et dynamique**, évalués par une plateforme de posturographie (*Biodex Balance System®*), après réhabilitation de trois semaines **via un protocole à base d'exercices réalisés sur terre ou dans une piscine, mais sans différence significative** entre les deux groupes. Cependant le taux d'amélioration est significativement supérieur pour le groupe suivant le protocole aquatique à deux et quatre semaines après la lésion pour les deux paramètres, témoignant d'une amélioration plus rapide.

La cheville est une des articulations les plus souvent atteinte chez l'Homme, avec des entorses des ligaments collatéraux notamment. Suite à une entorse, il peut se développer des symptômes résiduels, comme des épisodes où la cheville cède (« *giving way* ») et une sensation d'instabilité de la cheville. L'association de ces deux symptômes est décrite comme de l'instabilité fonctionnelle. La proprioception au niveau de la cheville est fondamentale dans la gestion de l'équilibre du corps humain durant les différentes activités fonctionnelles comme se tenir debout, marcher ou courir. Les sujets atteints d'instabilité fonctionnelle de la cheville présentent une altération de la stabilité posturale, une diminution de la proprioception et une altération du contrôle périphérique de la fonction des muscles de la cheville par comparaison aux sujets sains. Asimenia *et al.* (2013) recrutent trente sujets physiquement actifs souffrant d'instabilité fonctionnelle d'une cheville. Les patients sont répartis en deux groupes, l'un terrestre et l'autre aquatique, réalisant les mêmes exercices d'équilibre trois fois par semaine pendant six semaines. Les sessions durent 20 min et comprennent des exercices sur des planches d'équilibre et des disques d'air. L'équilibre est évalué au début et à l'issu du programme de réhabilitation via des tests de stabilité statique et dynamique utilisant une plateforme de posturographie (*Biodex Balance System®*). Les résultats initiaux montrent une différence dans les indicateurs de performance d'équilibre entre le membre sain et celui avec la cheville lésée. **Après les six semaines de réhabilitation à base d'exercices d'équilibre, ces indicateurs sont améliorés significativement dans les deux groupes, et aucune différence significative n'est détectée entre le membre affecté et le membre lésé**. Le taux d'amélioration ne varie pas entre les deux groupes, ce qui s'oppose aux résultats de Kim *et al.* (2010).

<u>Figure 20</u> : Plateforme de posturographie pour analyse du contrôle postural*, source : Peultier-Celli et al. (2017).*



<u>Figure 21</u> : Posturographie – Trajet du centre de pression du pied, lorsque le sujet a les yeux ouverts (bleu) et fermés (rouge), *source : Peultier-Celli et al. (2017).*
L'axe des X traduit les mouvements latéro-médiaux et l'axe de Y les mouvements antéro-postérieurs du centre de pression.

3. <u>Mécanismes d'action du milieu aquatique sur le travail de la proprioception</u>

Dans l'environnement aquatique il est possible de **stimuler la voie proprioceptive en créant des situations de déséquilibre dans de multiples directions**, via l'application de turbulences dans l'eau par exemple, que le patient doit graduellement contrôler en tentant de maintenir sa position, et cela de manière plus sécuritaire que sur terre. Des exercices, comme une planche de piscine placée sous les pieds du patient permettront également de développer une information proprioceptive. Alors que la planche aura tendance à remonter vers la surface, le patient doit développer de la coordination pour la maintenir, renforçant sa vigilance neuromusculaire et son équilibre.
La **pression hydrostatique et la viscosité de l'eau** sont une source de stimuli sensoriels externes. De même, la **force de trainée** qui induit la résistance aux déplacements dans l'eau, créée des **tourbillons** en périphérie et dans le sillage du corps en mouvement, renforçant les informations extéroceptives. De part ces stimuli, la **partie du corps immergée développe ainsi une meilleure perception de la position dans l'espace, et donc une meilleure proprioception** (Peultier-Celli *et al.* 2017 ; Asimenia *et al.* 2013).
Il est intéressant de noter qu'un déficit de contrôle postural peut être lié à un déficit de proprioception comme abordé ici, mais également à un défaut de contrôle neuromusculaire abordé dans la partie suivante.

À retenir :

L'information proprioceptive est issue de terminaisons nerveuses spécialisées, localisées dans les articulations, capsules articulaires, ligaments, muscles, tendons et la peau. Lors d'atteinte musculosquelettique, notamment du ligament croisé antérieur, un déficit proprioceptif peut donc être généré et prédisposer à la survenue de lésions.

La thérapie aquatique permet le travail de la proprioception par la création de situations de déséquilibres dans de multiples directions de façon plus sécuritaire. L'eau est une source de stimuli externes, via la pression hydrostatique, la viscosité et les micro-mouvements de fluide, contribuant à une meilleure perception de la position dans l'espace des zones immergées.

La perception passive ou active de la position du genou est améliorée significativement suite à une réhabilitation aquatique post-ACLR par rapport à une réhabilitation terrestre.
Les tests de contrôle postural statique et dynamique sur des plateformes de posturographie à l'issue de programmes de réhabilitation terrestre et aquatique montrent une amélioration mais sans différence significative entre les deux groupes. Il semble apparaitre néanmoins que les patients réhabilités dans l'eau recourent davantage à la somesthésie pour le contrôle postural, et que la vitesse d'amélioration peut être supérieure.

V. Maintenance et récupération de la force et de l'endurance musculaire

La réhabilitation musculaire a pour but de combattre l'amyotrophie associée à la convalescence, permettant indirectement la **stabilisation des articulations, puis à la fin de la réhabilitation la reprise plus précoce et sécuritaire des activités sportives** (Peultier-Celli *et al.* 2017). Par ailleurs, lors d'ACLR une perte importante de la force des **muscles quadriceps et ischio-jambier** est observée, et persiste sur une période prolongée. Cette faiblesse musculaire est associée à des performances fonctionnelles limitées, une asymétrie biomécanique, et un développement précoce d'ostéoarthrose post-traumatique. Le renforcement musculaire lors de réhabilitation présente donc des intérêts multiples (Li *et al.* 2022).

1. Activation musculaire des membres inférieurs en milieu aquatique ou terrestre

L'activité électromyographique des différents groupes musculaires des membres inférieures en milieu aquatique et terrestre a été étudiée et comparée par plusieurs auteurs (muscles tibial antérieur, gastrocnémien, biceps fémoral, droit fémoral, soléaire, grand glutéal, et vaste médial). Les résultats présentés par Silva *et al.* (2020) suggèrent que le milieu aquatique peut induire des activations musculaires similaires voire supérieures à celles observées lors d'exercices terrestres.

Tableau XI : Comparaison de l'activation des différents groupes musculaires des membres inférieurs pour des exercices en milieu aquatique et terrestre, *d'après Silva et al. (2020).*

Exercice terrestre	Exercice aquatique	Résultats d'activation musculaire des membres inférieurs
Marche sur terre	Marche à faible hauteur d'eau (entre la taille et les épaules)	L'activation musculaire est identique entre les deux groupes ou supérieure pour la marche à faible hauteur d'eau selon les études, et est dépendante de la vitesse.
Marche sur tapis à sec	Marche sur tapis immergé	- Pour une vitesse sur tapis immergé divisée par deux par rapport au tapis à sec : l'activation musculaire est inférieure dans l'eau. - Pour une même vitesse : l'activation musculaire est supérieure dans l'eau pour les muscles tibial antérieur, biceps fémoral, et vaste médial.
Course sur tapis à sec	Course en eau profonde (au cou)	Le même degré d'activation musculaire est observé pour les différentes intensités d'exercice, hormis pour les muscles distaux des membres dont l'activité est diminuée du fait de l'absence de contact avec le sol.

2. Évolution de la force et de l'activité musculaire lors d'entrainement en milieu aquatique ou terrestre

Lors de la réhabilitation de 67 patients avec ACLR selon les programmes terrestre ou aquatique déjà décrits Figure 19, Peultier-Celli *et al.* (2017) montrent une augmentation de la force musculaire des membres inférieurs dans les deux groupes, évaluée par des tests isocinétiques. L'**augmentation de cette force est significativement supérieure chez les patients ayant suivi le protocole comprenant la thérapie aquatique pour le muscle biceps fémoral (ischio-jambier) six mois après la chirurgie et le muscle quadriceps fémoral à deux et six mois post-chirurgie**. Par ailleurs, le **déficit musculaire** observé au niveau du muscle quadriceps fémoral du membre atteint **par rapport au membre controlatéral** est **inférieur** lors de l'entrainement incluant la **thérapie aquatique à six mois**.
Dans une étude prospective de trois semaines de réhabilitation suite à une ACLR, les 60 patients sont répartis dans deux groupes : un groupe utilisant un tapis immergé à hauteur du processus xiphoïde,

avec un flux d'eau généré pour créer de la résistance, et l'autre un tapis de course à sec. Les sessions se font à une vitesse de marche jugée confortable par le patient. La force et l'activité musculaire sont évaluées pour les muscles quadriceps fémoral et ischio-jambier par le ratio entre le couple maximal du muscle et le poids corporel, avant et après les trois semaines de réhabilitation. **L'amélioration du ratio est significativement supérieure concernant les muscles extenseurs du membre atteint (muscle quadriceps fémoral), pour le groupe utilisant un tapis immergé**. En revanche, aucune amélioration significative des muscles fléchisseurs n'est observée entre les deux groupes. La différence observée au niveau du renforcement des muscles extenseurs peut être liée à la résistance au mouvement supérieure dans l'eau, ainsi qu'au flux d'eau généré comme outil pour créer de la résistance. Un meilleur entrainement des muscles extenseurs semble donc être permis dans l'eau (Li *et al.* 2022).

Cependant, plusieurs études proposent des résultats contradictoires. Ils pourraient être liés aux méthodes d'entrainement différentes, à l'influence relative de la flottabilité sur les différents exercices, ou à l'application d'une résistance inadéquate.
Tovin *et al.* (1994) s'étaient déjà intéressés à la thérapie aquatique après une chirurgie de reconstruction du ligament croisé antérieur. Les participants devaient effectuer des exercices en chaîne fermée par étape, dans une piscine ou sur terre. Ils montraient alors que « la réhabilitation dans l'eau est autant efficace que sur terre pour la restauration de [l'amplitude du mouvement articulaire] du genou et la force du muscle quadriceps fémoral, mais est **moins efficace dans la restauration de la force des muscles ischio-jambiers** ».
Dans une revue systématique, Heywood *et al*. (2017) rapportent via des preuves apparaissant comme de très faible ou de faible qualité, le manque d'efficacité des exercices aquatiques pour améliorer la force et l'endurance des membres inférieurs chez les personnes atteintes d'une maladie musculosquelettique. Le manque d'efficacité est rapporté en comparaison de protocoles avec absence d'exercices ou réalisation d'exercices sur terre. L'effet réduit des exercices aquatiques dans les deux comparaisons est probablement lié à l'application d'une résistance insuffisante pour stimuler la construction musculaire des muscles de la hanche et du genou. La connaissance limitée du degré spécifique de résistance ou de force associée à chaque exercice aquatique contribue potentiellement à l'inefficacité de cette réhabilitation. Une prescription plus claire des exercices à réaliser, en utilisant les propriétés de l'eau, pourrait contribuer à une rééducation aquatique plus efficace. Une plus grande résistance lors des exercices aquatiques notamment, peut être obtenue en réduisant l'effet de flottabilité par diminution de la hauteur d'eau. La résistance à la traînée peut être augmentée avec des vitesses de mouvement plus rapides ou une plus grande aire du plan frontal en mouvement dans l'eau par l'utilisation d'équipements adaptés. Les jets sous-marins peuvent également être utilisés pour augmenter la résistance et l'intensité de l'exercice. Les exercices pliométriques aquatiques sont une autre opportunité pour des niveaux de résistance plus élevés, en particulier dans la phase de poussée. Ils sont davantage développés dans la partie VIII.

Pour finir, l'incorporation d'exercices aquatiques pour l'entrainement d'individus sains a été étudiée récemment. Michishita *et al*. (2023) recrutent vingt joueurs de football, qu'ils répartissent en un groupe effectuant un entrainement standard, et l'autre réalisant ce même entrainement auquel sont ajoutés des exercices aquatiques, pendant onze semaines. Les exercices aquatiques consistent en une phase d'entrainement par intervalles à haute intensité et des exercices de résistance en utilisant des accessoires. Les résultats de l'étude ne montrent pas d'amélioration significative de la force musculaire isocinétique du genou à faible vitesse concentrique (60°/s) pour le groupe réalisant les exercices aquatiques par rapport à l'entrainement de base ; en revanche **à vitesse concentrique élevée (180°/s), l'amélioration est significative pour la force musculaire isocinétique du genou en flexion et extension, et la force musculaire du dos**. Les mesures sont effectuées avec un dynamomètre. L'amélioration des performances dans le groupe réalisant des exercices aquatiques peut être liée à la charge de travail supplémentaire que cela représente, et ne peut donc pas être directement interprétée comme liée à

l'entrainement aquatique uniquement. Cependant, **cela suggère que la réalisation d'exercices aquatiques permet de stimuler efficacement le travail musculaire.**

3. Propriétés physiques de l'eau pour le travail musculaire

Plusieurs propriétés physiques de l'eau peuvent expliquer la supériorité relative de la thérapie aquatique dans le développement de la force musculaire :

- La viscosité crée une force de résistance au déplacement des membres, en lien avec la force de trainée et les turbulences. Elle induit une charge de travail pour les muscles dans toutes les directions de mouvement. Elle permet également, lorsque le patient ressent de la douleur, un arrêt immédiat du mouvement et donc des forces qui s'appliquent sur le genou. Cela assure un meilleur contrôle du renforcement musculaire.
- Après toute lésion intra-articulaire du genou, une période de repos doit être observée. Mais, le principe d'Archimède (flottabilité) permet une stimulation du muscle quadriceps fémoral sans charge, et donc un renforcement musculaire plus doux. Ensuite, la diminution du Poids apparent du corps associée à l'immersion permet une mise en charge précoce, et ainsi une augmentation progressive du renforcement musculaire en diminuant la hauteur d'eau.
- La température de l'eau favorise le réchauffement musculaire, ce qui peut favoriser la mobilisation du membre opéré, et permettre ainsi indirectement le renforcement musculaire.
- La pression hydrostatique joue également un rôle indirect dans le renforcement musculaire par la promotion du retour veineux et lymphatique.
- Ces différentes propriétés de l'eau vont aider à la disparition des contractures, qui peuvent apparaitre comme un mécanisme de défense après un trauma pour bloquer la région lésée, et permettre une mobilisation progressive et le travail musculaire de la région contracturée.

Remarque :
Lors de la mise en place du programme de renforcement musculaire, il faut garder à l'esprit le processus d'inhibition musculaire arthrogénique associé à certaines affections. Notamment, l'AMI survient dans un grand nombre d'affections du genou – comme par exemple l'ostéoarthrose, une douleur antérieure du genou, une contusion patellaire, une rupture du ligament croisé antérieur ou sa reconstruction, une lésion méniscale, une ménisectomie ou une arthroplastie du genou – avec un déficit d'activation du muscle quadriceps fémoral significatif. Cette inhibition peut rendre inefficace les exercices de renforcement musculaire mis en place, entravant la réhabilitation (Rice, McNair 2010 ; Hart *et al*. 2010).

À retenir :
Bien qu'il n'y ait pas de consensus, les exercices aquatiques semblent associés à une activation des muscles des membres inférieurs similaire voire supérieure aux exercices terrestres, et permettre un renforcement musculaire des muscles du genou efficace au cours d'un programme d'entrainement.
Lors de la comparaison de programmes de réhabilitation terrestre et aquatique suite à une chirurgie de reconstruction du ligament croisé antérieur, la réhabilitation aquatique apparait plus efficace pour le renforcement du muscle quadriceps fémoral et similaire ou plus efficace pour les muscles ischio-jambiers.
Des études supplémentaires visant à établir les degrés spécifiques de résistance ou de force associés à chaque exercice aquatique permettrait une prescription plus claire des exercices à réaliser et de leur intérêt au sein des programmes de réhabilitation.

La flottabilité et la viscosité de l'eau permettent un renforcement musculaire plus sécuritaire pour la région lésée, avec une modulation fine de l'intensité du travail, permettant de débuter les exercices de renforcement de façon plus précoce. La viscosité présente également l'intérêt d'un travail musculaire dans toutes les directions du mouvement.

VI. Maintien et développement de la fonction cardiorespiratoire

La condition cardiorespiratoire reflète la capacité fonctionnelle du cœur, des vaisseaux sanguins, des poumons et des muscles squelettiques à transporter et utiliser l'oxygène pour effectuer un exercice physique (American College of Sports Medicine, Liguori 2021). La préservation des paramètres de condition physique cardiorespiratoire, tels que la capacité aérobie maximale, les seuils de lactate et l'économie de course pendant le processus de rééducation est un enjeu important pour les athlètes, suite à des blessures nécessitant une période de repos prolongée, comme la rupture du ligament croisé antérieur. Des recherches récentes indiquent que les joueurs de football professionnels signalent des déficits de capacité aérobie encore six mois après leur chirurgie de reconstruction du ligament croisé antérieur[42], ce qui témoigne d'un plus grand besoin d'intégrer le conditionnement cardiovasculaire pendant le processus de récupération fonctionnelle (Buckthorpe, Pirotti, Villa 2019).

L'eau crée une résistance au mouvement supérieure à celle rencontrée lors de la locomotion sur terre, en lien avec la densité de l'eau et sa viscosité dynamique, comme vu Chapitre 1. Ces propriétés physiques de l'eau permettraient la réalisation d'exercices cardiovasculaires (Buckthorpe, Pirotti, Villa 2019). La course aquatique est couramment acceptée comme moyen de conditionnement physique pour les athlètes qui se remettent d'une blessure et pour ceux qui recherchent un mode d'entrainement croisé efficace. Son intérêt repose sur sa capacité à réduire le stress et les efforts répétés sur les membres inférieurs, normalement associés à la charge musculosquelettique lors d'exercices sur terre (Thein, Brody 1998 ; Silvers, Rutledge, Dolny 2007).

Les exercices aquatiques comme le vélo aquatique, la marche ou la course en eau peu profonde ou profonde ont été beaucoup étudiés dans la littérature. Il ressort de ces études que la fréquence cardiaque maximale dans l'eau est inférieure à celle obtenue sur terre. Cependant, la comparaison de la consommation maximale d'oxygène lors d'exercices en milieu aquatique ou terrestre montrent des résultats contradictoires. Les explications à ces divergences peuvent être les différences dans les protocoles utilisés, les groupes musculaires recrutés, et les exercices effectués pendant les tests (Alberton *et al.* 2014).

1. Évaluation de l'intensité et prescription de l'exercice aquatique

La sélection d'une activité physique appropriée en termes de modalité d'exercice, d'intensité, de fréquence et de durée est essentielle pour observer des effets significatifs à l'entrainement. Selon le principe de surcharge à l'entrainement, un exercice inférieur à une intensité minimale, ou seuil, ne suscitera pas un stress suffisant chez l'athlète pour entrainer une amélioration des paramètres physiologiques (Demarie *et al.* 2022). Pour améliorer la condition cardiovasculaire, il est généralement recommandé d'effectuer un exercice continue aérobie d'intensité modérée à vigoureuse ou un entrainement par intervalles avec des exercices d'intensité vigoureuse à supra-maximale. Néanmoins, le niveau d'intensité minimale nécessaire à l'entrainement varie d'un individu à l'autre, fonction de sa condition cardiovasculaire propre et de caractéristiques personnelles (American College of Sports Medicine, Liguori 2021). Plusieurs paramètres permettent de contrôler le niveau d'intensité associé à l'exercice : l'évaluation du pourcentage de la consommation maximale d'oxygène, le pourcentage de la fréquence cardiaque maximale, le seuil anaérobie, la perception de l'effort (Echelle de Borg) et la cadence de la foulée (Greene *et al.* 2011 ; Alberton *et al.* 2011 ; Andrade *et al.* 2020 ; 2022). Le Collège Américain de Médecine Sportive présente un guide pour développer et maintenir les capacités cardiorespiratoires chez les individus apparemment sains. Les repères d'intensité sont donnés dans le Tableau XII (American College of Sports Medicine, Liguori 2021). Lors d'exercices dans l'eau, afin de

[42] *Almeida AM, Santos Silva PR, Pedrinelli A, et al. Aerobic fitness in professional soccer players after anterior cruciate ligament reconstruction. PLoS One. 2018 Mar 22;13(3): e0194432. doi: 10.1371/journal. pone.0194432. eCollection 2018.*

maintenir la fonction cardiovasculaire, il parait essentiel de garantir des intensités d'exercice similaires à celles utilisées lors de l'entrainement sur terre (Buckthorpe, Pirotti, Villa 2019). Cependant, les recommandations actuelles sont données pour des exercices sur terre, et leur usage pour des exercices aquatiques est limité (Andrade *et al.* 2020).

Tableau XII : Estimation de l'intensité d'un exercice cardiorespiratoire*, d'après l'American College of Sports Medicine et Liguori (2021).*

Intensité	% Fréquence cardiaque maximale	Perception de l'effort (Echelle de Borg)	% Consommation maximale en oxygène
Très faible	< 57 %	< 9	< 37 %
Faible	57–63 %	9–11	37–45 %
Modérée	64–76 %	12–13	46–63 %
Vigoureuse	77–95 %	14–17	64–90 %
Supra-maximale à maximale	≥ 96 %	≥ 18	≥ 91 %

Il est à noter que durant l'immersion, certains paramètres physiologiques varient. Lorsqu'un individu est immergé dans l'eau, il est soumis à la pression externe exercée par l'eau selon un gradient, qui à une certaine profondeur devient supérieure à la pression veineuse, de sorte que le sang est déplacé au sein du système veineux et lymphatique, d'abord dans les cuisses puis dans les vaisseaux de la cavité abdominale et finalement dans les vaisseaux de la cavité thoracique et du cœur. Cette redistribution des volumes sanguins aboutit à une augmentation du retour veineux, de la précharge, du volume systolique et du débit cardiaque. L'augmentation du débit cardiaque varie selon la température de l'eau, elle est de 30 à 35 % chez un individu au repos immergé dans l'eau à 33 °C. Ces modifications sont associées simultanément à une diminution de la fréquence cardiaque de 12 à 15 %, pour une eau à température moyenne (Becker 2009 ; Becker *et al.* 2009 ; Alberton *et al.* 2014 ; Holmberg *et al.* 2021). Au cours d'un exercice dans l'eau, il est rapporté que l'augmentation du volume systolique est plus élevée, à toute intensité d'exercice, sous-maximale ou maximale, par rapport aux valeurs obtenues sur terre. De ce fait, il y a une réduction de la fréquence cardiaque dans l'eau pour des intensités d'exercice équivalentes, par rapport aux valeurs obtenues sur terre, d'environ 10 à 15 battements par minute, ce qui doit être pris en compte lors de la surveillance de l'intensité et du volume des exercices aquatiques (Buckthorpe, Pirotti, Villa 2019).

Du fait des modifications physiologiques cardiovasculaires associées à l'immersion, l'utilisation des valeurs de consommation d'oxygène ou de fréquence cardiaque mesurées sur terre dans la prescription des exercices aquatiques risque d'exposer les individus à une intensité d'entrainement trop élevée, voire à risque. Il serait donc nécessaire, pour adapter la prescription, d'effectuer des épreuves d'effort spécifiques à l'environnement aquatique (Andrade *et al.* 2022).

2. Course en eau profonde *(« deep-water running », DWR)*

La forme la plus commune de course en milieu aquatique est la course en eau profonde. La plupart des études ont montré que la DWR produit des pics de consommation d'oxygène (87 %) et de fréquence cardiaque (90 %) **inférieurs à ceux observés pour la course sur un tapis à sec**. Ogonowska-Slodownik, Richley Geigle, et Morgulec-Adamowicz (2020) concluent dans leur revue que pour des exercices ou de la course en eau profonde (à hauteur des épaules ou du nez), le pic de consommation d'oxygène ou la consommation maximale d'oxygène observée sont **inférieurs à ceux obtenus via un protocole réalisé sur terre**. Plusieurs facteurs peuvent l'expliquer (Silvers, Rutledge, Dolny 2007) :

- l'effet de la pression hydrostatique qui entraine une diminution de la fréquence cardiaque (comme vu précédemment) ;
- la force de trainée imposée par l'eau, qui limite la fréquence de la foulée, contribuant dans une certaine mesure à une diminution de la charge de travail ;

- la cinématique et le recrutement musculaire des membres inférieurs sont altérés par rapport à la course sur terre, du fait de l'absence de phase de contact avec le sol et la résistance additionnelle associées aux mouvements dans l'eau ;
- l'effet de la flottabilité qui diminue la charge de travail ;
- la température de l'eau ;
- souvent la méconnaissance de la technique adéquate pour courir en eau profonde ;
- l'utilisation d'accessoires de flottaison, qui peuvent permettre une meilleure dynamique de marche, mais induisent une diminution de la consommation maximale d'oxygène[43].

Cependant, sur une période de 22 mois, Burns et Lauder (2001)[44] ont examiné les effets de la course en eau profonde sur 181 soldats, souffrant de blessures qui les empêchaient d'entreprendre leurs exercices d'entrainement habituels nécessitant le support de leur poids, et suggèrent que la VO2max et les **performances de course peuvent être maintenues** (Buckthorpe, Pirotti, Villa 2019). De la même façon, Bushman *et al.* (1997)[45] rapportent que les performances sur une course de cinq kilomètres, l'économie de la course, le seuil de lactate, et la VO2max sont maintenus chez des coureurs de fond professionnels après remplacement de la course sur terre par de la DWR pendant quatre semaines. Dans une étude connexe[46], la VO2max **s'améliore même avec la DWR** par rapport à la course sur terre pendant une période d'entrainement de sept semaines chez des joueuses de football. Par ailleurs, Ritchie et Hopkins (1991)[47] et Gehring *et al.* (1997)[43] montrent que des coureurs professionnels peuvent atteindre des intensités d'entrainement similaires lors de DWR et de course sur terre. Ils proposent **qu'en modulant l'intensité, la durée et la fréquence d'entrainement via de la DWR, les performances aérobies de l'athlète peuvent être maintenues** (Holmberg *et al.* 2021).

3. Course en eau peu profonde *(« shallow-water running », SWR)*

La course en eau peu profonde est devenue populaire comme une forme alternative de course aquatique car plus proche de la dynamique de locomotion observée sur terre. La SWR combine les intérêts du milieu aquatique : l'augmentation de résistance aux mouvements des membres inférieurs dans l'eau, avec une diminution des forces de réaction du sol fonction de la profondeur de l'immersion. Mécaniquement la course en eau peu profonde, comme la course sur tapis immergé abordée ci-après, permet de réduire les efforts sur les structures anatomiques en diminuant la charge qui s'applique sur les articulations de la hanche, du genou et de la cheville, typiques des phases d'impact lors de la course terrestre. Une perte de la conservation d'énergie durant le cycle d'étirement-raccourcissement peut être alors associée, signifiant une diminution de l'économie de la course. Cette diminution de conservation de l'énergie implique une augmentation de la demande pour les muscles impliqués dans la phase propulsive avant le décollement des orteils, et l'extension du genou durant la phase oscillante de sorte à vaincre les forces résistives de l'eau (Macdermid, Fink, Stannard 2017).

Plusieurs études ont comparé les réponses cardiorespiratoires lors de SWR avec la course sur terre, et rapportent des conclusions différentes. Ces différences peuvent être liées à l'utilisation de protocoles qui varient en terme (Silvers, Rutledge, Dolny 2007) :

- de sélection de l'intensité de la course ;
- de la hauteur d'eau ;

[43] Gehring MM, Keller BA, Brehm BA. Water running with and without a flotation vest in competitive and recreational runners. Med Sci Sports Exerc 29: 1374–1378, 1997.

[44] Burns AS, Lauder TD. Deep water running: an effective non-weightbearing exercise for the maintenance of land-based running performance. Mil Med. 2001;166(3):253-258.

[45] Bushman BA, Flynn MG, Andres FF, et al. Effect of 4 wk of deep water run training on running performance. Med Sci Sports Exerc 29: 694–699, 1997.

[46] Oddsson EE. Effects of deep-water running and land-based running program on aerobic power, physical fitness and motivation on female youth footballers. In: Master's Thesis. Reykjavik, Iceland: Reykjavik University, 2019. pp. 45–49.

[47] Ritchie SE, Hopkins WG. The intensity of exercise in deep-water running. Int J Sport Med 12: 27–29, 1991.

- lorsque le niveau d'eau est en dessous de la ligne de la taille : l'augmentation de la hauteur d'eau durant la SWR augmente la force de résistance de l'eau, et donc la demande métabolique associée pour un exercice donné. Ce coût supplémentaire de dépense énergétique n'est pas compensé par la flottabilité jusqu'à ce que le niveau de l'eau s'approche et/ou dépasse le niveau de la taille.
- lorsque le niveau d'eau dépasse la ligne de la taille : la flottabilité réduit la charge de travail, et la résistance frontale rencontrée lors du déplacement vers l'avant dans l'eau augmente, ce qui peut limiter la fréquence de la foulée et dégrader la mécanique de course, réduisant encore la charge de travail.

- d'utilisation d'accessoires de flottaison.

Ogonowska-Slodownik, Richley Geigle, et Morgulec-Adamowicz (2020) concluent dans leur revue que pour des exercices ou de la course en eau peu profonde (de la taille aux épaules), le **pic de consommation d'oxygène ou la consommation maximale d'oxygène observée sont inférieurs à ceux obtenus via un protocole réalisé sur terre.**
Cependant, Kwok, Poon, *et al.* (2022) comparent les réponses cardiovasculaires chez vingt jeunes femmes en bonne santé réparties en deux groupes d'entrainement fractionné de haute intensité, l'un sur terre et l'autre dans l'eau à hauteur du processus xiphoïde. L'évaluation de l'intensité de l'exercice dans cette étude se rapporte à des tests d'effort réalisés spécifiquement en milieu aquatique et sur terre, afin d'assurer une comparaison adéquate entre les deux protocoles. **La fréquence cardiaque maximale rapportée pour le groupe aquatique est significativement inférieure au groupe sur terre, mais aucune différence significative n'est rapportée entre les deux groupes concernant la consommation maximale d'oxygène et la perception de l'effort**.
Town et Bradley (1981)[48] comparent la réponse métabolique maximale de coureurs professionnels sur tapis à sec, DWR et SWR. Ils montrent des VO2max et fréquence cardiaque maximale supérieures pour la course sur tapis à sec par rapport à la course dans l'eau, et une VO2max supérieure pour la course en SWR par rapport à la DWR (Holmberg *et al.* 2021).

Ainsi, la **SWR peut générer des réponses cardiovasculaires comparables à la course sur terre, et supérieures à la DWR**. Des paramètres comme la hauteur d'eau ou la vitesse peuvent être manipulés en fonction du but de l'entrainement et du statut de l'athlète. La diminution progressive de la hauteur d'immersion permet une vitesse de course supérieure, et une augmentation des forces de réaction du sol, ce qui affecte l'économie de la course et la capacité aérobie (Holmberg *et al.* 2021).

4. <u>Course sur tapis immergé</u>

Les tapis immergés sont une forme de course en eau peu profonde qui permet l'atténuation de la résistance frontale associée à la locomotion dans l'eau, en éliminant la composante de déplacement vers l'avant. Par conséquent, une démarche plus naturelle est permise, associée à un recrutement musculaire davantage comparable à la course sur terre, ce qui améliore la spécificité de l'entrainement en eau peu profonde. Les tapis immergés présentent également l'intérêt du contrôle des paramètres tels que la vitesse, le niveau d'eau, et l'application de résistance supplémentaire via des jets d'eau. Ils permettent donc la maitrise de la charge de travail (Silvers, Rutledge, Dolny 2007).

La réponse cardiorespiratoire de 23 coureurs d'universités répartis en deux groupes est évaluée par une épreuve d'effort maximal jusqu'à épuisement, sur un tapis immergé ou un tapis à sec (Silvers, Rutledge, Dolny 2007). Pour le protocole avec tapis immergé, les sujets sont immergés dans de l'eau à 28 °C à hauteur du processus xiphoïde, et l'augmentation de l'intensité de l'exercice passe par l'augmentation de la vitesse et de la résistance par des jets d'eau. Pour le protocole avec tapis à sec,

[48] *Town GP, Bradley SS. Maximal metabolic responses of deep and shallow water running in trained runners. Med Sci Sports Exerc 23: 238–241, 1981.*

l'augmentation de l'intensité passe par l'augmentation de la vitesse et de la pente du tapis. Les résultats montrent que la **course en eau peu profonde sur un tapis immergé peut provoquer des pics dans les réponses cardiovasculaires similaires à ceux observés durant la course sur tapis à sec**, dans la mesure où un équilibre adapté est trouvé entre la flottabilité et la résistance des fluides. **Aucune différence significative n'est ainsi montrée dans les pics de consommation d'oxygène et de fréquence cardiaque ou de perception de l'effort, entre les deux milieux.** Ces résultats suggèrent que la **course sur tapis immergé peut être aussi efficace que la course sur tapis à sec dans le conditionnement aérobie** chez les individus en forme (Silvers, Rutledge, Dolny 2007 ; Brubaker *et al.* 2011 ; Greene *et al.* 2011).
De la même façon, Ogonowska-Slodownik, Richley Geigle, et Morgulec-Adamowicz (2020) et Andrade *et al*. (2022) concluent dans leurs revues que la réalisation d'exercices aquatiques sur tapis immergé ou vélo aquatique génère des réponses cardiovasculaires, en termes de consommation maximale en oxygène et fréquence cardiaque maximale similaires aux exercices correspondants réalisés sur terre. Ces résultats **suggèrent que lorsque les mouvements et les protocoles sont semblables, entre la pratique dans l'eau et sur terre, il est possible d'obtenir des valeurs identiques de capacité aérobie**.
La course sur tapis immergé peut également générer des pics de consommation d'oxygène et de fréquence cardiaque significativement supérieurs à ceux observés sur tapis à sec. Macdermid, Fink, et Stannard (2017) le montrent en comparant chez six coureurs de compétition, de moyenne et longue distance, la réponse à une course de 15 min à 2,83 m/s sur un tapis immergé à hauteur de la taille ou sur un tapis à sec.
Gleim et Nicholas[49] rapportent que la course sur tapis immergé à vitesse sub-maximale et à hauteur d'eau au niveau de la cheville, de la patella, ou mi-cuisse, nécessite des VO2 supérieures à la course sur tapis à sec. Lorsque l'eau est au niveau de la taille, les valeurs de VO2 sont comparables à celles sur terre. Le niveau d'eau influence donc la réponse cardiovasculaire (Silvers, Rutledge, Dolny 2007).

Un entrainement idéal en eau peu profonde serait donc de la course sur un tapis immergé à une hauteur d'eau suffisante pour permettre une diminution significative des forces de charge qui s'exercent sur les membres inférieurs, associée à des mouvements suffisamment rapide pour maximiser les forces de trainée produites par le mouvement des membres dans l'eau, sans dégradation de la mécanique de course (Silvers, Rutledge, Dolny 2007).

5. Applications aux lésions des sportifs

L'entrainement par intervalles à haute intensité est une forme d'exercice alternant des niveaux d'intensités proches de la consommation maximale en oxygène de l'individu, avec des temps de récupération active. Le but est de promouvoir l'amélioration de la capacité aérobie et de l'endurance en induisant des modifications cardiorespiratoires. Bunæs-Næss *et al.* (2023) montrent que la réalisation de ce type d'entrainement dans l'eau induit le même niveau d'amélioration de VO2max que sur terre chez des individus souffrant de conditions chroniques. Les études incluses dans la revue rapportent des niveaux d'immersion entre la taille et le cou. Kwok, Ng, *et al.* (2022) rapportent, eux, une amélioration des marqueurs cardio-métaboliques chez des femmes ayant suivi un entrainement aquatique par intervalles à haute intensité par rapport à un groupe sans exercice. Un tel entrainement dans l'eau pourrait donc être une alternative pour commencer des exercices de haute intensité de manière moins stressante en terme de mise en charge pour l'organisme lors de la réhabilitation des athlètes.

L'entorse de la première articulation métatarso-phalangienne est décrite dans les sports tels que le football américain, le football, le basketball, le tennis, le volley, la danse et la lutte. Gupta *et al.* (2023) proposent d'intégrer dans la réhabilitation, six à dix semaines après la survenue de la lésion, qu'il y ait

[49] *GLEIM, G. W., and J. A. NICHOLAS. Metabolic costs and heart rate responses to treadmill walking in water at different depths and temperatures. Am. J. Sports Med. 17:248–252, 1989.*

prise en charge chirurgicale ou non chirurgicale, de la course dans l'eau et des exercices aquatiques aérobies pour favoriser le conditionnement cardiovasculaire.

L'instabilité patellaire peut s'avérer être une lésion complexe à prendre en charge dans la population d'athlètes. Les sports tels que le football américain, le football, le basketball, et la gymnastique sont considérés comme des sports à haut risque de dislocation patellaire. Dans les cas d'instabilité patellaire récurrente, une reconstruction chirurgicale des fibres du complexe fémoro-patellaire médial est proposée. Durant la phase finale du protocole de réhabilitation, des exercices aquatiques peuvent être mis en place pour l'entrainement cardiovasculaire, comme la course dans l'eau à partir de 12 semaines post-chirurgie ou la natation à partir de 16 semaines (Lampros, Wiater, Tanaka 2022).

L'intérêt de l'hydrothérapie dans la phase intermédiaire de réhabilitation suite à une **chirurgie du ménisque latéral** est rapporté par Gastaldo, Gokeler, et Villa (2022) chez des joueurs de football. Pour commencer la phase finale de la réhabilitation avec une condition physique suffisante, il est recommandé pour la plupart des patients d'incorporer des sessions spécifiques de reconditionnement cardiovasculaire via des exercices limitant la mise en charge comme la course en eau profonde, la course sur tapis antigravité, ou via des entrainements croisés, ou du vélo stationnaire.

Les fractures de stress des membres inférieurs représentent entre 80 et 90 % des fractures de stress, et sont communes chez les coureurs. Fredericson *et al.* (2006)[50] décrivent un protocole de deux phases pour la réhabilitation de coureurs souffrant d'une telle affection. La première phase dure au moins deux semaines et se concentre sur le repos et le contrôle de la douleur. Durant cette période, le maintien de la condition aérobie est permis via un entrainement croisé incluant le vélo et la nage. Les patients peuvent également réintroduire la course, afin de favoriser la spécificité des exercices, par l'utilisation de modalités qui déchargent les membres inférieurs, comme la course en eau profonde et les tapis de course antigravité. Les auteurs proposent par exemple six à huit semaines de course en eau profonde alternée avec de la course sur tapis antigravité, au rythme de quatre à six séances par semaine de 45 à 90 minutes. La seconde phase se concentre sur un retour progressif à la course sur terre, pendant laquelle il est possible d'alterner avec des jours de course dans l'eau ou dans un milieu antigravitaire (Liem, Truswell, Harrast 2013).

[50] *Fredericson M, Jennings F, Beaulieu C, Matheson GO. Stress fractures in athletes. Top Magn. Reson. Imaging. 2006; 17:309Y25.*

À retenir :

Au cours du processus de réhabilitation, le maintien de la condition cardio-respiratoire est essentiel pour un retour précoce au sport. Le milieu aquatique permet le travail de cette condition cardio-respiratoire par la course en eau profonde, en eau peu profonde et sur tapis immergé. La réponse de l'organisme est fonction de la flottabilité et de la résistance des fluides. Lorsque la hauteur d'eau est inférieure au niveau de la taille, la flottabilité est insuffisante pour permettre un déchargement substantiel des membres inférieurs, mais les forces de trainée imposées par la résistance de l'eau augmentent substantiellement le coût métabolique, et donc la consommation d'oxygène. Au-delà du niveau de la taille, l'augmentation de la flottabilité contrebalance l'augmentation concomitante de la charge de travail associée à la résistance de l'eau, ce qui se traduit par une consommation d'oxygène diminuée ou similaire entre les milieux aquatique et terrestre (Silvers, Rutledge, Dolny 2007 ; Demarie *et al.* 2022).

Tableau XIII : Comparaison des pics de consommation d'oxygène pour de la course en milieu aquatique ou terrestre, *source : Delacharlerie Aurore.*

Exercice aquatique	**Pics de consommation d'oxygène**
Course en eau profonde	Inférieurs à ceux observés lors de course sur terre.
Course en eau peu profonde	Inférieurs ou similaires à ceux observés lors de course terrestre, et supérieurs à ceux observés lors de course en eau profonde.
Course sur tapis immergé	Similaires (lors d'immersion au dessus de la taille) ou supérieurs (lors d'immersion en dessous de la taille) à ceux observés lors de course sur tapis à sec.

Au cours du processus de réhabilitation, la course dans l'eau peut permettre le maintien des paramètres de condition physique cardiovasculaire (performances de course, VO2 max) par une combinaison adéquate des vitesses et profondeurs d'eau, tout en offrant un environnement où les forces de charge sont réduites.

Il est important de noter, lors de la construction d'un programme d'exercices aquatiques, que la réponse physiologique cardiovasculaire diffère lors d'immersion dans l'eau, avec une augmentation du débit cardiaque et une diminution de la fréquence cardiaque, d'où la difficulté d'extrapoler les valeurs d'intensité cardio-respiratoire d'un entrainement sur terre aux exercices dans l'eau.

VII. Entrainement à la qualité et coordination des mouvements

La rééducation ciblée des mouvements est importante après une blessure, afin de corriger les éléments biomécaniques à risque qui peuvent avoir été liés à la blessure initiale, ou être survenus secondairement en raison de changements associés à la blessure, ou une combinaison des deux.
Une altération de la biomécanique du mouvement et des déficits de contrôle postural sont associés à un risque accru de nouvelle blessure lors du retour au sport et de développement précoce d'ostéoarthrose, après une chirurgie de reconstruction du ligament croisé antérieur[51,52] par exemple.

Les pratiques de rééducation conventionnelle semblent limitées pour restaurer la qualité du mouvement avant le retour au sport. Des programmes individualisés de réentrainement au mouvement, ciblant les facteurs qui contribuent au dysfonctionnement du mouvement, tels que les facteurs neuromusculaires et biomécaniques (dysfonctionnement arthrocinétique, dominance synergique, déséquilibres musculaires, inhibition musculaire réciproque), ainsi que les facteurs neurocognitifs et sensorimoteurs, sont nécessaires.
L'incapacité à corriger les troubles du mouvement pourrait être liée à une qualité, une intensité ou un volume insuffisant d'entrainements basés sur le mouvement. En particulier, il semble que la rééducation neuromusculaire pour développer la force (par exemple, l'utilisation d'exercices isolés tels que l'extension du genou) ne suffit pas à optimiser la qualité du mouvement. Il est nécessaire de mettre en pratique le mouvement, en intégrant la force musculaire acquise au cours de la réhabilitation, afin de réapprendre les schémas de mouvements appropriés et d'optimiser la coordination (Buckthorpe, Pirotti, Villa 2019).

1. Introduction précoce du réentrainement aux mouvements

Le processus de rééducation aux mouvements après une ACLR, sans recours à la thérapie aquatique, est généralement effectué de manière systématique : le patient suit une période de renforcement musculaire pour résoudre les déséquilibres musculaires, suivie d'exercices de travail de la coordination pour réapprendre les mouvements optimaux.
La flottabilité observée dans l'eau, en s'opposant aux forces de gravité, permet l'introduction d'exercices de renforcement fonctionnel, et de mouvements (comme des squats, fentes, *step-up*…), plus tôt dans le programme de réhabilitation que sur terre, notamment pour les patients dont la mise en charge des membres inférieurs est délicate et qui ne peuvent tolérer la charge qui accompagne de nombreuses tâches fonctionnelles de type sportif, comme lors de ACLR.
L'utilisation de la thérapie aquatique peut donc faciliter l'introduction plus précoce de l'entrainement aux mouvements, permettant le travail simultané de la force musculaire (en grande partie dans la salle de sport) et du contrôle moteur (dans la piscine) au cours des phases précoce et intermédiaire de la réhabilitation. Il en va de même pour l'introduction précoce de la course (à l'aide de dispositifs de flottabilité ou à différentes hauteurs d'eau), du saut, de l'atterrissage et des techniques de pliométrie, qui peuvent tous être introduits avec des paramètres de charge inférieurs à ceux observés sur terre, accélérant ainsi le processus de réapprentissage moteur. Les progrès sont maximisés jusqu'à la phase intermédiaire de la réhabilitation, permettant une restauration plus appropriée des performances fonctionnelles et fournissant une base de qualité de mouvement supérieure, sur laquelle s'appuyer lors de la phase finale de réhabilitation.
Il a été démontré que des exercices tels que le saut et l'entrainement à l'équilibre sur une jambe dans l'eau, entrainent des améliorations fonctionnelles similaires aux mêmes exercices effectués sur

[51] *Paterno MV, Schmitt LC, Ford KR, et al. Biomechanical measures during landing and postural stability predict second anterior cruciate ligament after anterior cruciate ligament reconstruction and return to sport. Am J Sports Med 2010; 38:1968-1978.*
[52] *Paterno MV, Kiefer AW, Bonnette S, et al. Prospectively identified deficits in sagittal plane hip-ankle coordination in female athletes who sustain a second anterior cruciate ligament injury after anterior cruciate ligament reconstruction and return to sport. Clin Biomech. 2015;30:1094-1104.*

terre[53,54]. L'avantage de pouvoir les exécuter dans l'eau avec un poids corporel ou des forces d'impact inférieurs signifie qu'ils peuvent être introduits en toute sécurité et plus tôt dans le programme de réhabilitation (Buckthorpe, Pirotti, Villa 2019).

2. Renforcement de l'activation neuromusculaire

La persistance de déficits neuromusculaires après la réhabilitation de patients ayant été traités par ACLR est largement observée. La combinaison d'exercices isolés et d'exercices fonctionnels est essentielle pour optimiser le développement neuromusculaire des membres inférieurs. Les exercices isolés permettent le renforcement musculaire, et les exercices fonctionnels sont un prérequis pour le transfert de cette amélioration de la force musculaire à des performances fonctionnelles. Cependant, la plupart des exercices conventionnels fonctionnels ne permettent pas d'obtenir une activation neuromusculaire adéquate.

L'activité musculaire du muscle biceps fémoral, du muscle droit fémoral, du muscle tibial antérieur, et du muscle gastrocnémien médial ont été mesurées par électromyographie dans plusieurs situations. Un groupe contrôle composé d'individus sains et un groupe de patient ayant subi une ACLR sont soumis à une course de deux minutes sur un tapis à sec ou un tapis immergé à trois hauteurs d'eau (mi-tibia, mi-cuisse et taille), à une vitesse de 110 foulées par minute (So *et al.* 2022).
Les conclusions suivantes sont rapportées :

- **Muscle biceps fémoral**
    - Lors de la phase d'appui, une **augmentation significative de l'activité musculaire** du muscle biceps fémoral est observée **dans les deux groupes, pour les trois hauteurs d'eau par rapport à l'exercice sur terre**, et avec l'augmentation de la hauteur d'eau. Une explication possible de ce phénomène est **l'augmentation des turbulences** auxquelles les membres inférieurs sont soumis lors de l'augmentation de la profondeur d'immersion, qui peuvent mener à davantage de mouvements de translation du tibia. Or, les muscles ischio-jambiers sont des agonistes du ligament croisé antérieur et préviennent un avancement antérieur excessif du tibia. Le muscle biceps fémoral contribue à cette stabilité dynamique du genou en limitant la rotation interne du tibia sur le fémur. Une augmentation du recrutement du muscle biceps fémoral pour la stabilisation dynamique du genou suite à une ACLR est donc avantageuse.
    - Palmieri-Smith *et al* (2019)[55] rapportent une activation musculaire du muscle biceps fémoral supérieure chez les patients ayant eu une ACLR pour laquelle aucune récidive n'est observée par rapport à ceux avec récidive.
    - Azmi *et al* (2018)[56] suggèrent qu'une contraction maximale volontaire du muscle biceps fémoral de 20,8 % durant la marche peut éliminer les forces de cisaillement antérieures et limiter la rotation interne au niveau du genou. Les résultats de l'étude de So *et al.* (2022) montrent un niveau d'activation dans l'eau du muscle biceps fémoral supérieur (24,84 % à mi-tibia) à ce niveau minimal requis pour protéger le ligament croisé antérieur et promouvoir la stabilité du genou.

[53] Asimenia G, Paraskevi M, Polina S, et al. Aquatic training for ankle instability. Foot Ankle Spec. 2013; 6:346-351.
[54] Stemm JD, Jacobson BH. Comparison of land and aquatic-based plyometric training on vertical jump performance. J Strength Cond Res. 2007;21: 568-571.
[55] Palmieri-Smith RM, Strickland M, Lepley LK. Hamstring Muscle Activity After Primary Anterior Cruciate Ligament Reconstruction-A Protective Mechanism in Those Who Do Not Sustain a Secondary Injury? A Preliminary Study. Sports Health. 2019 Jul/Aug;11(4):316-323. doi: 10.1177/1941738119852630. Epub 2019 Jun 13. PMID: 31194624; PMCID: PMC6600587.
[56] Azmi NL, Ding Z, Xu R, Bull AMJ. Activation of biceps femoris long head reduces tibiofemoral anterior shear force and tibial internal rotation torque in healthy subjects. PLoS One. 2018 Jan 5;13(1): e0190672. doi: 10.1371/journal.pone.0190672. PMID: 29304102; PMCID: PMC5755889.

- **Par le renforcement du muscle biceps fémoral, la course sur tapis immergé** peut être une **forme d'entrainement neuromusculaire efficace pour restaurer la stabilité du genou après ACLR**.

- **Muscle droit fémoral**
  - Lors de la phase oscillante, une **augmentation significative de l'activité** du muscle droit fémoral est observée **dans les deux groupes, pour les trois hauteurs d'eau par rapport à l'exercice sur terre**. Dans l'environnement aquatique, la **force de résistance de l'eau** s'oppose au mouvement vers l'avant du membre inférieur. Cette propriété de l'eau peut expliquer l'activation supérieure du muscle lors de la phase oscillante.
  - Plusieurs études rapportent la faiblesse et le déficit d'activation du muscle quadriceps après ACLR, probablement en lien avec l'AMI. L'activité supérieure du muscle droit fémoral rapportée ici lors de course sur tapis immergé suggère son intérêt comme outils de réhabilitation chez les patients suite à une ACLR.

Remarque :
Le **score de *Tegner Lysholm*** est utilisé pour l'évaluation fonctionnelle lors des lésions du genou, notamment lors d'atteinte ligamentaire. Différents symptômes au niveau du genou sont évalués : le degré de boiterie, l'utilisation d'une cane ou de béquilles, une sensation de blocage du genou, d'instabilité, de la douleur, un gonflement, la capacité à monter des escaliers et s'accroupir. Li *et al.* (2022) comparent deux groupes suite à une ACLR, l'un suivant une réhabilitation sur tapis de course à sec, et l'autre sur tapis immergé à hauteur du processus xiphoïde. Les patients réalisent un score de *Tegner Lysholm* au début de l'étude puis après trois semaines de réhabilitation. Le score pour la jambe lésée est augmenté significativement pour les deux groupes après les trois semaines d'exercice, avec une augmentation significativement supérieure pour le groupe avec réhabilitation aquatique. Les exercices aquatiques semblent donc ici plus efficaces pour la récupération fonctionnelle du genou. Les propriétés physiques de l'eau contribuent à diminuer l'œdème (pression hydrostatique), augmenter le flux sanguin aux muscles et tissus favorisant ainsi la cicatrisation (pression hydrostatique et température de l'eau), diminuer la douleur et la rigidité articulaire. L'amélioration fonctionnelle est permise par les améliorations en termes d'inflammation, proprioception et force musculaire.
Le **score de *l'International Knee Documentation Commitee* (IKDC)** peut également être utilisé pour l'évaluation fonctionnelle du genou.
Contrairement au résultat précèdent, Hajouj *et al.* (2021) et Pipino *et al.* (2023) ne montrent pas de différence significative entre les patients du groupe suivant un protocole de réhabilitation conventionnel et ceux effectuant des exercices aquatiques suite à une ACLR, concernant les scores IKDC et *Tegner Lysholm*.

À retenir :
L'entrainement à la qualité et coordination des mouvements est essentiel au cours du processus de réhabilitation de sorte à éviter tout risque de nouvelle blessure lors de la réalisation de tâches fonctionnelles et lors du retour au sport, ainsi que le développement précoce d'ostéoarthrose. Il est nécessaire pour cela de mettre en pratique le mouvement, en intégrant le travail de la force musculaire et le réapprentissage des schémas de mouvements appropriés.
Grâce à la flottabilité, la thérapie aquatique facilite l'introduction plus précoce de l'entrainement aux mouvements. L'augmentation de l'activité musculaire des muscles biceps fémoral et droit fémoral chez les patients en réhabilitation de ACLR sur tapis immergé, contribue à renforcer le contrôle neuro-musculaire et donc la stabilité du genou.

VIII. Introduction précoce de l'entrainement pliométrique

1. Notion de performance neuromusculaire

De manière générale, la réhabilitation donne une importance particulière au développement de la force musculaire maximale isolée après une ACLR, avec moins de considération sur la capacité à développer rapidement de la force. Typiquement, le temps est limité pour développer une force lors de mouvements sportifs explosifs, comme lors de la course de sprint (temps de 80 à 120 ms), ou lors de nécessité de stabilisation rapide des articulations pour prévenir les blessures articulaires après une perturbation mécanique (temps inférieur à 50 ms). Il faut environ 300 ms au système neuromusculaire pour générer une force maximale. Par conséquent, la capacité à produire une force lors d'activités sportives explosives, dépend davantage de la capacité à augmenter rapidement la force à partir de faibles niveaux, appelée **taux de développement de la force** (*« Rate of Force Development »,* RFD), que de la force musculaire maximale en elle-même. Le RFD semble donc être un aspect important de la fonction neuromusculaire et nécessite une considération supplémentaire dans la phase finale des programmes de réhabilitation. D'après différentes études[57], il semble que le RFD n'est pas restauré efficacement après une blessure avant le retour au sport. En effet, des déficits du RFD de 30 % ont été identifiés chez les patients six mois après ACLR, malgré une restauration presque complète (97 %) de la force maximale concentrique des extenseurs du genou[58] (Buckthorpe, Pirotti, Villa 2019).

Outre le RFD, la **capacité à générer une puissance maximale au cours de mouvements complexes** est également d'une importance majeure pour la réussite sportive dans de nombreux sports. La puissance mécanique est généralement définie comme le taux d'exécution d'un travail et est donnée par le produit de la force par la vitesse. Sur la base de cette équation, les deux éléments centraux qui impactent la capacité de l'athlète à générer des puissances élevées sont la capacité à appliquer rapidement des niveaux de force élevés et à exprimer des vitesses de contraction élevées (Buckthorpe, Pirotti, Villa 2019).

Ainsi, la force maximale, le RFD et la puissance maximale sont des éléments importants de la performance neuromusculaire qui doivent être restaurés après une blessure.

2. Définitions de l'entrainement pliométrique

Les exercices pliométriques des membres inférieurs sont couramment utilisés par les athlètes pour développer une vitesse, une force et une puissance explosives. Ils impliquent un cycle d'activité d'étirement-raccourcissement, dans lequel la contraction excentrique musculaire est rapidement suivie d'une contraction concentrique du ou des mêmes muscles. Durant la phase excentrique (pré-étirement), l'unité musculo-tendineuse est étirée, ce qui permet de stocker l'énergie élastique, et les fuseaux musculaires activent le réflexe d'étirement. L'entrainement pliométrique a été rapporté supérieur à l'entrainement en résistance plus traditionnel pour le développement de performances explosives des membres inférieurs, et peut contribuer à l'amélioration de la force et de la puissance des membres inférieurs, et à l'augmentation de la conscience des articulations et de la proprioception globale (Davies, Riemann, Manske 2015 ; Buckthorpe, Pirotti, Villa 2019).

La réalisation d'exercices pliométriques de haute intensité produit souvent des lésions musculaires, dues principalement à la composante excentrique de l'action musculaire, et une mise en charge excessive des articulations des membres inférieurs (ligaments, structures articulaires, tendons) qui peut entrainer des blessures. Les forces d'impact typiques lors d'un exercice pliométrique sur terre sont

[57] Opar DA, Williams MD, Timmins RG, et al. Rate of torque and electromyographic development during anticipated eccentric contraction is lower in previously strained hamstrings. Am J Sports Med. 2013; 41:116-125.

[58] Angelozzi M, Madama M, Corsica C, et al. Rate of force development as an adjunctive outcome measure for return-to-sport decisions after anterior cruciate ligament reconstruction. J Orthop Sports Phys Ther. 2012; 42:772-780.

comprises entre deux à six fois la masse corporelle, en fonction de la tâche pliométrique spécifique. Des déficits de force musculaire excentrique fonctionnelle des membres inférieurs signifieraient une capacité neuromusculaire insuffisante pour absorber ces forces de manière excentrique, avec par conséquent une plus grande dépendance vis-à-vis des complexes articulaires (tendons, ligaments et structures articulaires) pour l'absorption des forces. Cela pourrait entrainer un risque accru de blessure ou une réaction de surcharge de l'articulation (Buckthorpe, Pirotti, Villa 2019).

L'entrainement pliométrique constitue souvent un aspect important de la phase finale du programme de réhabilitation et du retour au sport, une fois que la capacité fonctionnelle nécessaire pour tolérer ces forces élevées a été restaurée.

Figure 22 : Exemple d'exercice pliométrique réalisé dans l'eau, *source : Buckthorpe, Pirotti, et Villa (2019).*

L'exercice pliométrique consiste ici en un saut à deux pieds. En considérant le muscle quadriceps : (A) la phase d'amortissement, (B) la phase concentrique (contraction concentrique du muscle quadriceps) et (C) la phase excentrique (contraction excentrique du muscle quadriceps).

3. La pliométrie en milieu aquatique

Dans l'eau, la force de flottabilité et la viscosité contrôlent le mouvement vers le bas (atterrissage) du corps ; et la viscosité s'oppose au mouvement vers le haut (saut). La réalisation d'exercices pliométriques aquatiques génère ainsi des forces plus élevées vers le haut (concentriques) et inférieures vers le bas (excentriques). Une réduction d'environ 45 à 60 % des forces maximales de réaction au sol est enregistrée lors d'un exercice pliométrique dans l'eau par rapport à un exercice sur terre[59].

L'entrainement pliométrique dans l'eau en comparaison de l'exercice terrestre présente :

- des caractéristiques similaires en termes de production de puissance et de force explosive pendant la phase concentrique ;
- un niveau inférieur de forces d'impact, et de surcharge articulaire ;
- une réduction de l'inflammation articulaire et de la douleur perçue dans les heures et jours suivants l'entrainement (Buckthorpe, Pirotti, Villa 2019).

Lors des exercices aquatiques, il semble y avoir une grande variation individuelle concernant la réduction des forces de réaction du sol par rapport au milieu terrestre, qui peut être attribuée en partie à la profondeur de l'eau, à la taille des participants, à la composition corporelle et aux techniques d'atterrissage. Plusieurs auteurs[60,61] ont recommandé d'effectuer les exercices pliométriques

[59] *Donoghue OA, Shimojo H, Takagi H. Impact forces of plyometric exercises performed on land and in water. Sports Health. 2011; 3:303-309. Thein JM, Brody LT. Aquatic-based rehabilitation and training for the elite athlete. J Orthop Sports Phys Ther. 1998; 27:32-41.*

[60] *Koury JM. Aquatic Therapy Programming: Guidelines for Orthopedic Rehabilitation. Champaign, IL: Human Kinetics; 1996.*

[61] *Miller MG, Berry DC, Gilders R, et al. Recommendations for implementing an aquatic plyometric program. Strength Cond J. 2001; 23:28-3.*

aquatiques **dans de l'eau à hauteur de la taille** (Buckthorpe, Pirotti, Villa 2019). Pour des niveaux d'eau supérieurs :

- le contrôle et la coordination des mouvements peuvent être altérés, rendant plus difficile le maintien de la stabilité en position verticale ;
- l'ampleur de la résistance liée à la force de traînée est augmentée pendant la phase de poussée, du fait de la plus grande surface corporelle immergée et du balancement des bras dans l'eau ;
- la vitesse à l'atterrissage est diminuée et le temps de contact à l'atterrissage augmenté, impactant le stockage de l'énergie lors du cycle d'étirement-raccourcissement.

La réalisation d'exercices pliométriques dans l'eau peut donc offrir une alternative à la pliométrie terrestre :

- permettant son introduction plus tôt dans le programme de réhabilitation, avec un risque diminué de blessures articulaires et/ou de surcharge ;
- ou en tant que complément aux exercices terrestres, pour limiter les forces d'impact et la charge globale d'entrainement, tout en maximisant les bénéfices de l'entrainement neuromusculaire (Buckthorpe, Pirotti, Villa 2019).

Les forces de réaction au sol typiques pendant la course à pied varient de 2 à 3 fois la masse corporelle, ce qui suggère que la pliométrie dans l'eau peut être utilisée avant (par exemple, utilisation de pliométrie bilatérale) et pendant (par exemple, pliométrie bilatérale et unilatérale) la mise en œuvre du programme de retour à la course, et comme préparation à l'entrainement pliométrique sur terre (Buckthorpe, Pirotti, Villa 2019).

Heywood *et al.* (2022) effectuent la revue des différents effets de l'entrainement pliométrique aquatique chez des individus sains. La majeure partie des études recensées rapportent une hauteur d'eau entre la taille et la poitrine, avec un entrainement deux à trois fois par semaine pendant six à douze semaines. La faible qualité des études limite la valeur des conclusions. Ils rapportent que :

- L'entrainement à base de pliométrie aquatique induit des améliorations similaires en termes de force isocinétique du genou, saut vertical et sprint que l'entrainement pliométrique terrestre, mais sans être clairement supérieures par rapport à l'absence d'entrainement pliométrique.
- La mise en charge plus faible lors de l'entrainement aquatique par rapport à l'entrainement sur terre, et la durée plus longue de la phase d'impact ou d'atterrissage peuvent être bénéfiques, en particulier en présence de lésions ou d'épanchements articulaires des membres inférieurs (par exemple, après une chirurgie arthroscopique, une lésion ligamentaire aiguë ou de l'arthrose).

À retenir :

Les exercices pliométriques des membres inférieurs sont couramment utilisés par les athlètes pour développer une vitesse, une force et une puissance explosives.

La réalisation des exercices pliométriques en milieu aquatique :

- conserve la production de puissance et de force explosive pendant la phase concentrique (saut) ;
- assure le contrôle du mouvement vers le bas (atterrissage) du corps et donc une réduction des forces d'impact.

La pliométrie aquatique peut alors :

- être introduite plus précocement dans le programme de réhabilitation, avec un risque diminué de blessures articulaires et/ou de surcharge ;
- intervenir en complément de l'entrainement terrestre.

IX. Récupération entre les sessions et gestion de la charge optimale des exercices

1. Théorie de la surcompensation

L'entrainement sportif implique généralement une **augmentation progressive de la charge d'entrainement, à des niveaux supérieurs à ceux auxquels le corps est habitué**. Par adaptation au nouveau stress, des améliorations de la performance sportive peuvent alors survenir, à condition qu'une récupération adéquate soit autorisée (Versey, Halson, Dawson 2013). En effet, **la récupération est le temps en dehors de l'entrainement où les améliorations de la capacité physiologique vont réellement se mettre en place**. L'équilibre entre l'entrainement et la récupération est important afin d'optimiser le gain de performances tout en évitant une mal-adaptation ou des blessures. Le processus de récupération trouve son importance également entre les séances de réhabilitation, au cours desquelles l'athlète reconditionne son corps à l'activité sportive (Buckthorpe, Pirotti, Villa 2019 ; Driller, Leabeater 2023).

Théorie de la surcompensation :
Théorie selon laquelle les fatigues centrale et périphérique aiguës induites par une séance d'exercice peuvent être rétablies par une période de récupération, permettant ainsi des adaptations physiologiques et, finalement, le rétablissement ou l'amélioration de la capacité physiologique et des performances athlétiques (Driller, Leabeater 2023).

2. Stratégies de récupération

2.1. Objectifs

Les modalités de récupération agissent sur des domaines physiologiques, biomécaniques, neurologiques ou psychologiques. Les athlètes signalent principalement la **réduction des courbatures musculaires** comme objectif des stratégies de récupération. Les courbatures musculaires résultent de la perturbation mécanique et de l'inflammation des fibres musculaires, ce qui entraine la libération d'enzymes qui sensibilisent les nerfs dans le muscle, provoquant des douleurs lorsque le muscle se contracte ou est étiré. L'inflammation et les microtraumatismes qui se produisent dans la cellule musculaire sont essentiels pour que le tissu musculaire se renforce et s'adapte, lui permettant de produire à nouveau de la force sans que le même degré de dommage ne survienne (« *repeated-bout effect* », qui peut être traduit par « l'effet de répétition »). Bien que les courbatures musculaires aient peu d'impact sur les performances sportives, des niveaux excessifs de courbatures peuvent décourager les athlètes à poursuivre l'exercice ou les amener à réduire l'intensité lors des séances d'entrainement suivantes. Cependant, il convient de noter que les courbatures musculaires et en particulier les courbatures musculaires à apparition retardée sont généralement associées à des exercices intenses, inhabituels ou excentriques, plutôt qu'à un entrainement régulier (Driller, Leabeater 2023).

L'entrainement régulier est une partie nécessaire de la vie d'un athlète, et sans aucune intervention de récupération, les individus récupéreront naturellement à leur propre rythme après l'exercice. **L'intérêt d'utiliser des modalités de récupération est leur potentiel à accélérer ce processus**. L'incorporation de différentes stratégies de récupération pourrait permettre aux athlètes de minimiser les effets néfastes des courbatures musculaires et de la fatigue perçue, permettant ainsi le maintien des performances lors des entrainements et des compétitions ultérieures. Si une stratégie particulière soulage les courbatures musculaires, par exemple, cela pourrait permettre à un athlète de s'entrainer en enchainant plus rapidement les séances, avec une meilleure qualité et/ou avec un volume ou une intensité plus élevés (Driller, Leabeater 2023).

2.2. Récupération aquatique par immersion

L'immersion dans l'eau est une technique de récupération largement utilisée par les athlètes et a été étudiée dans la littérature scientifique. Après l'exercice, les participants immergent généralement tout ou une partie de leur corps dans l'eau. Cependant, les protocoles optimaux pour favoriser la récupération des performances après l'exercice restent flous. La température de l'eau, la durée de l'immersion, le moment, la profondeur d'immersion et le niveau d'activité peuvent varier (Versey, Halson, Dawson 2013).

2.2.1. Mécanismes d'action

Alors que de nombreuses réponses physiologiques à l'immersion dans l'eau sont relativement bien documentées, les mécanismes exacts par lesquels la récupération des performances pourrait être affectée restent incertains et peuvent différer selon les types d'exercice et les mécanismes de fatigue impliqués. Les mécanismes potentiels[62,63,64,65] sont principalement susceptibles d'être associés aux effets de la pression hydrostatique et de la température de l'eau sur le corps.

- ⇨ **La pression hydrostatique** entraine une élévation du débit cardiaque, du flux sanguin musculaire et de la diffusion des déchets métaboliques du muscle vers le sang, favorisant ainsi la récupération en améliorant l'élimination des déchets métaboliques produits pendant l'exercice et en réduisant le temps de transport de l'oxygène, des nutriments et des hormones vers les muscles fatigués. De plus, la pression hydrostatique peut limiter la formation d'œdème après l'exercice, réduisant ainsi les dommages musculaires supplémentaires, maintenant la distribution d'oxygène aux muscles et préservant la fonction contractile.
- ⇨ **La température de l'eau** peut influencer ces réponses physiologiques et mécanismes potentiels par le biais des changements de température cutanée. Pendant l'immersion dans l'eau chaude, une vasodilatation superficielle et une augmentation du flux sanguin sont susceptibles de se produire. Inversement, l'immersion dans l'eau froide est associée à une vasoconstriction et à une diminution relative du flux sanguin. Il est reconnu que la cryothérapie réduit les réponses inflammatoires et soulage les spasmes musculaires et la douleur après des lésions tissulaires aiguës. Des réponses similaires peuvent se produire après une immersion dans l'eau froide en raison d'une réduction de la vitesse de conduction nerveuse.

2.2.2. Techniques d'immersion

La récupération de la performance athlétique par immersion dans l'eau a été divisée en quatre techniques en fonction de la température de l'eau :

- **Immersion dans l'eau froide** (température inférieure ou égale à 20 °C) (« *cold water immersion* », CWI) ;
- **Immersion dans l'eau chaude** (température supérieure ou égale à 36 °C) (« *hot water immersion* », HWI) ;
- La **thérapie de contraste** : alternance de l'immersion dans l'eau froide et l'eau chaude (« *contrast water therapy* », CWT) ;
- **Immersion en eau tiède ou thermoneutre** (température comprise entre 20 °C et 36 °C) (« *thermoneutral water immersion* », TWI) : une eau à température de 35 °C est considérée

[62] *Wilcock IM, Cronin JB, Hing WA. Physiological response to water immersion: a method for sport recovery? Sports Med. 2006;36(9):747–65.*
[63] *Cochrane DJ. Alternating hot and cold water immersion for athlete recovery: a review. Phys Ther Sport. 2004;5(1):26–32.*
[64] *Hing WA, White SG, Bouaaphone A, et al. Contrast therapy: a systematic review. Phys Ther Sport. 2008;9(3):148–61.*
[65] *Bleakley CM, Davison GW. What is the biochemical and physiological rationale for using cold water immersion in sports recovery ? A systematic review. Br J Sports Med. 2010;44(3):179–87.*

thermo-neutre car elle n'altère pas la température corporelle durant une immersion prolongée.

Les CWI et CWT peuvent favoriser la récupération en accélérant les diminutions de stockage de chaleur post-exercice et de la température centrale jusqu'à l'homéostasie ou en dessous, tandis que l'HWI peut ralentir la diminution de la température centrale (Versey, Halson, Dawson 2013).

Les CWI et les CWT sont deux des stratégies de récupération les plus couramment étudiées et utilisées, tant par les athlètes récréatifs que par les athlètes d'élite. Les recommandations générales en matière de température et de durée pour les CWI sont de 11 à 15 °C pendant 11 à 15 minutes, généralement sous forme de bain ou de piscine portable. Pour les CWT, les temps d'immersion totaux ne doivent pas être inférieurs à 10 minutes, avec des temps d'immersion similaires pour l'eau chaude (38–40 °C) et l'eau froide (environ 10 °C).
En général, les méta-analyses et les revues sur le sujet tendent à soutenir l'utilisation des CWI et CWT comme stratégies de récupération aiguë après l'exercice, avec des bénéfices pour les performances dans divers sports[66,67,68] (Driller, Leabeater 2023). La littérature disponible est insuffisante pour déterminer laquelle des CWI ou des CWT est plus efficace pour accélérer la récupération des différentes formes de fatigue (par exemple, la fatigue neuronale par rapport aux lésions musculaires). Par conséquent, il n'est pas possible de recommander une technique spécifique d'immersion dans l'eau pour la récupération après un type d'exercice spécifique. Néanmoins, il semblerait que les athlètes présentant une température centrale élevée (souvent causée par un exercice intense soutenu dans des conditions chaudes) devraient privilégier les CWI, car ils sont susceptibles de provoquer la plus grande baisse de la température centrale, mais les CWT peuvent être préférables pour les athlètes ayant une température centrale plus basse afin de limiter toute nouvelle baisse (Versey, Halson, Dawson 2013).

Par ailleurs, des recherches émergentes ont montré que l'utilisation chronique de bains de glace après un entrainement en résistance peut perturber le processus d'inflammation post-entrainement et atténuer les signaux physiologiques et les adaptations au fil du temps. Cependant, cela n'a pas été signalé après des exercices aérobies, où des améliorations de la récupération aiguë peuvent permettre aux athlètes de maintenir ou d'augmenter leur charge d'entrainement et ainsi stimuler une plus grande adaptation physiologique. Des recherches supplémentaires sont nécessaires sur l'utilisation chronique de l'immersion dans l'eau froide dans divers sports et contextes d'exercice. Avec les preuves disponibles actuellement, cela pourrait être une stratégie utile lors de la saison sportive et pendant les compétitions (Driller, Leabeater 2023).

2.3. Course en eau profonde

La course en eau profonde a été recommandée aux joueurs pour accélérer le processus de récupération entre les matchs[69]. Elle est également pertinente pour la récupération pendant le processus de réhabilitation, où les athlètes reconditionnent leur corps à l'activité sportive. Les avantages de la course en eau profonde pour accélérer le processus de récupération après un effort intense d'exercices pliométriques ont été étudiés[70]. La course en eau profonde n'a pas réussi à prévenir les courbatures musculaires à apparition retardée, mais elle semble accélérer le processus de récupération de la force des jambes et des courbatures musculaires perçues. Après 48 heures, la force des jambes est diminuée

[66] Machado, A.F.; Ferreira, P.H.; Micheletti, J.K.; de Almeida, A.C.; Lemes, Í.R.; Vanderlei, F.M.; Netto Junior, J.; Pastre, C.M. Can water temperature and immersion time influence the effect of cold water immersion on muscle soreness? A systematic review and meta-analysis. Sports Med. 2016, 46, 503–514.
[67] Higgins, T.R.; Greene, D.A.; Baker, M.K. Effects of cold water immersion and contrast water therapy for recovery from team sport: A systematic review and meta-analysis. J. Strength Cond. Res. 2017, 31, 1443–1460.
[68] Versey, N.G.; Halson, S.L.; Dawson, B.T. Water immersion recovery for athletes: Effect on exercise performance and practical recommendations. Sports Med. 2013, 43, 1101–1130.
[69] Cable, T. Deep-water running. Insight: The Football Association's Coaching Association Journal, 2000;3:45.
[70] Reilly T, Cable NT, Dowzer CN. Does deep-water running aid recovery from stretch-shortening cycle exercise? Communication to the Sixth Annual Conference of the European College of Sport Science, Ko¨ ln, Germany, July. 2001.

en moyenne de 20 % pour les groupes au repos et/ou ayant effectué de la course sur tapis roulant, mais seulement de 7 % pour le groupe de course en eau profonde, tandis que la douleur a également diminué de 40 % dans ce groupe (Buckthorpe, Pirotti, Villa 2019).

3. Optimisation de la charge de travail

La charge optimale peut être définie comme la charge appliquée aux structures qui maximise l'adaptation physiologique. Les exercices de réhabilitation stimulent une série de réponses homéostatiques et d'adaptations du système corporel humain. Il est essentiel que le programme de réhabilitation intègre une charge optimale progressive pour faciliter la récupération fonctionnelle sans surcharger le muscle, le ligament, le tendon ou l'articulation atteints, compromettant ainsi potentiellement le processus de régénération. L'exercice en piscine, tel que l'entrainement cardiovasculaire et la pratique des mouvements, notamment l'entrainement balistique et pliométrique, peut permettre un volume d'entrainement plus élevé à des charges relatives plus faibles que s'il était effectué sur terre. Par conséquent, **la piscine peut être utilisée pour un exercice supplémentaire les jours de récupération**, et ce même pendant la phase finale et de retour au sport du programme de réhabilitation fonctionnelle après une blessure. Ce concept s'applique particulièrement à l'athlète d'élite ou au joueur professionnel après une blessure à long terme, comme après une reconstruction du ligament croisé antérieur (Buckthorpe, Pirotti, Villa 2019).

À retenir :

La récupération est le temps en dehors de l'entrainement où les améliorations de la capacité physiologique induites par l'entrainement vont réellement se mettre en place. L'intérêt d'utiliser des modalités de récupération est leur potentiel à accélérer ce processus, ce qui permet à l'athlète de s'entrainer en enchainant plus rapidement les séances, avec une meilleure qualité et/ou avec un volume ou une intensité plus élevés.

Il existe plusieurs techniques de récupération aquatique par immersion, définies par la température de l'eau : froide, chaude, tiède, thérapie de contraste. L'immersion en eau froide et la thérapie de contraste sont utilisées comme stratégies de récupération aiguë après l'exercice. La course en eau profonde semble participer efficacement à la récupération de la force musculaire des jambes et la diminution des courbatures.

Afin d'optimiser le programme d'entrainement ou de réhabilitation sans compromettre les processus de régénération, les exercices aquatiques peuvent être utilisés en complément, permettant un volume d'entrainement plus élevé, à des charges relatives plus faibles pour les structures anatomiques que si cet entrainement était effectué sur terre.

X. Retour au sport

Comme énoncé précédemment, le principal objectif lors de la réhabilitation d'une lésion chez un sportif, est de permettre à l'athlète de retrouver le niveau d'exercice et de compétition qu'il avait avant sa blessure, voire un niveau supérieur, et cela en un temps minimum, tout en respectant les contraintes de la cicatrisation (Li 2018 ; H. Dhillon, S. Dhillon, M S. Dhillon 2017).

Les sportifs soumettent leurs articulations à des charges et stresses importants. Dimitrakopoulou *et al.* (2023) s'intéressent par exemple à la hanche, qui subit des forces axiales ou en torsion selon le sport réalisé. Les sportifs sont ainsi plus à risque de développer des affections intra-articulaires de la hanche, qui peuvent mener à un handicap, altérer les performances athlétiques et les activités de tous les jours. Le conflit fémoro-acétabulaire est une cause de douleur au niveau de la hanche, souvent chez les individus jeunes et sportifs. Il peut être pris en charge avec succès par arthroscopie de la hanche si une approche non chirurgicale n'a pas fonctionné.
Suite à une arthroscopie de la hanche chez 88 athlètes souffrant d'un conflit fémoro-acétabulaire, deux programmes de réhabilitation sont comparés : un protocole standard sur terre, et un protocole d'hydrothérapie suivant le protocole standard en combinaison d'exercices aquatiques. Après l'opération, les athlètes doivent utiliser des béquilles, et le support du poids doit être partiel pendant deux à quatre semaines. Le programme standard de réhabilitation commence deux jours après chirurgie, et celui d'hydrothérapie deux semaines après cicatrisation de la plaie de chirurgie, avec une hauteur d'eau évoluant progressivement du niveau de la poitrine au niveau de la taille. Les deux programmes comprennent trois stades : le travail précoce de l'amplitude du mouvement articulaire et le contrôle de la douleur et de l'inflammation, puis du renforcement musculaire, et enfin le travail de l'équilibre et de la proprioception ainsi que des exercices spécifiques du sport de l'athlète. Les patients sont suivis à deux semaines, huit semaines, six mois, douze mois et annuellement. Les résultats montrent que le groupe avec hydrothérapie retrouve le niveau de performance qu'il avait avant la lésion au bout de 15 semaines environ, contre 22,3 semaines pour le protocole standard. L'incorporation d'exercices aquatiques dans la réhabilitation post-chirurgicale d'un conflit fémoro-acétabulaire accélère donc le retour au sport et aux performances avant blessure de l'athlète, du fait d'une diminution du temps de récupération (Dimitrakopoulou *et al.* 2023).

Pour la réhabilitation fonctionnelle d'athlètes souffrant d'instabilité chronique de la cheville, un programme terrestre et un programme aquatique sont comparés pendant six semaines. Les deux protocoles consistent en deux sessions d'une heure de rééducation deux fois par semaine, avec un bandage de la cheville. Les programmes comprennent des exercices aérobies, d'équilibre, de renforcement musculaire (avec de la course en eau profonde pour le groupe d'hydrothérapie par exemple), et fonctionnels. Les résultats montrent pour la capacité fonctionnelle de la cheville, représentée par le test de saut sur un seul membre, une amélioration significative immédiatement après (soit à six semaines) et trois mois après la mise en place du programme de réhabilitation, pour les deux groupes. Par conséquent, les athlètes souffrant d'instabilité chronique de la cheville peuvent suivre un protocole de réhabilitation combinant le bandage de la cheville et des exercices terrestres ou aquatiques sans différence, pour améliorer les performances fonctionnelles de la cheville de manière efficace et retourner à la compétition (Nualon, Piriyaprasarth, Yuktanandana 2013).

À retenir :
Les programmes de réhabilitation intégrant des exercices aquatiques sont aussi efficaces, si ce n'est plus, pour permettre le retour au sport des athlètes en un temps minimum.

XI. Application : Exemple d'un protocole de réhabilitation aquatique suite à une chirurgie de reconstruction du ligament croisé antérieur chez des athlètes

1. Généralités

Les lésions du ligament croisé antérieur (LCA) sont l'une des principales blessures liées aux activités sportives, avec une incidence de près de 32 000 victimes par an en France, environ 100 000 à 200 000 blessures par an aux États-Unis, et ce notamment chez les patients jeunes ou sportifs. Les lésions du ligament croisé antérieur sont assez inhabituelles dans la population générale mais peuvent survenir lors de la plupart des activités physiques et sportives, notamment dans les activités qui impliquent des contraintes de rotation des membres inférieurs comme le football américain, le football, le rugby, le handball, le basket-ball, le volley-ball, et surtout le ski alpin (Peultier-Celli *et al.* 2017 ; Wu *et al*. 2022 ; Ptasinski *et al.* 2022).

Le LCA appartient à une classe de ligaments dont la vascularisation est limitée, rendant ainsi plus difficile la réparation spontanée basée sur l'angiogenèse et prolongeant la guérison naturelle sans reconstruction chirurgicale (Singh, Borthwick, Qureshi 2021). La rupture de ce ligament peut donc entrainer des complications à court, moyen et long terme et un mauvais pronostic fonctionnel (Peultier-Celli *et al.* 2017). Le ligament croisé antérieur assure 85 % de la stabilité du genou, en évitant la translation antéro-postérieure du tibia par rapport au fémur, et limite de façon secondaire la rotation tibiale et la rotation en varus/valgus. En plus de sa fonction mécanique de maintien de la stabilité du genou, le LCA contient également des mécanorécepteurs qui influencent directement le contrôle neuromusculaire du genou. Un déficit du LCA peut provoquer une instabilité du genou et des troubles du contrôle postural, ce qui se manifeste notamment lors d'activités sportives impliquant le pivotement, le saut et l'atterrissage, ou lors d'activités de la vie quotidienne. Cette instabilité peut affecter d'autres structures du genou, conduisant à des lésions méniscales et cartilagineuses au niveau du fémur et du tibia, et à une arthrose précoce lors d'un suivi à long terme (Peultier-Celli *et al.* 2017 ; Pipino *et al.* 2023).

Diverses méthodes de traitement, comprenant des techniques conservatives non opératoires et des techniques opératoires – dont le choix est généralement fonction de l'âge du patient et de son niveau d'activité – ont été décrites pour la prise en charge des lésions du LCA, et se sont révélées plus ou moins efficaces pour ramener les athlètes à une activité sportive.

- La prise en charge non opératoire est généralement proposée chez les personnes souffrant de lésions isolées du LCA, ayant des activités fonctionnelles limitées et/ou étant d'âge moyen ou avancé (Ptasinski *et al.* 2022).
- En raison de la faible capacité de cicatrisation innée du LCA, une intervention chirurgicale en cas de rupture du LCA est le plus souvent indiquée, pour restaurer la stabilité du genou et permettre un retour à des niveaux d'activité proches de ceux avant la blessure (Wu *et al.* 2022). La prise en charge chirurgicale concerne, en général, les patients plus jeunes qui participent à des sports ou à des activités professionnelles de forte intensité, ou qui ressentent une instabilité du genou, et/ou ceux pour lequel le traitement non opératoire (environ 18 % des patients) n'a pas suffi. Parmi les techniques chirurgicales, il est décrit :
    - la reconstruction (ACLR), avec plusieurs options de greffe : notamment l'autogreffe du tendon patellaire, l'autogreffe des tendons des ischio-jambiers, l'autogreffe du tendon du quadriceps, les allogreffes, et les dispositifs synthétiques (Ptasinski *et al.* 2022 ; Wu *et al.* 2022).
    - la réparation, qui peut-être proposée lors de déchirures aiguës en partie proximale du LCA. Cette approche peut être bénéfique à la fois fonctionnellement et

structurellement car elle permet de conserver les structures vasculaires et proprioceptives (Wu *et al.* 2022).

La prise en charge opératoire par reconstruction est la technique la plus couramment utilisée chez les athlètes (Peultier-Celli *et al.* 2017 ; Wu *et al.* 2022). Malgré le succès de l'ACLR, il reste un taux élevé de récidives, de douleur au site opératoire, de performances sous-optimales lors du retour au sport (entre 44 et 81 % des athlètes de compétition retrouvent leur niveau préopératoire de jeu après une reconstruction du LCA) et de carrières sportives raccourcies (Wu *et al.* 2022).

Il est à noter que, bien que de nombreux athlètes se concentrent sur la prévention d'une récidive au niveau de leur genou reconstruit, le risque de déchirure du LCA controlatéral est en fait le double du risque de rupture du greffon au site d'ACLR et devrait donc être pris en compte lors de la rééducation postopératoire (Ptasinski *et al.* 2022).

2. Construction d'un programme de réhabilitation

Afin de concevoir efficacement un programme de réhabilitation aquatique adapté après une ACLR, il est important d'avoir en place un processus de récupération fonctionnelle bien structuré. Il n'existe pas de gold-standard en terme de réhabilitation du ligament croisé antérieur, mais une rééducation basée sur des critères spécifiques pour progresser d'un stade à l'autre, est considérée comme la meilleure pratique. Buckthorpe, Pirotti, et Villa (2019) proposent un processus de récupération fonctionnelle respectant une série de phases, décrites au début de cette partie.
De nombreux acteurs participent à la rééducation de l'athlète et doivent travailler en collaboration. Le programme de réhabilitation du sportif comprend des exercices en salle, en piscine et sur le terrain. La thérapie aquatique est un élément important du processus, et ne doit pas être considérée isolément. Il est essentiel de s'assurer que les bons exercices aquatiques sont entrepris au bon moment selon les stades de la réhabilitation et en parallèle avec les activités du programme de rééducation en salle ou sur le terrain. Il est nécessaire de prendre en compte l'activité spécifique en dehors de la piscine et les limitations fonctionnelles du sportif, pour prioriser l'activité au sein de la piscine. La figure ci-dessous (Figure 23) montre comment le programme de thérapie aquatique peut compléter le programme de réhabilitation terrestre, avec une discussion sur les concepts importants pour chaque étape. Même si ce programme aquatique peut être utilisé pour tous les patients avec ACLR, il est important de reconnaître que les étapes 2 à 4 sont un complément aux exercices de réhabilitation sur terre, et qu'un volume minimum de travail sur terre est donc nécessaire avant d'envisager l'ajout de thérapie aquatique.

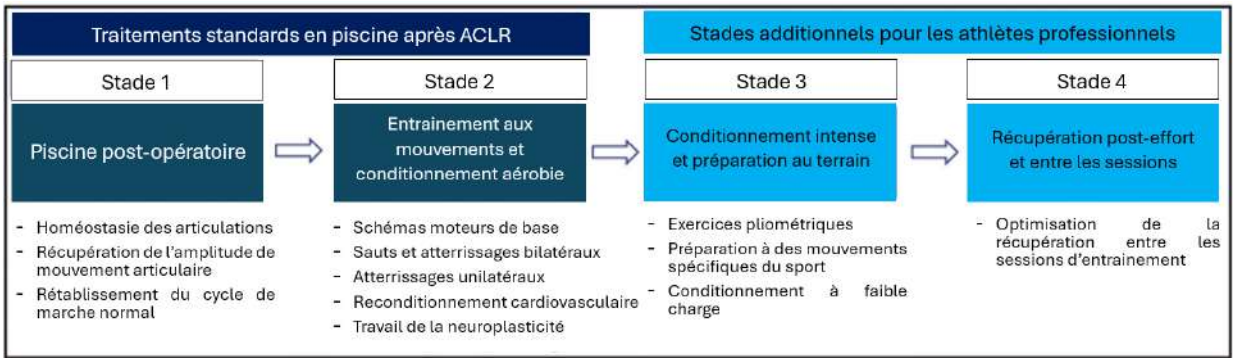


Figure 23 : Utilisation de la thérapie aquatique dans le processus de réhabilitation après ACLR, *d'après Buckthorpe, Pirotti, et Villa (2019).*
Deux stades standards initiaux sont appliqués à l'ensemble des patients au début de la réhabilitation. Deux autres stades peuvent ensuite être proposés aux athlètes d'élite pour optimiser la phase finale de la réhabilitation et le retour au sport.

Le tableau en Annexe 2 présente un programme général de réhabilitation d'un athlète suite à une ACLR, incorporant la thérapie aquatique, avec les exercices spécifiques et les critères d'entrée de chaque stade.

2.1. Stade 1 – Phase précoce de la réhabilitation

La phase précoce de la réhabilitation est axée sur la résolution de la douleur et de l'enflure, la récupération d'une amplitude suffisante du mouvement de l'articulation du genou (souvent limitée), la récupération des activités de la vie quotidienne, y compris la capacité à marcher sans béquilles, et la minimisation de l'atrophie musculaire.
La thérapie aquatique postopératoire précoce vise principalement à surmonter les effets de la chirurgie et à compléter l'activité sportive en salle.

La piscine postopératoire commence généralement environ deux semaines après l'ACLR, lorsque le patient peut entrer dans l'eau en toute sécurité. Les principales contre-indications à son utilisation à ce stade sont la cicatrisation des plaies et le risque d'infection. Les points de suture doivent donc être retirés et les cicatrices chirurgicales doivent être exemptes de signes de phlogose.

Les propriétés de l'eau, comme énoncé précédemment, permettent de limiter la douleur et l'enflure, ce qui facilite le développement d'une plus grande amplitude du mouvement actif et passif, que ce qui est permis sur terre. En effet, au cours du stade précoce de la réhabilitation, le patient peut ne pas être en mesure d'utiliser des appareils tels que le vélo stationnaire, en raison des limitations de l'amplitude du mouvement et de ce fait, le travail de l'amplitude du mouvement actif sur terre peut donc être difficile. Le patient peut généralement développer des schémas de démarche défectueux en raison notamment de la réticence à mettre en charge le genou. Marcher dans l'eau à une profondeur appropriée peut donc faciliter le rétablissement d'une démarche optimale et favoriser la confiance dans les mouvements.

Ainsi, les principales priorités à ce stade comprennent des exercices aquatiques tels que le vélo, la marche, le contrôle neuromusculaire de base et le travail de l'amplitude du mouvement passif et actif pour éviter les raideurs articulaires.

2.2. Stade 2 – Phase intermédiaire de la réhabilitation

La phase intermédiaire de la réhabilitation est axée sur la restauration des déséquilibres de force (jusqu'à 20 % du membre controlatéral), les schémas moteurs de base (par exemple, des exercices fonctionnels tels que les squats et la course) et le reconditionnement physique. De nombreux cliniciens arrêtent l'hydrothérapie à ce stade, sans se rendre compte de ses utilisations et avantages supplémentaires.

Après la résolution des facteurs post-chirurgicaux de base – douleur, gonflement, amplitude du mouvement articulaire et récupération du cycle de marche et des activités de la vie quotidienne – le patient peut progresser vers une rééducation légèrement plus intensive. Le patient peut désormais marcher sur terre et généralement commencer à faire du vélo stationnaire dans le gymnase. Cependant, pendant la majorité du stade intermédiaire, la mise en charge du membre opéré est toujours compromise et le patient ne peut donc pas entreprendre de nombreuses activités de type fonctionnel de manière optimale ou en toute sécurité sur terre (par exemple : squats sur une jambe ou sauter et atterrir). Les propriétés de l'eau peuvent permettre d'effectuer des exercices fonctionnels plus tôt que ce qui est possible sur terre, favorisant ainsi le réentrainement précoce des schémas moteurs. Par exemple, la course dans l'eau peut être utilisée pour soutenir l'entrainement physique cardiovasculaire et la restauration ou développement de l'endurance aérobie, mais également pour soutenir la rééducation de la démarche pendant la course, en limitant les impacts associés à la course sur terre. Cela est vrai pour d'autres exercices fonctionnels importants tels que les squats et les fentes,

ainsi que le contrôle de l'atterrissage avec une charge élevée (exercices de saut et d'atterrissage). Ceci est très bénéfique psychologiquement pour l'athlète car il peut commencer un « entrainement basé sur la performance » dans la piscine.

Par ailleurs, l'introduction d'exercices de neuroplasticité, capables d'imiter les mouvements spécifiques au sport (sans mettre en charge l'articulation du genou) peut commencer à ce stade. Ceux-ci incluent des exercices tels que contrôler un ballon de football avec sa tête tout en étant assis sur un dispositif flottant (par exemple un anneau en caoutchouc) pour stimuler le contrôle postural.

Compte tenu de la complexité des exercices du stade intermédiaire, celui-ci est généralement divisé en deux sous-phases :

- Étape 2.1 : L'athlète entreprend des exercices d'endurance musculaire de base dans le gymnase, ainsi que de renforcement dans une position sans charge (par exemple des exercices sur le lit) en raison de la fragilité persistante du genou vis-à-vis de la mise en charge. Au cours de cette étape, il est bénéfique d'incorporer un entrainement correctif pour les mouvements, en utilisant des exercices de base (par exemple les fentes, les squats, etc.) dans la piscine, ainsi que la course en eau profonde.
- Étape 2.2 : À mesure de la progression de l'athlète, l'entrainement peut évoluer vers des charges plus élevées dans le gymnase (par exemple, passer à un entrainement en résistance à charge modérée pour restaurer l'hypertrophie et la force musculaires), ainsi que des exercices de mise en charge sur le terrain, y compris l'introduction de la course sur tapis roulant. De sorte que lorsque les athlètes sont capables d'accomplir ces tâches sur terre, il est moins nécessaire de recourir au milieu aquatique. Néanmoins, les patients peuvent pratiquer dans l'eau des exercices d'impact à charge plus élevée, tels que des exercices d'atterrissage sur deux et sur une jambe, des exercices de sauts bilatéraux pour soutenir le développement de la puissance du bas du corps et de la course sur tapis roulant à la profondeur appropriée. Ces mouvements peuvent être introduits une fois le renforcement musculaire du patient suffisant, et le niveau de contrôle neuromusculaire souhaité atteint. Il est important de noter que l'athlète ne doit pas effectuer de pliométrie unilatérale à ce stade, car elle implique des charges potentiellement dangereuses pour l'articulation du genou, même si elle est effectuée dans l'eau (forces de réaction au sol de 2 à 4 fois la masse corporelle).

2.3. Stade 3 – Phase finale de la réhabilitation

La phase finale de la réhabilitation est axée sur l'optimisation des performances neuromusculaires et du mouvement.
Ce stade est un programme intense au cours duquel les mouvements spécifiques au sport sur terre sont simulés, de sorte à préparer le début de l'entrainement sur le terrain. L'athlète entreprend des mouvements à charge élevée sur terre, tels que des exercices de course, de décélération, de saut et d'atterrissage, avant de pouvoir effectuer des exercices de pliométrie unilatérale et de coordination multidirectionnelle sur le terrain.
En tant que tel, les avantages de la piscine sont moins évidents, car la majorité des activités peuvent être réalisées sur terre. La thérapie aquatique est donc moins essentielle à cette étape que lors des deux précédentes, et n'est généralement pas requise chez les athlètes non professionnels. Cependant, le milieu aquatique peut être utilisée comme complément utile au programme, permettant de réaliser en piscine certains des exercices qui ne peuvent pas être effectués initialement sur terre. Par exemple, au début du stade final, le patient peut courir sur terre et commencer des exercices progressifs de saut et d'atterrissage. Cependant, la pliométrie unilatérale est généralement effectuée à la fin de ce stade, minimisant ainsi les possibilités de développer une puissance et un contrôle neuromusculaire explosifs, associés à des mouvements spécifiques au sport. Ainsi, pendant la période initiale de l'étape, le patient

peut effectuer certains des exercices à charge élevée sur terre (par exemple, pliométrie bilatérale et exercices d'atterrissage unilatéral) et le reste en piscine (par exemple, pliométrie unilatérale). La pratique de ces exercices pliométriques unilatéraux en piscine peut favoriser l'apprentissage de la technique qui pourra ensuite être transposée sur terre. Enfin, le conditionnement athlétique sur terre peut être soutenu en offrant la possibilité d'effectuer une partie du travail dans la piscine avec des charges plus faibles.

2.4. Stade 4 – Retour au sport

La phase de retour au sport inclut la poursuite de la réhabilitation sur le terrain, un retour à l'entrainement spécifique au sport puis un retour à la compétition.
Au cours de cette dernière étape, les athlètes entreprennent un entrainement spécifique au sport sur le terrain, mais toujours de manière encadrée, et continuent de travailler au reconditionnement physique en gymnase (par exemple, entrainement de force et de puissance, contrôle neuromusculaire). La gestion de la charge de travail de l'athlète est particulièrement importante, d'autant que généralement la charge d'entrainement augmente rapidement dans cette phase. Il est donc important d'optimiser la récupération entre les séances, comme c'est le cas lors de l'entrainement standard des athlètes. La piscine peut ainsi être utilisée comme outil de récupération, permettant un reconditionnement qui limite la mise en charge des articulations et une récupération accélérée entre les séances de réhabilitation. Ceci est particulièrement pertinent après des journées d'entrainement intenses sur le terrain et/ou au gymnase, conçues pour développer la tolérance de l'athlète aux exigences accrues de l'entrainement.

XII. Application de la thérapie aquatique pour la prise en charge de l'ostéoarthrose

1. Généralités

Toutes les articulations du corps peuvent développer de l'ostéoarthrose, mais les **articulations du genou et de la hanche** sont les plus fréquemment touchées chez l'Homme. Les facteurs de risque de développement d'ostéoarthrose sont bien connus et incluent l'âge, le sexe, l'obésité, les lésions articulaires et les **charges biomécaniques anormales sur les articulations** (Gouttebarge *et al.* 2015). Le rôle du sport et de l'exercice dans le développement de l'ostéoarthrose fait encore l'objet de débats. Plusieurs études ont examiné le rôle des sports de compétition et des activités physiques dans la pathogenèse de l'ostéoarthrose, sans parvenir à un consensus général. Chez les athlètes d'élite, une interaction complexe de facteurs biologiques, mécaniques et biochimiques, en lien avec une **surcharge articulaire, compliquée davantage par des blessures traumatiques antérieures qui accélèrent les processus pathologiques intra-articulaires**, participeraient au développement de l'ostéoarthrose avec une grande variabilité entre les différents types de sports (Gouttebarge *et al.* 2015 ; Migliorini *et al.* 2022). Selon les principales conclusions de la revue systématique menée par Migliorini *et al.* (2022), **74 % des athlètes inclus dans les études sélectionnées souffraient d'ostéoarthrose prématurée par rapport à un groupe témoin sédentaire**. Parmi eux, 41 % étaient impliqués dans des sports d'équipe tels que le football (24 %), le handball (11 %), le hockey sur glace (11 %) et le rugby (0,3 %). La **corrélation la plus forte a été décrite entre l'ostéoarthrose du genou et les lésions du ligament croisé antérieur et des ménisques**. Au moins 51 % des femmes et 41 % des hommes présentaient une arthrose du genou de grade 2 selon la classification de Kellgren et Lawrence, 12 ans après une rupture du ligament croisé antérieur. De plus, il a été montré que l'association de cette blessure avec une déchirure du ménisque augmente davantage le risque d'arthrose du genou[71,72] (Migliorini *et al.* 2022).

L'ostéoarthrose est une affection chronique dégénérative caractérisée notamment par de la douleur articulaire, une limitation des mouvements, des degrés variables d'inflammation locale, et des dysfonctionnements musculosquelettiques subcliniques. Notamment, les personnes atteintes d'ostéoarthrose de la hanche ou du genou présentent davantage de **troubles de l'équilibre et un déficit de contrôle postural par rapport à des personnes saines du même âge**[73,74]. Lors d'électromyographie du muscle quadriceps de personnes souffrant d'ostéoarthrose du genou, une **diminution de la force musculaire et une augmentation du délai d'activation du muscle** sont observées[75]. Cette **amplitude et ce délai d'activation anormaux du muscle quadriceps peuvent contribuer directement aux troubles de l'équilibre et de maintien de la stabilité posturale**[76]. Il n'existe pas de traitement curatif. La prise en charge vise à limiter les symptômes ainsi que la progression de l'affection. Le but des exercices thérapeutiques pour l'arthrose du genou est l'amélioration du contrôle sensori-moteur et l'obtention d'une stabilité fonctionnelle compensatrice. Cela passe par le renforcement musculaire, l'amélioration de l'équilibre, de la coordination des mouvements, et de la mobilité articulaire (King *et al.* 2013b ; Bartels *et al.* 2016).

[71] Roos EM. Joint injury causes knee osteoarthritis in young adults. Curr Opin Rheumatol. 2005; 17:195–200.
[72] Harris K, Driban JB, Sitler MR, et al. Five-year clinical outcomes of a randomized trial of anterior cruciate ligament treatment strategies: an evidence-based practice paper. J Athl Train. 2015 ;50 :110–112.
[73] Messier S, Royer T, Craven T, et al. Long-term exercise and its effect on balance in older, osteoarthritic adults: results from the fitness, arthritis, and seniors trial (FAST). J Am Geriatr Soc 2000; 48:131–138.
[74] Rasch A, Dalén N, Berg H. Muscle strength, gait, and balance in 20 patients with hip osteoarthritis followed 2 years after THA. Acta Orthop 2010;81:183–188.
[75] Lyytinen T, Liikavainio T, Bragge T, et al. Postural control and thigh muscle activity in men with knee osteoarthritis. J Electromyogr Kinesiol 2010; 20:1066–1074.
[76] Hurley MV. The effects of joint damage on muscle function, proprioception and rehabilitation. Man Ther 1997; 2:11–17.

2. Intérêts du milieu aquatique

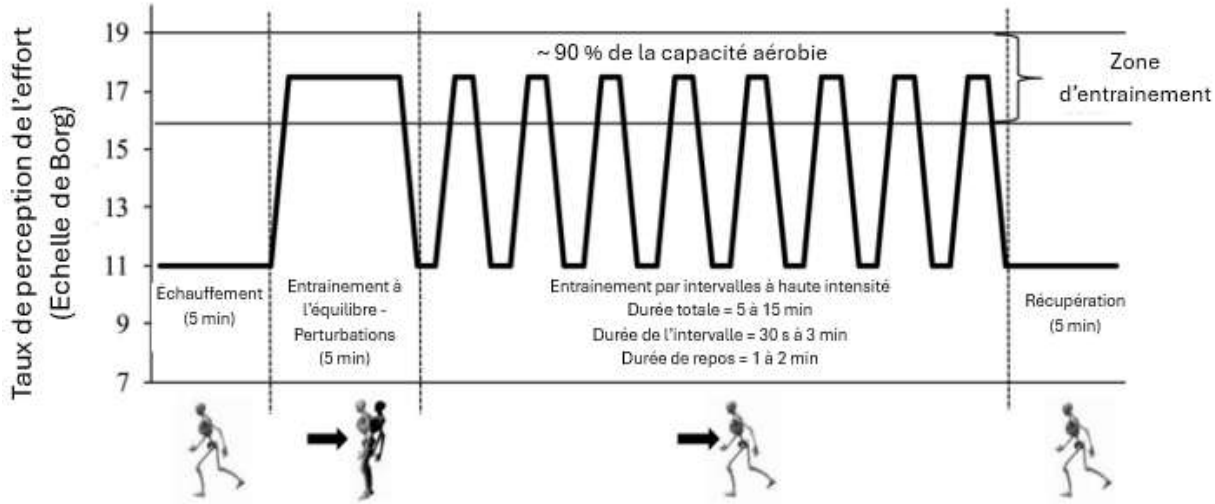
Lors de la gestion de patients avec arthrose de la hanche ou du genou, certains ne sont pas capables de réaliser les exercices thérapeutiques sur terre, du fait de la douleur associée au poids du corps et d'une diminution de l'équilibre. Il est alors conseillé de commencer par des exercices dans un environnement aquatique, permettant de **réduire la mise en charge des articulations** et donc la **douleur**, et offrant un **milieu plus sécuritaire** pour des patients sujets à des troubles de l'équilibre.

Les personnes souffrant d'ostéoarthrose du genou présentent régulièrement une **inhibition du groupe musculaire quadriceps** (AMI) et une augmentation correspondante de l'activité du groupe musculaire antagoniste des ischio-jambiers. L'activation accrue des muscles ischio-jambiers est un mécanisme compensatoire normal qui contribue à stabiliser le genou et à atténuer les forces de charge articulaire lors de la locomotion[77]. Dans le milieu aquatique, la résistance accrue au mouvement des membres contribue à augmenter l'activation des muscles agonistes et réduire la co-contraction des muscles antagonistes appariés, comme en témoignent les analyses électromyographiques effectuées chez l'Homme[78], ce qui améliore le contrôle neuromusculaire et la coordination de l'activité musculaire. Ces mécanismes sont des contributeurs importants à la restauration de la fonction musculaire et du contrôle moteur dans la rééducation de diverses lésions musculosquelettiques (Remaud, Guével, Cornu 2007 ; King 2016).
Après six semaines d'exercices aquatiques chez un groupe de patients souffrant d'ostéoarthrose du genou, une **augmentation significative de la force des muscles fléchisseurs et extenseurs du genou, de la puissance des fléchisseurs et de la résistance des extenseurs** est rapportée par rapport à un groupe contrôle sans exercices (Dias *et al.* 2017). Le renforcement des muscles du genou peut permettre une meilleure absorption des chocs et stabilisation de l'articulation, aidant ainsi à la préservation du genou atteint. Dans leur méta-analyse, Ma *et al.* (2022) ne rapportent qu'un renforcement des muscles extenseurs du genou lors d'exercices aquatiques.

L'efficacité de la prise en charge de patients avec **arthrose de la hanche ou du genou via six semaines d'exercices sur un tapis immergé** est étudiée par Bressel *et al.* (2014). Le programme comprend trois sessions par semaine et inclut des exercices d'équilibre puis de la marche ou course sur tapis immergé par intervalles à haute intensité (Figure 24). Des jets d'eau sont utilisés comme outil de perturbation de l'équilibre et de renforcement de l'intensité et de la puissance de l'entrainement. L'eau est à hauteur du processus xiphoïde et à température de 30 °C. Les résultats de l'étude montrent qu'après la thérapie aquatique, le **niveau de douleur** selon le questionnaire *Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score* (KOOS) **diminue significativement** et atteint presque le niveau donné pour un individu sain, ce qui est confirmé par l'échelle visuelle analogique de douleur. Grâce à une plateforme de posturographie *(SMART EquiTest system®)*, deux tests sont réalisés : le test d'organisation sensorielle, pour lequel le patient doit garder l'équilibre alors que les systèmes visuel, vestibulaire ou proprioceptif sont stimulés ou restreints, et le test de contrôle moteur pour lequel le patient doit garder l'équilibre en réponse à des mouvements inattendus de la plateforme. Ces tests témoignent d'une **amélioration significative de l'équilibre et du contrôle postural** à l'issu des six semaines, notamment la réponse du système moteur à une perturbation soudaine. La **fonction et la mobilité**, évaluées par des tests de relevé à partir d'une position assise, de fente, et de marche sur dix mètres, sont également significativement améliorées. Les mécanismes associés à la diminution de la douleur et l'amélioration de l'équilibre sont probablement multiples dans cette étude, mais peuvent être **reliés pour une part au renforcement musculaire des membres inférieurs.**

[77] *Dixon J, Howe T. Quadriceps force generation in patients with osteoarthritis of the knee and asymptomatic participants during patellar tendon reflex reactions: an exploratory cross-sectional study. BMC Musculoskelet Disord 2005; 6:1–6.*
[78] *Poyhonen T, Keskinen K, Kyrolainen H, et al. Neuromuscular function during therapeutic knee exercise underwater and on dry land. Arch Phys Med Rehabil 2001; 82:1446–52.*

De la même façon, après un programme de **quatre semaines de tapis immergé** permettant le travail de l'équilibre et de l'endurance chez des patients avec **arthrose du genou**, Maruszewska *et al.* (2020) rapportent une **diminution de la douleur, et une amélioration de l'amplitude du mouvement articulaire, de l'équilibre ainsi que des capacités fonctionnelles** (évaluées par l'indice algo-fonctionnel de Lequesne (Faucher *et al.* 2003)).



<u>Figure 24</u> : Étapes d'une session d'exercice sur tapis immergé pour la réhabilitation de patients avec arthrose de la hanche ou du genou*, d'après Bressel et al. (2014).*
La session inclut une phase d'échauffement, une phase d'entrainement à l'équilibre par perturbation de celui-ci avec des jets d'eau appliqués dans différentes directions (vers l'abdomen, sur le côté, dans le bas du dos, et sur le côté), une phase d'entrainement par intervalles à haute intensité (avec un jet dirigé horizontalement en direction de l'abdomen), et une phase de récupération.

Plusieurs essais cliniques contrôlés randomisés permettent d'évaluer les **effets des exercices aquatiques de tous types**, incluant le travail de l'amplitude du mouvement articulaire, le renforcement musculaire, et le travail aérobie, **chez les patients atteints d'arthrose du genou et/ou de la hanche par comparaison à une absence d'intervention**. La durée moyenne des programmes est de **huit à douze semaines**. Ils concluent, avec une preuve de qualité moyenne, que les exercices aquatiques peuvent avoir un **faible effet cliniquement significatif sur le court-terme, c'est-à-dire immédiatement après la fin du programme de traitement, sur la douleur, les handicaps liés à la fonction physique et la qualité de vie rapportée par les patients** atteints d'arthrose du genou et de la hanche. Aucun effet défavorable n'est rapporté en relation avec les exercices aquatiques. Des **améliorations des tests fonctionnels et de la force des muscles extenseurs du genou** sont également notées. Par ailleurs, il semble possible d'atteindre le même degré d'amélioration de la capacité aérobie et de la force musculaire avec les exercices aquatiques qu'avec les exercices sur terre (Bartels *et al*. 2016 ; Duan *et al.* 2022).

<u>À retenir :</u>
Les recherches sur les exercices aquatiques pour la prise en charge de l'arthrose des membres inférieurs suggèrent des bénéfices sur le court terme pour la réduction des symptômes de l'arthrose, incluant le soulagement de la douleur, la réduction de la rigidité articulaire, l'amélioration de la fonction physique, et l'amélioration des capacités sportives, sans preuve de persistance sur le long terme. Par ailleurs, l'amélioration de la force et de la fonction des muscles quadriceps et ischio-jambiers associée aux exercices aquatiques contribue à l'amélioration de la proprioception et du contrôle moteur ainsi qu'à la réduction du balancement postural anormal caractérisant les adultes atteints d'ostéoarthrose des membres inférieurs.

Conclusion partielle

La thérapie aquatique a beaucoup été étudiée pour la réhabilitation de l'athlète suite à une chirurgie de reconstruction de ligament croisé antérieur. Les propriétés physiques de l'eau fournissent un environnement unique et sécuritaire pour la réhabilitation des sportifs souffrant d'atteinte musculosquelettique des membres inférieurs, en agissant à la fois sur la réduction de la douleur et de l'œdème, l'amélioration de l'amplitude du mouvement articulaire et de la proprioception, la promotion de schémas moteurs normaux, le maintien et le développement de la force musculaire des membres inférieurs et du conditionnement cardiovasculaire, ainsi que la diminution de l'incidence de lésions musculosquelettiques secondaires. Le principal avantage de la thérapie aquatique dans le processus de réhabilitation fonctionnelle est l'introduction possible plus précoce que sur terre, d'exercices ciblant le développement ou l'entretien des systèmes neuromusculaires et cardiovasculaires, avec un faible risque de blessure. Le processus de récupération est ainsi potentiellement accéléré et le temps de retour en compétition réduit.

Les humains atteints d'ostéoarthrose des membres inférieurs et réhabilités avec des exercices aquatiques montrent une augmentation significative de mise en charge des membres, une amélioration de l'amplitude articulaire et une réduction significative des déficits d'équilibre. Les améliorations de la force musculaire résultant de la pratique d'exercices aquatiques contribuent à l'amélioration significative des déficits proprioceptifs, du contrôle moteur déficient et des caractéristiques locomotrices anormales généralement observées chez les adultes atteints d'arthrose.

Finalement, la thérapie aquatique trouve son application différemment pour chacun des stades du programme de réhabilitation d'un athlète. Il faut noter l'importance de concevoir des exercices aquatiques spécifiques pour améliorer une fonction particulière et non pas des exercices aquatiques de manière générale, et de toujours incorporer les exercices aquatiques à un programme de réhabilitation multimodale.

Chapitre 4 – Les tapis immergés pour la réhabilitation de l'athlète équin

La disponibilité en différents équipements permettant l'exercice ou le soin des chevaux dans l'eau – comme les piscines, tapis immergés, marcheurs aquatiques, spas d'eau salée ou douce – a augmenté ces dernières années dans le monde, du fait d'une popularité croissante. Ils sont utilisés à la fois pour l'entrainement et la réhabilitation. Cependant, il existe encore peu d'études qui prouvent des bénéfices de ces exercices chez les équidés (King 2016 ; Saitua *et al*. 2020).
Pour la réalisation d'exercices aquatiques, il faut faire la distinction entre les piscines où la flottabilité est complète, et les tapis immergés et marcheurs aquatiques où il y a semi-flottabilité. Les adaptations physiologiques et biomécaniques à ces différents types d'exercices sont différentes.

Les tapis immergés se retrouvent désormais dans les centres de recherche, de rééducation, mais également de plus en plus dans des centres d'entrainement privés. Ils présentent les avantages d'être plus faciles et moins onéreux d'installation et d'entretien qu'une piscine, tout en offrant la possibilité d'un exercice contrôlé en termes de vitesse, intensité et durée (Nankervis, Launder, Murray 2017). Cependant, des inquiétudes concernant le développement ou l'exacerbation de lésions lors d'exercices sur tapis immergé, et la faible connaissance sur leur utilisation optimale, sont soulevées par les professionnels équins. Tranquille *et al*. (2018) ont réalisé une enquête sur l'utilisation des tapis immergés dans le monde : ils rapportent une proportion majoritaire pour l'entrainement des chevaux (60 %), suivie par la réhabilitation (40 %). Les caractéristiques des tapis immergés seront davantage développées dans les parties qui suivent.

Figure 25 : Photographie d'un tapis immergé, *source : ecb Aqua Treadmill.*

Figure 26 : Photographie d'un tapis immergé, *source : ecb Aqua Treadmill.*

Figure 27 : Photographie d'un tapis immergé, *source : ecb Aqua Treadmill.*

Les piscines peuvent se présenter sous forme linéaire, circulaire ou elliptique, avec des rampes d'accès et de sortie pour les chevaux. Afin d'assurer une flottabilité complète, et la nage, une profondeur minimale de 3,7 mètres est nécessaire. Les piscines linéaires diminuent le stress cardiorespiratoire, en permettant une récupération du cheval lors de la marche entre la sortie et le point d'entrée. Par opposition, la nage continue dans les piscines circulaires n'autorise pas de récupération avant la fin de l'exercice. Les chevaux ne sont pas naturellement faits pour la nage, et utilisent souvent leurs membres thoraciques pour maintenir l'équilibre et leurs membres postérieurs pour la propulsion. La nature explosive de la propulsion par les postérieurs induit une forte augmentation de l'amplitude du mouvement des articulations de la hanche, du grasset et du jarret. Les chevaux adoptent une posture en extension cervicale, thoraco-lombaire et pelvienne (King 2016 ; Muñoz *et al.* 2019). Parmi les recommandations, la nage semble bénéfique lorsque sont indiqués les mouvements suivants : une

augmentation de l'amplitude du mouvement des tarses et grassets, et une diminution de l'extension des boulets postérieurs, ou bien une amplitude marquée du mouvement des coudes associée à une extension modérée des carpes et boulets antérieurs (Santosuosso *et al.* 2021 ; 2022). Il faut évaluer avec prudence l'intérêt de la nage lors de lésions thoraco-lombaire, sacro-iliaque, de la hanche, du grasset ou du tarse (King 2016 ; Muñoz *et al.* 2019).
Lors de nage à différentes intensités chez cinq chevaux non entrainés, il a été décrit des fréquences cardiaques entre 150 et 200 battements par minute, une concentration sanguine en lactates allant jusqu'à 10 mmol/L, et une consommation en oxygène entre 25 et 112 mL/kg/min (Thomas *et al.* 1980). Plus récemment, Leguillette *et al*. (2022) rapportent, pour un exercice de natation chez cinq pur-sang arabes en condition, des fréquences cardiaques entre 148 et 182 battements par minute, une concentration sanguine en lactates entre 0,9 et 2 mmol/L, et une consommation en oxygène entre 26,7 et 47,5 mL/kg/min. La nage permet donc de générer un exercice d'intensité submaximale chez les chevaux, principalement aérobie.

Figure 28 : Photographie d'une piscine circulaire*, image libre de droits.*

Les marcheurs aquatiques sont des marcheurs mécaniques installés dans une piscine circulaire contenant une profondeur d'eau constante. Le diamètre du marcheur aquatique détermine le nombre de chevaux qui peuvent être exercés simultanément ; la plupart des systèmes permettent d'exercer six à huit chevaux à la fois. Les chevaux sont séparés les uns des autres par des cloisons, créant un espace individuel pour chaque cheval. La profondeur de l'eau dépend des caractéristiques du marcheur ; certains ne permettent qu'une immersion peu profonde, avec de l'eau maintenue au niveau de l'articulation du boulet, tandis que d'autres permettent une immersion au niveau de l'articulation du grasset. La vitesse du système est contrôlée ; cependant, contrairement aux tapis immergés, le cheval peut ne pas marcher à la vitesse constante définie par l'unité. En effet, certains chevaux ralentissent puis accélèrent lorsque la cloison les approche par l'arrière, pour ralentir à nouveau une fois qu'ils ont

rattrapé la cloison devant eux. Tout comme dans les tapis immergés, il est possible de faire varier la température de l'eau et la concentration en soluté au sein des marcheurs aquatiques (King 2016).

Figure 29 : Photographie d'un marcheur aquatique, *source : Equine Health Centre Seawalker.*

Figure 30 : Photographie d'un marcheur aquatique, *source : Equine Health Centre Seawalker.*

I. Caractéristiques techniques, fonctionnement, et entretien des principaux tapis immergés disponibles actuellement chez les équidés

Plusieurs concepteurs de tapis immergés équins sont présents actuellement sur le marché. Au niveau européen et international, il s'agit principalement par exemple de : *AquaPacer by Hudson, Horse-Trainer, Aqua Equine Treadmill, FMBs Therapy Systems, AquaIcelander, HorseGym 2000, HydroHorse, Hippocenter, Physiotech, ECB Aquatreadmill,* et *Sascotec*.

Les tapis immergés sont définis par :

- Leurs caractéristiques techniques : vitesse du tapis, hauteur d'eau maximale, température de l'eau, les dimensions, la position (hors sol ou sous le sol), la matière de construction, la présence ou non de fenêtres transparentes qui permettent de surveiller le mouvement et la posture du cheval, la conception, l'énergie nécessaire au fonctionnement.
- La présence d'options éventuelles : eau salée, refroidissement, spa, jets d'eau, balance intégrée, suivi de la fréquence cardiaque, etc.
- Le système de gestion de l'eau : source (eau courante, eau de pluie, puits), stockage (cuves), distance par rapport au tapis, gestion lors de l'hiver, systèmes de filtration de l'eau permettant ou non son recyclage, temps de remplissage et de drainage.
- Services fournis par le fabricant : installation du matériel, formation à l'utilisation et à l'entretien, service de maintenance, garanties.

Un tableau détaillé de ces différentes caractéristiques des tapis immergés pour les concepteurs mentionnés ci-dessus est donné en Annexe 3, avec un récapitulatif dans le Tableau XIV ci-dessous. Il a été construit grâce aux informations recueillies sur les sites Internet correspondant. En complément, un questionnaire portant sur les données manquantes a été envoyé à chacun de ces concepteurs. Des réponses, partielles, ont uniquement pu être obtenues de la part de *Aqua Equine Treadmill, HydroHorse Equine Treadmill* et *ECB Aquatreadmill*.

Une perspective générale peut être donnée par Tranquille *et al.* (2018). Ils ont réalisé une enquête sur l'utilisation des tapis immergés dans le monde, et ont ainsi envoyé un premier questionnaire à 120 centres à l'international, dont seulement 41 ont répondu (34 %).

- Il en ressort que les trois tapis majoritairement utilisés sont le *FMBs Activo-Med* (40 %), *Formax Aqua Icelander* (11 %), et *HorseGym Aquatrainer* (11 %). Néanmoins, les résultats présentent un biais, la majorité des réponses provenant de centres en Angleterre.
- La conception des tapis peut potentiellement affecter la manière dont les chevaux se déplacent. Environ 70 % des répondants indiquent tenir le cheval de chaque côté du tapis, ce qui signifie en théorie que le cheval marchera droit sur le tapis. En revanche, lorsque le cheval n'est tenu que d'un côté, il aura davantage tendance à se courber vers celui-ci. Dans une étude non publiée, Nankervis *et al.* ont montré que l'intensité et la durée de l'activité électromyographique du muscle brachiocéphalique peut augmenter du côté adjacent à celui où le cheval est tenu. Il faut tenir compte de cette particularité si l'objectif est d'améliorer la symétrie et la rectitude du cheval.
- Vingt-et-un centres renouvellent l'eau du tapis après cinq sessions ou plus, cinq centres renouvellent l'eau après chaque session, et trois centres ne semblent jamais changer l'eau. Pour les centres recyclant l'eau, des systèmes de filtration sont utilisés : filtres au sable ou à charbon (71 %), unités de radiation aux ultraviolets (52 %), ou un purificateur d'eau (5 %). Les filtres au sable permettent le retrait des particules solides en suspension dans l'eau, de même que les filtres à charbon par liaison chimique des impuretés présentes dans l'eau avec les particules de carbone. Les radiations UV ont pour objectif d'éliminer les bactéries et virus

présents dans l'eau (jusqu'à 99,99 %), mais n'ont pas d'action sur les particules en suspension. L'association d'un filtre au sable ou au charbon et des radiations UV est rapportée de manière anecdotique comme le moyen optimal de recycler l'eau.

Certains centres traitent également l'eau chimiquement avec de l'hypochlorite de sodium (75 %) ou du chlore (50 %). L'hypochlorite de sodium est un antibactérien utilisé fréquemment comme désinfectant pour les équipements de santé humaine, et le chlore est utilisé comme bactéricide dans les piscines et pour contrôler la propagation des maladies. Le traitement chimique de l'eau semble donc présenter un intérêt pour prévenir la transmission de maladies entre les chevaux utilisant les tapis immergés, et également la propagation ou l'exacerbation d'affections cutanées et fongiques, qui sont fréquemment rapportées comme effets secondaires à l'utilisation des tapis immergés.

De façon générale, tous les centres disposent de procédures pour limiter la contamination de l'eau : par lavage des chevaux avant l'exercice sur tapis, la mise en place de harnais pour la collection des crottins, et la récupération des crottins au cours de la session. Cela permet de réduire la quantité de grosses particules dans l'eau qui pourraient bloquer les unités de filtration.

- L'eau douce est principalement utilisée, mais cinq centres rapportent l'utilisation d'eau salée.
- Quatorze centres indiquent un contrôle de la température de l'eau (en moyenne 13 °C avec une variation entre 4 et 24 °C). Les raisons pour ce contrôle sont la lésion du cheval, un protocole standardisé, une expérience passée, ou pour prévenir la croissance bactérienne. Les températures de travail du cheval sur tapis immergé sont généralement rapportées entre 13 et 22 °C (Tranquille et al. 2017). La différence avec les chiffres de l'enquête peut s'expliquer par les variations dans le lieu et la manière de stockage de l'eau, et la période de l'année à laquelle les études ont été menées.

<u>Tableau XIV</u> : Caractéristiques générales des principaux tapis immergés présents sur le marché international actuellement, *source : Delacharlerie Aurore.*

	AQUAPACER	HORSE-TRAINER	AQUA EQUINE TREADMILL	FMBs	Aqualcelander	HORSE GYM 2000	HydroHorse	HIPPOCENTER	PHYSIC-TECH	ecb	SASCOTEC
Température	Ambiante jusqu'à 40°C	NR	Refroidissement possible jusqu'à 4°C	NR	NR	NR	NR	Refroidissement jusqu'à 5 à 8°C	NR	Refroidissement jusqu'à 7°C	Refroidissement jusqu'à 4°C (optionnel)
Hauteur d'eau maximale	1,2 m	Épaule	NR	NR	1,2 m	1 à 1,2 m (selon les modèles)	1,5 m	1,2 m	1,6 m	1,04 m	1,35 m
Vitesse	1,6 à 8 km/h	0 à 11 km/h	NR	NR	NR	Jusqu'à 10 à 18 km/h selon les modèles	Jusqu'à 18 km/h	Jusqu'à 11 km/h	Jusqu'à 45 km/h	Jusqu'à 12 km/h	Jusqu'à 10 km/h
Inclinaison	0	0 à 20 %	0	NR	0 à 10 %	NR	NR	0 à 10 %	0 à 15 %	0 à 12 %	-1 à 12 % (optionnel)
Hors sol ou creusé ?	Hors sol	Hors sol	Hors sol	Hors sol ou creusé	Hors sol	Hors sol	Hors sol ou creusé (selon modèle)	Hors sol	Hors sol	Hors sol	Hors sol
Système de refroidissement de l'eau et d'eau salée ?	✓ Optionnel (AquaPacer Plus)	✗	✓	✓ Optionnel	✓ Optionnel	✓ Optionnel	NR	✓ Optionnel	✓ Optionnel	✓ Optionnel	✓ Optionnel
Volume des cuves de stockage	3 800 à 3 900 L	NR	8 300 L	NR	NR	4 000 L	9 500 L	NR	12 000 L	2 x 3 000 L	Entre 5 000 et 7 000 L (variable selon options)
Système de filtration	- Pompes de drainage - Traitement de l'eau à l'ozone - Système de filtration à cartouches	NR	Double filtration	NR	- Deux filtres en acier inoxydable au niveau des pompes - Un filtre à sable - Lampe à ultra-violets C	Autonettoyage, filtres	Deux à trois filtres à sable (selon modèle)	- Un filtre à sable pour les grosses particules - Un filtre à charbon pour les plus petites particules - Une lampe à ultra-violets permettant la destruction des germes et bactéries	Système de filtration intégré (sans détail) et filtre à ultra-violets optionnel	- Filtre à tambour intégré (avec ultra-violets) - Filtre à cartouche - Filtre à ultra-violets séparé - Utilisation possible de harnais pour la récupération des crottins	- Filtre kaki ou système de filtration avec un filtre multicouche vortex permettant une filtration fine des particules - Filtre à ultra-violets pour l'élimination des germes (selon options)
Recyclage de l'eau	✓	NR	✓	NR	✓	✓	✓	✓	✓	✓ Jusqu'à 6 semaines	✗ ou ✓ selon options
Prise en charge de l'installation	Partielle	NR	✓	NR	NR	NR	NR	✓	NR	✓	✓
Accompagnement à l'utilisation	✓	NR	✓	✓	NR	NR	NR	✓	NR	✓	✓
Maintenance	NR	NR	Tous les ans	NR	NR	NR	NR	NR	Tous les 2 à 4 ans	Tous les 2 ans	Entretien peu fréquent du fait de la conception sans huile et lubrification
Garanties	1 an	NR	1 an	NR	NR	2 ans	90 jours à 6 mois selon les pièces (modèle HydroCiser)	2 ans	NR	2 ans	5 ans
Prix	NR	NR	135 000 euros	NR	NR	NR	NR	NR	NR	Environ 170 000 euros hors taxes	Location dès 1 500 euros/mois
Etude de cas	✓	NR	✓	NR	NR	✓	NR	NR	NR	NR	NR

(NR = Non renseigné)

II. Analyse de la locomotion équine sur tapis immergé

Plusieurs études, présentées ci-après, se sont intéressées aux effets de l'immersion sur la locomotion du cheval. Le choix d'utilisation d'un tapis immergé pour la réhabilitation d'un cheval, avec une lésion au niveau du dos ou des membres, nécessite en effet de comprendre les effets exacts de la marche dans l'eau sur les schémas moteurs, afin de construire un programme de réhabilitation adapté et éviter les exercices qui pourraient exacerber la lésion ou promouvoir des mouvements compensatoires inadaptés (Nankervis, Lefrancois 2018).

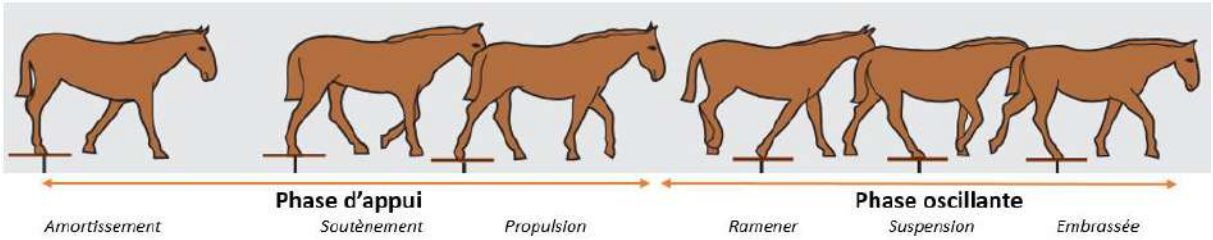


Figure 31 : Cycle de la foulée du membre antérieur droit chez le cheval, *d'après Eric Barrey (2014).*

1. Analyse cinématique du mouvement dans l'eau

1.1. Variations de l'amplitude du mouvement des articulations des membres lors d'immersion

Plusieurs études s'intéressent aux variations d'amplitude du mouvement articulaire des membres lors de marche sur tapis immergé, à des **hauteurs d'immersion allant de la bande coronaire au grasset**, pour des **vitesses entre 0,8 et 1,7 m/s**, par rapport à la marche sur tapis à sec ou sur sable. Les méthodes et résultats détaillés de ces études sont donnés dans le Tableau XV, la Figure 32 et en Annexe 4.

Figure 32 : Illustration de la disposition des marqueurs pour la mesure des angles articulaires des membres, *source : Nankervis et al. (2023).*

1, épicondyle latéral de l'humérus ; 2, processus styloïde latéral de l'ulna ; 3, aspect proximal latéral du troisième métacarpe ; 4, aspect distal latéral du troisième métacarpe ; 5, aspect latéral distal de la première phalange du membre antérieur ; 6, tête de la fibula ; 7, malléole latérale de la fibula ; 8, aspect proximal latéral du troisième métatarse ; 9, aspect distal latéral du troisième métatarse ; 10, aspect latéral distal de la première phalange du membre postérieur.

<u>Tableau XV</u> : Résultats des études s'intéressant aux variations de l'amplitude du mouvement des articulations des membres du cheval lors de marche sur tapis immergé, *source : Delacharlerie Aurore.*

<table>
<tr><th>Études</th><th>Résumés des résultats</th></tr>
<tr><td>Mendez-Angulo et al. (2013)</td><td>
- L'angle de flexion maximale pour les articulations métacarpo-phalangienne, carpienne, métatarso-phalangienne et tarsienne lors de la marche sur tapis immergé aux trois hauteurs d'eau est significativement inférieur (donc la flexion est supérieure) à celui dans la condition de base.
- L'angle d'extension maximale du boulet antérieur est significativement inférieur à la condition de base lors de marche avec de l'eau au niveau du tarse.
- L'amplitude du mouvement articulaire lors de la marche sur tapis immergé est significativement supérieure pour les boulets antérieurs et postérieurs, le carpe et le tarse, aux trois hauteurs d'eau par rapport à la condition de base.
- Hauteurs d'eau correspondant au mouvement maximal (flexion, extension, amplitude du mouvement) pour chacune des articulations :
<table>
<tr><th rowspan="2">Articulations</th><th colspan="3">Hauteur d'eau</th></tr>
<tr><th>Angle de flexion maximal</th><th>Angle d'extension maximale</th><th>Amplitude du mouvement articulaire maximale</th></tr>
<tr><td>Métacarpo-phalangienne</td><td rowspan="3">Tarse</td><td>Boulet</td><td>Boulet et tarse</td></tr>
<tr><td>Carpe</td><td>Tarse</td><td>Tarse</td></tr>
<tr><td>Métatarso-phalangienne</td><td>Boulet</td><td>Boulet et tarse</td></tr>
<tr><td>Tarse</td><td>Tarse et grasset</td><td>Grasset</td><td>Grasset</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>McCrae et al. (2021)</td><td>
- Toutes les articulations (boulet antérieur, carpe, coude, épaule) présentent une élévation significativement supérieure lors de marche dans l'eau à hauteur de carpe et/ou du grasset par rapport à sur sable et tapis à sec.
- Variations du mouvement maximal (flexion, extension, amplitude du mouvement) pour chacune des articulations :
<table>
<tr><th>Articulations</th><th>Flexion maximale</th><th>Extension maximale</th><th>Amplitude du mouvement</th></tr>
<tr><td>Carpe</td><td rowspan="2">Augmentation significative pour une hauteur d'eau au carpe ou au grasset par rapport à la marche sur tapis sec ou sur sable.</td><td rowspan="2">Absence de variation significative entre les différentes conditions (hauteurs d'eau, tapis à sec, sable).</td><td>- 1^{er} jour : augmentation significative pour une hauteur d'eau au carpe et au grasset par rapport à la marche sur sable, et maximale pour immersion au carpe.
- 10^e jour : augmentation significative pour une hauteur d'eau au grasset par rapport à la marche sur sable, tapis à sec, et eau à hauteur du carpe.
- Augmentation significative sur sable immédiatement après la session d'entrainement sur tapis immergé par rapport à la valeur pré-entrainement.</td></tr>
<tr><td>Coude</td><td>- 1^{er} et 10^e jour : Augmentation significative pour une hauteur d'eau au carpe et au grasset par rapport à la marche sur sable, et maximale pour immersion au carpe.
- Au 10^e j : augmentation significative sur sable immédiatement après la session d'entrainement sur tapis immergé par rapport à la valeur pré-entrainement.</td></tr>
<tr><td>Epaule</td><td>- Absence de variation significative entre les différentes conditions (hauteurs d'eau, tapis à sec, sable).
- Augmentation significative après 8 jours d'entrainement pour chaque condition (hauteurs d'eau, tapis à sec, sable).</td><td>- Diminution significative pour l'eau au grasset par rapport à la marche sur sable.
- Diminution significative après 8 jours d'entrainement pour chaque condition (hauteurs d'eau, tapis à sec, sable).</td><td>Augmentation significative lors de marche sur sable par rapport à des hauteurs d'eau au carpe ou grasset.</td></tr>
</table>
</td></tr>
</table>

(Suite) **Tableau XV : Résultats des études s'intéressant aux variations de l'amplitude du mouvement des articulations des membres du cheval lors de marche sur tapis immergé, *source : Delacharlerie Aurore.***

<table>
<tr><th>Études</th><th>Résumés des résultats</th></tr>
<tr><td>(Tranquille et al. 2022a)</td><td>
Membres antérieurs :
- L'angle de flexion maximale du carpe diminue significativement (donc la flexion augmente) avec l'augmentation de la profondeur de l'eau.
- Le pic de rétraction augmente significativement avec la profondeur de l'eau.

Membres postérieurs :
- Diminution de l'extension du boulet lors de la phase de soutènement de la phase d'appui quand la profondeur de l'eau augmente.
- Augmentation significative de la flexion du boulet au moment de la flexion maximale du tarse quand la profondeur de l'eau augmente.
- L'angle de flexion maximale du tarse diminue significativement (donc la flexion augmente) avec l'augmentation de la profondeur d'eau.
- Le pic de rétraction augmente significativement avec l'augmentation de la hauteur de l'eau.
</td></tr>
<tr><td>Nankervis et al. (2023)</td><td>
- Variations du pic de flexion pour chacune des articulations en fonction de la hauteur d'immersion et de la vitesse :
<table>
<tr><th>Articulations</th><th>A profondeur fixe</th><th>A vitesse fixe</th></tr>
<tr><td>Métacarpo-phalangienne</td><td rowspan="3">Augmentation significative du pic de flexion avec l'augmentation de la vitesse.</td><td rowspan="3">Augmentation significative du pic de flexion avec l'augmentation de la profondeur de l'eau (sec, métacarpo-phalangienne, carpe).</td></tr>
<tr><td>Carpe</td></tr>
<tr><td>Tarse</td></tr>
<tr><td>Métatarso-phalangienne</td><td>Aucun effet significatif de la vitesse à hauteur du carpe.</td></tr>
</table>
Remarque : les coefficients de régression pour la vitesse et la profondeur de l'eau montrent qu'une augmentation de la hauteur de l'eau est associée à une augmentation supérieure de la flexion du tarse par rapport à une augmentation de la vitesse de 1 km/h.

- L'augmentation de la vitesse et l'augmentation de la hauteur d'eau diminuent l'angle d'extension des articulations métacarpo-phalangiennes et métatarso-phalangiennes lors de la phase d'appui.
</td></tr>
</table>

1.1.1. Augmentation de la profondeur de l'eau à vitesse constante

1.1.1.1. Mouvement en flexion

Une **augmentation** significative du pic de **flexion** avec l'augmentation de la profondeur de l'eau pour les articulations **métacarpo-phalangienne** (Mendez-Angulo *et al.* 2013 ; Nankervis *et al.* 2023), **métatarso-phalangienne** (Mendez-Angulo *et al.* 2013 ; Tranquille *et al*. 2022a ; Nankervis *et al.* 2023), du **carpe** (Mendez-Angulo *et al.* 2013 ; McCrae *et al.* 2021 ; Tranquille *et al*. 2022a ; Nankervis *et al.* 2023), du **tarse** (Mendez-Angulo *et al.* 2013 ; Tranquille *et al.* 2022a ; Nankervis *et al.* 2023), et du **coude** (McCrae *et al.* 2021) est rapportée par rapport à la marche sur tapis à sec ou sur sable. Mendez-Angulo *et al.* (2013) proposent la hauteur d'eau correspondant à la flexion maximale pour l'articulation considérée. Tranquille *et al.* (2022a) nuancent cette valeur en montrant que le degré de flexion maximale du carpe et du tarse atteint un plateau à partir d'une certaine hauteur d'eau, juste en dessous ou juste au-dessus du tarse, qui semble être spécifique à chaque cheval. Elle dépend alors de la conformation du cheval, de sa flexibilité, et de la force musculaire disponible pour permettre le mouvement dans l'eau. Une augmentation de la hauteur de l'eau n'entraine donc pas nécessairement une augmentation de la flexion de l'articulation : par exemple, dans les différentes études, la flexion maximale du tarse est observée pour une hauteur d'eau au tarse ou au grasset (Mendez-Angulo *et al.* 2013 ; Tranquille *et al.* 2022a), celle du coude et du carpe pour une hauteur d'eau au carpe ou au grasset (McCrae *et al.* 2021).

En revanche, McCrae *et al.* (2021) mettent en avant l'absence de variation significative du pic de flexion de **l'épaule** pour de la marche dans l'eau, sur tapis à sec ou sur sable. Par contre, après huit jours d'entrainement sur tapis immergé, le pic de flexion est augmenté significativement pour chacune des conditions.

Saitua *et al.* (2020) montrent que le déplacement dorso-ventral des membres antérieurs et postérieurs de chevaux s'exerçant sur un tapis immergé à 1,4 m/s augmente progressivement avec l'élévation de la hauteur de l'eau entre le boulet et le carpe, mais sans augmenter davantage pour l'immersion au grasset. De la même façon, McCrae *et al.* (2021) rapportent une élévation significativement supérieure des articulations du membre antérieur (articulation métacarpo-phalangienne, carpe, coude, épaule) lors de marche dans l'eau à hauteur de carpe et/ou du grasset en comparaison de l'exercice sur sable et tapis à sec.

Interprétation :

L'augmentation de flexion des articulations distales des membres (boulets, carpe) avec l'élévation de la hauteur d'eau jusqu'à un niveau avoisinant le carpe ou le tarse s'explique par une adaptation de la dynamique du mouvement pour limiter la résistance de l'eau dans le plan sagittal lors de la phase d'embrassée du terrain, en élevant le membre en dehors de l'eau (Scott *et al*. 2010 ; Mooij *et al.* 2013 ; Mendez-Angulo *et al.* 2013 ; McCrae *et al.* 2021). L'augmentation du déplacement dorso-ventral et du pic de flexion de l'articulation proximale des membres antérieurs (coude) avec l'élévation de la hauteur d'eau jusqu'à un niveau avoisinant le carpe ou le grasset peut s'expliquer de la même façon (McCrae *et al.* 2021). Lorsque le niveau d'eau atteint le grasset, la majeure partie du membre est immergée, et le cheval n'est plus en mesure de surélever le membre au-dessus de l'eau lors de la locomotion, il adopte alors une autre dynamique de marche, développée partie II.1.2.3.

L'augmentation de flexion du tarse avec l'élévation de la hauteur d'eau jusqu'à un niveau avoisinant le tarse ou le grasset s'explique également par l'adaptation à la résistance de l'eau, en association avec le mouvement synchronisé de l'appareil réciproque causant simultanément la flexion et l'extension du tarse et du grasset. Lorsque l'eau est au niveau du grasset, la tentative pour élever le grasset au-dessus de l'eau pour limiter la résistance durant la locomotion augmente simultanément la flexion du tarse (Mendez-Angulo *et al.* 2013).

1.1.1.2. Mouvement en extension

Par opposition, l'augmentation de la hauteur d'eau est associée à une **diminution** significative de l'angle d'**extension** des articulations **métacarpo-phalangiennes** (Mendez-Angulo *et al.* 2013 ; Nankervis *et al.* 2023), et **métatarso-phalangiennes** (Tranquille *et al.* 2022a ; Nankervis *et al.* 2023) lors de la phase d'appui. McCrae *et al.* (2021) rapportent une diminution significative du degré d'extension de **l'épaule** pour un niveau d'eau au grasset par rapport à la marche sur sable, et une diminution significative après huit jours d'entrainement sur tapis immergé pour chaque condition.
Cependant, Mendez-Angulo *et al.* (2013) montrent des variations : pour certaines hauteurs d'eau, la marche sur tapis immergé est associé à une augmentation du degré d'extension des articulations métacarpo-phalangienne, métatarso-phalangienne, du carpe et du tarse. L'augmentation de l'angle d'extension reste néanmoins peu marquée, inférieure ou égal à 5° pour le carpe et tarse, possiblement du fait des limites anatomiques à l'extension de ces articulations. Cette étude est la seule à proposer cette conclusion, un approfondissement de ces recherches et de l'implication clinique associée serait nécessaire.

1.1.1.3. Amplitude du mouvement articulaire

Il résulte des données précédentes que **l'amplitude du mouvement articulaire** lors de la marche sur tapis immergé est significativement **supérieure** pour les **boulets antérieurs et postérieurs** (Mendez-Angulo *et al.* 2013), le **carpe** (Mendez-Angulo *et al.* 2013 ; McCrae *et al.* 2021), le **tarse** (Mendez-Angulo *et al.* 2013), et le **coude** (McCrae *et al.* 2021), par rapport à la marche sur tapis à sec ou sur sable. Cela s'explique principalement par l'augmentation du degré de flexion des articulations avec l'immersion, et de façon plus nuancée de celui d'extension pour certaines hauteurs d'eau (Mendez-Angulo *et al.* 2013). Les études cinématiques menées sur l'Homme[79] et l'espèce canine[80,81] conduisent à des conclusions similaires.
L'amplitude maximale du mouvement de l'épaule est observée lors de la marche sur sable. L'amplitude du mouvement articulaire lors de la marche sur tapis immergé est ainsi significativement **inférieure** pour **l'épaule**, par rapport à la marche sur tapis à sec ou sur sable. Cette diminution associée à l'exercice sur tapis immergé peut s'expliquer par l'augmentation de la résistance au mouvement liée à l'immersion dans l'eau, qui limite le degré d'extension de l'épaule (McCrae *et al.* 2021).

Ainsi, si l'objectif de la réhabilitation est d'augmenter l'amplitude du mouvement et la flexion des articulations des membres, une immersion proche du tarse est indiquée.
Néanmoins, les différents résultats des études rapportés précédemment montrent que la marche sur tapis immergé à différentes hauteurs d'eau affecte différemment les articulations en flexion et extension, même pour des articulations sur un même membre. Mendez-Angulo *et al.* (2013) rapportent une amplitude du mouvement maximale à des hauteurs d'eau différentes pour chaque articulation, et parfois des hauteurs différentes pour la flexion maximale ou l'extension maximale d'une articulation. Il est donc nécessaire de prendre en compte ces effets lors de la constitution d'un programme de réhabilitation, et notamment si le but du programme est d'augmenter spécifiquement la flexion ou l'extension d'une articulation.

[79] *Kato T, Onishi S, Kitagawa K. Kinematical analysis of underwater walking and running. Sport Med Training Rehabil 2001;10:165–182.*
[80] *Levine D, Rittenberry L, Millis DL. Aquatic therapy. In: Millis DL, Levine D, Taylor RA, eds. Canine rehabilitation and physical therapy. St Louis: Saunders, 2004;264–276.*
[81] *Jackson AM, Millis DL, Stevens M, et al. Joint kinematics during underwater treadmill activity (abstr), in Proceedings. 2nd Int Symp Anim Phys Ther Rehabil Vet Med 2002;191–192.*

À retenir :

Figure 33 : Hauteurs d'eau jusqu'auxquelles une augmentation de la flexion des articulations est observée (à adapter aux variations individuelles), *source : Delacharlerie Aurore.*
En *bleu* sont données les hauteurs d'eau. Les traits horizontaux de couleur correspondent à l'articulation considérée : **Boulets**, **Carpe**, **Tarse**, **Coude**.

1.1.2. Augmentation de la vitesse à profondeur d'eau constante

Une **augmentation significative du pic de flexion est rapportée avec l'augmentation de la vitesse** pour les articulations métacarpo-phalangienne, du carpe et du tarse **pour une immersion à hauteur du boulet ou du carpe**, et pour l'articulation métatarso-phalangienne pour une immersion à hauteur du boulet (Nankervis *et al.* 2023). Lors d'augmentation de la vitesse, la stratégie d'élever l'extrémité distale du membre au-dessus de l'eau peut s'avérer moins énergétiquement favorable qu'un arc d'envol plus bas du membre, expliquant possiblement la flexion inférieure de l'articulation métatarso-phalangienne avec l'augmentation de la vitesse pour l'immersion au carpe.
L'augmentation de la vitesse diminue l'angle d'extension des articulations métacarpo-phalangiennes et métatarso-phalangiennes lors de la phase d'appui, pour une immersion à hauteur du boulet ou du carpe.

Dans leur étude, Nankervis *et al.* (2023) montrent que les coefficients de régression associés à une augmentation de la profondeur de l'eau sont supérieurs à ceux associés à une augmentation de la vitesse. Ainsi, **si l'objectif de l'exercice est de maximiser la flexion des articulations distales du**

membre, alors l'augmentation de la profondeur d'immersion devrait être privilégiée à l'augmentation de la vitesse du tapis.

1.2. Variations de l'amplitude du mouvement du dos

Plusieurs études s'intéressent aux variations d'amplitude du mouvement du dos lors de marche ou trot sur tapis immergé, à des **hauteurs d'immersion allant de la bande coronaire à la ligne médiane de l'épaule**, pour des **vitesses entre 0,8 et 5 m/s**, par rapport à la marche sur tapis à sec. Les méthodes et résultats détaillés de ces études sont donnés dans les Tableaux XVI et XVII, la Figure 36 et en Annexe 4.

On définit dans cette partie, pour décrire les mouvements du dos, les notions de :

- Rotation axiale (RA) = rotation autour de l'axe crânio-caudal.
- Flexion latérale (« *lateral bending* », LB) = rotation autour de l'axe dorso-ventral.
- Flexion-Extension (FE) = rotation autour d'un axe perpendiculaire au plan sagittal.

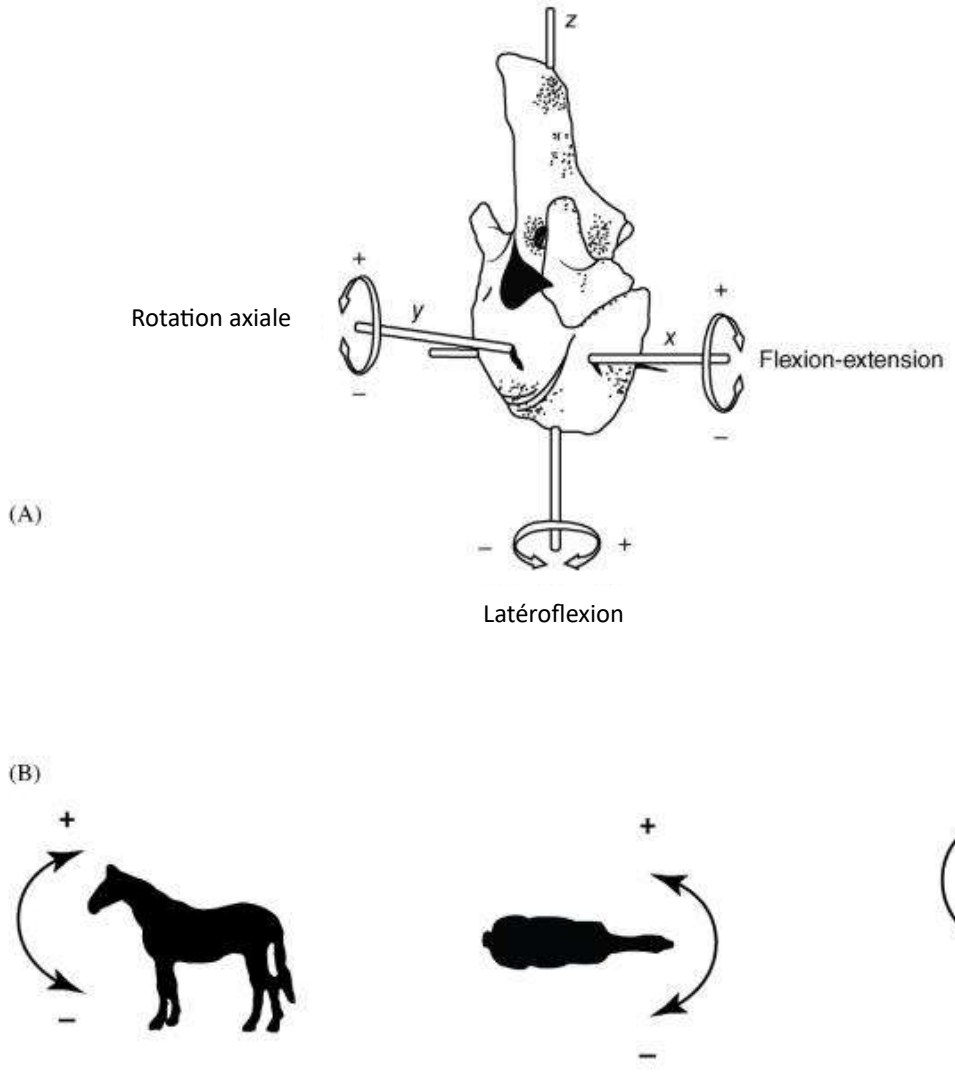
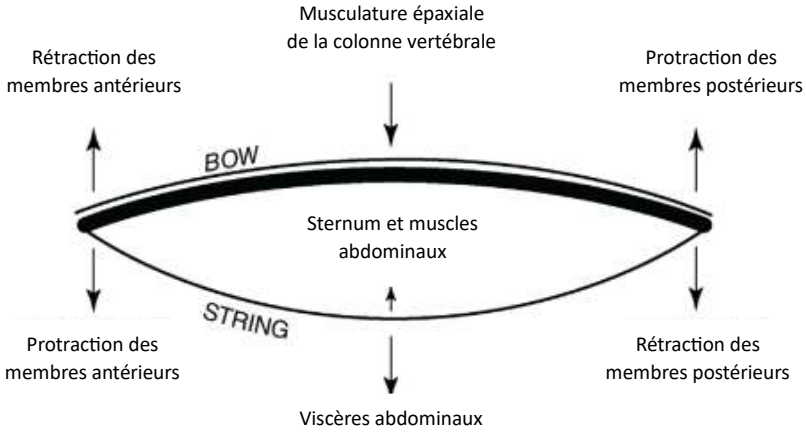


Figure 34 : (A) Visualisation des mouvements de base du dos à travers les rotations d'une vertèbre autour des trois axes d'un système de coordonnées orthogonales. (B) Visualisation des trois mouvements de base du dos du cheval : flexion-extension, latéroflexion, rotation axiale. *D'après van Weeren (2018).*

Chaque cheval utilise une combinaison individuelle de ces trois plans de mouvement (RA, LB et FE) lors de la locomotion[82].



<u>Figure 35</u> : Illustration des différents facteurs influençant la mobilité du dos selon le « *bow and string concept* », *d'après van Weeren (2018).*
Les flèches pointant vers le haut indiquent un effet de flexion sur le dos ; les flèches pointant vers le bas représentent un effet d'extension.

Le « *bow and string concept* » est une analogie du tronc, définissant « l'arc » *(bow)* comme la colonne vertébrale et la « corde » *(string)* par la musculature ventrale (muscle droit de l'abdomen, ligne blanche) et le sternum ; les côtes, la musculature abdominale latérale, et les ligaments connectifs sont des éléments additionnels.
Ce concept est généralement utilisé dans les études de cinématique pour illustrer les différents facteurs responsables du degré de mouvement du dos du cheval en flexion et extension[83,84,85]. Ainsi, la protraction des membres postérieurs va, à travers le mouvement vers l'avant du point d'attache du membre et les connections anatomiques entre le muscle fessier moyen *(gluteus medius)* et les processus épineux lombaires et sacrés via les fascia glutéal et lombo-dorsal, entrainer une flexion du dos. La rétraction des membres antérieurs aura le même effet. En revanche, la protraction des membres antérieurs et la rétraction des membres postérieurs a un effet opposé et entraine une extension du dos (van Weeren 2018).

[82] Pourcelot, P., Audigié, F., Degueurce, C., Denoix, J.-M., Geiger, D., 1998. Kinematics of the equine back, a method to study the thoracolumbar flexion extension movements at the trot. Veterinary Research 29, 519–525.
[83] Audigié, F., Pourcelot, P., Degueurce, C., Denoix, J.-M., Geiger, D., 1999. Kinematics of the equine back: Flexion–extension movements in sound trotting horses. Equine Veterinary Journal Suppl. 30, 210–213.
[84] van Weeren, P.R., 2009. Kinematics of the equine back. In: Henson, F.M.D. (Ed.), Equine Back Pathology: Diagnosis and Treatment, first ed. Blackwell Publishing, Oxford, UK, pp. 39–59.
[85] Warner, S.M., Koch, T.O., Pfau, T., 2010. Inertial sensors for assessment of back movement in horses during locomotion over ground. Equine Veterinary Journal Suppl. 38, 417–424.

Figure 36 : Illustration de la disposition des marqueurs sur le cheval pour la mesure des angles articulaires et des mouvements du squelette axial, *source : Nankervis et al. (2023).*
11, 6e vertèbre thoracique (T6) ; 12, 10e vertèbre thoracique (T10) ; 13, 13e vertèbre thoracique (T13) ; 14, 18e vertèbre thoracique (T18) ; 15, 3e vertèbre lombaire (L3) ; 16, 5e vertèbre lombaire (L5) ; 17, 3e vertèbre sacrée (S3) ; cinq unités de mesure d'inertie sont positionnées au niveau de la nuque, du garrot, du sacrum, et des tubérosités coxales droite et gauche.

Tableau XVI : Résultats des études s'intéressant aux déplacements crânio-caudal, dorso-ventral, et médio-latéral du dos du cheval lors de marche sur tapis immergé, *source : Delacharlerie Aurore.*

Études	Résumés des résultats
Tranquille *et al.* (2022a)	- Garrot : Augmentation significative du déplacement dorso-ventral avec l'augmentation de la hauteur de l'eau à partir de 21 cm. - Sacrum et tubérosité coxale droite (RTC) et gauche (LTC) : augmentation significative du déplacement dorso-ventral et du mouvement médio-latéral, et diminution significative du mouvement cranio-caudal (sauf pour LTC) avec l'augmentation de la hauteur de l'eau.
Nankervis *et al.* (2023)	- Augmentation significative des déplacements cranio-caudal, dorso-ventral et médio-latéral du garrot et de la nuque avec l'augmentation de la vitesse et de la profondeur, sauf pour le déplacement médio-latéral du garrot qui présente une diminution significative avec l'augmentation de la vitesse. - Augmentation significative des déplacements dorso-ventral et médio-latéral du sacrum, et des tubérosités coxales droite et gauche avec l'augmentation de la vitesse et de la profondeur.

Tableau XVII : Résultats des études s'intéressant aux mouvements du dos (RA, LB, FE) du cheval lors de marche sur tapis immergé, *source : Delacharlerie Aurore.*

<table>
<tr><th>Études</th><th>Résumés des résultats</th></tr>
<tr><td>Mooij et al. (2013)</td><td>
- L'amplitude du mouvement du pelvis en rotation axiale est significativement supérieure pour une immersion du boulet à l'épaule par rapport à la profondeur contrôle (bande coronaire). Elle est maximale pour une immersion au carpe.
- L'amplitude du mouvement du dos en flexions latérales diminue significativement quand l'eau atteint les hauteurs du coude et de l'épaule par rapport à la profondeur contrôle.
- L'amplitude du mouvement du pelvis en flexion augmente significativement avec la hauteur de l'eau par rapport à la profondeur contrôle.
- Aucune différence significative n'est observée entre les résultats aux jours 1 et 10.
</td></tr>
<tr><td>Nankervis, Finney, et Launder (2016)</td><td>
- Variations significatives de l'amplitude du mouvement en flexion-extension, et des mouvements angulaires en flexion et extension des vertèbres pour des hauteurs d'eau au niveau du boulet postérieur, tarse et grasset, par rapport à la hauteur d'eau contrôle :
<table>
<tr><th>Vertèbres</th><th>Amplitude du mouvement en flexion-extension</th><th>Mouvement angulaire en flexion</th><th>Mouvement angulaire en extension</th></tr>
<tr><td>T10</td><td rowspan="4">Augmentation
(boulet postérieur, tarse, et grasset)</td><td>Aucune</td><td>Augmentation
(boulet postérieur, et tarse)</td></tr>
<tr><td>T13</td><td>Augmentation
(boulet postérieur)</td><td>Augmentation
(boulet postérieur, tarse et grasset)
+ Augmentation significative de l'angle en extension pour l'eau au niveau du grasset par rapport au boulet postérieur.</td></tr>
<tr><td>T18</td><td rowspan="2">Augmentation
(boulet postérieur, tarse et grasset)</td><td>Augmentation
(boulet postérieur, tarse et grasset)</td></tr>
<tr><td>L3</td><td rowspan="2">Aucune</td></tr>
<tr><td>L5</td><td>Aucune</td><td>Augmentation
(boulet postérieur)</td></tr>
</table>
- Aucune modification significative du mouvement de rotation axiale du pelvis, définie par les déplacements verticaux des tubérosités coxales droite et gauche, entre les différentes hauteurs d'eau (mais tendance à l'augmentation).
</td></tr>
<tr><td>Tranquille et al. (2022a)</td><td>
L'amplitude du mouvement en flexion-extension de :
- T10, T13, T18, et L3 augmente significativement avec la hauteur de l'eau.
- L5 diminue significativement quand la hauteur de l'eau augmente.
</td></tr>
<tr><td>Nankervis et al. (2023)</td><td>
- Amplitude du mouvement en flexion-extension de la région thoraco-lombaire : augmentation significative avec la vitesse et la profondeur de l'eau pour T10, T13, T18, L3 (mais pas L5), avec l'eau ayant plus d'influence que la vitesse.
- Amplitude du mouvement en flexion latérale de la région thoracique : augmentation significative avec la vitesse (T10), et de l'eau au niveau du carpe (T10 et T13).
- Amplitude du mouvement en flexion latérale de la région lombaire (T18, L3, L5) : diminution significative avec l'augmentation de la vitesse ; aucun effet significatif de la profondeur de l'eau.
</td></tr>
</table>

1.2.1. Effets de la profondeur d'immersion et de la vitesse sur l'amplitude du mouvement en flexion-extension, flexion latérale et rotation axiale de la région thoraco-lombaire

1.2.1.1. Flexion-extension

Les mouvements du dos sont principalement passifs lors de la marche, influencés à la fois par les mouvements des membres et la position de la tête et de l'encolure. Nankervis, Finney, et Launder (2016), Tranquille *et al.* (2022a), et Nankervis *et al.* (2023) montrent que **la marche dans l'eau** pour des vitesses entre 0,8 m/s et 1,7 m/s, à une hauteur allant jusqu'au **grasset**, est associée à une **amplitude du mouvement en flexion-extension significativement supérieure de toute la région thoraco-lombaire, exceptée L5**, par rapport à la marche dans de l'eau à hauteur du sabot ou sur tapis à sec. Nankervis *et al.* (2023) montrent également une **augmentation significative de l'amplitude du mouvement en flexion-extension de toute la région thoraco-lombaire, exceptée L5, avec l'augmentation de la vitesse**, chez des chevaux marchant sur tapis immergé.

Interprétation :

L'augmentation de l'amplitude du mouvement en flexion-extension de la région thoraco-lombaire avec la hauteur d'eau s'explique différemment entre la région thoracique et la région lombaire de la colonne vertébrale (Nankervis, Finney, Launder 2016) :

- Pour la vertèbre thoracique **T13** : elle est liée à une **augmentation du mouvement en extension** lorsque l'eau devient plus profonde, par rapport à une simple hauteur au boulet. Lorsque l'eau est suffisamment basse, le cheval peut baisser la tête et l'encolure, ce qui cause une flexion de la région thoracique crâniale. En revanche, lorsque le niveau d'eau monte, le cheval est limité pour baisser la tête, d'autant que la plupart des chevaux préfèrent la maintenir à distance de la surface de l'eau, ce qui contribue à une extension de la région thoracique crâniale.
- Pour la vertèbre lombaire **L3** : elle est liée à une augmentation du mouvement en **flexion**.
- Pour la vertèbre thoracique **T18** : elle est liée à une augmentation du mouvement en **flexion et en extension**.

L'augmentation du mouvement en flexion pour T18 et L3 avec l'augmentation de la hauteur de l'eau peut s'expliquer par le « *bow and string concept* ». L'augmentation de protraction (voir partie II.1.3) et l'augmentation de l'amplitude du mouvement (principalement en flexion) des articulations distales des membres postérieurs lors de l'immersion (voir partie précédente) ont pour effet de tendre « l'arc » via la traction des muscles rétracteurs des membres postérieurs et la musculature épaxiale, menant à la flexion de la région thoraco-lombaire considérée. Par ailleurs, lorsque l'immersion est suffisamment profonde, à hauteur du grasset par exemple, la flexion de la région thoracique caudale et de la région lombaire est assistée par les effets de la flottabilité sur la région caudale du tronc. La flottabilité s'oppose au poids de l'abdomen qui tire normalement la colonne vertébrale vers le bas, donc vers l'extension (Nankervis, Finney, Launder 2016).

Remarque : L'amplitude du mouvement en flexion-extension de la vertèbre lombaire L5 lors de marche sur tapis immergé est rapportée soit inchangée (Nankervis, Finney, Launder 2016 ; Nankervis *et al.* 2023), soit diminuée (Tranquille *et al.* 2022a), ce qui semble s'opposer à l'étude menée par (Mooij *et al*. 2013) où une augmentation du mouvement en flexion du bassin est décrite lors d'une immersion du boulet à l'épaule. Dans cette dernière étude, la flexion du bassin est mesurée par les variations de distance entre les tubérosités sacrales et la base de la queue. Nankervis, Finney, et Launder (2016), Tranquille *et al.* (2022a), et Nankervis *et al.* (2023) utilisent plutôt la méthode décrite par Farber *et al.* (2001). L'absence de similitude des résultats entre ces études peut donc s'expliquer par les méthodes très différentes pour étudier le mouvement du dos dans cette région.

L'absence de coordination entre les modifications de mouvement des membres postérieurs lors de marche sur tapis immergé et le caractère inchangé du mouvement en flexion-extension de L5, proposée par Nankervis, Finney, et Launder (2016), et Nankervis *et al.* (2023), pourrait alors s'expliquer parce que le point de pivot des membres postérieurs lors d'une allure symétrique est l'articulation coxofémorale et non l'articulation lombosacrée.

1.2.1.2. Flexion latérale

L'amplitude du mouvement en flexion latérale de la région thoracique crâniale augmente significativement avec l'augmentation de la vitesse et plus particulièrement de la profondeur. En revanche, **pour la région thoracique caudale et lombaire, elle ne varie pas avec l'augmentation de la profondeur et diminue avec l'augmentation de la vitesse**. Cette diminution avec la vitesse peut s'expliquer par l'activité bilatérale des muscles paravertébraux qui augmentent la stabilité spinale et aident au transfert d'énergie entre l'arrière et l'avant main[86] (Nankervis *et al.* 2023).
Mooij *et al.* (2013) avaient montré une **diminution des mouvements en flexion latérale du dos à des hauteurs d'eau atteignant le coude ou l'épaule** par rapport au tapis à sec, ce qui n'est pas observé par Nankervis *et al.* (2023), possiblement parce que les hauteurs d'eau utilisées (carpe) sont insuffisantes pour créer une résistance au mouvement générant une telle réponse.

1.2.1.3. Rotation axiale

Une **augmentation significative de l'amplitude du mouvement du pelvis en rotation axiale** est rapportée **lors d'immersion entre le boulet et l'épaule** par rapport à une profondeur contrôle à la bande coronaire. Elle est rapportée **maximale pour une immersion au carpe** (Mooij *et al.* 2013).

À retenir :
La marche dans l'eau est donc associée à des changement posturaux, avec une extension thoracique crâniale et une flexion de la région thoracique caudale et lombaire. En favorisant la flexion thoraco-lombaire, la marche sur tapis immergé pourra présenter un intérêt pour la réhabilitation de certaines conditions. En revanche, le mouvement en extension plus crânialement doit être pris en considération et peut constituer un frein à son utilisation chez des chevaux souffrant de conflit des processus épineux[87,88] (le plus souvent entre T13 et T18) par exemple.

[86] *Licka, T., Frey, A., Peham, C., 2009. Electromyographic activity of the longissimus dorsi muscles in horses when walking on a treadmill. The Veterinary Journal 180, 71–76.*
[87] *Walmsley, J.P., Pettersson, H., Winberg, F. and McEvoy, F. (2002) Impingement of the dorsal spinous processes in two hundred and fifteen horses: case selection, surgical technique and results. Equine Vet. J. 34, 23-28.*
[88] *Erichsen, C., Eksell, P., Roethlisberger Holm, K., Lord, P. and Johnston, C. (2004) Relationship between scintigraphic and radiographic evaluations of spinous processes in the thoracolumbar spine in riding horses without clinical signs of back problems. Equine Vet. J. 36, 458-465.*

À retenir :

	Région thoracique crâniale	Région thoracique caudale	Région lombaire	Pelvis
Flexion-extension	↗ Extension (lorsque le cheval n'est plus en mesure de baisser la tête)	↗ Flexion	↗ Flexion	↗ Flexion
Latéro-flexion	↗ (carpe)	=	=	↘ (coude, épaule)
Rotation axiale	/	/	/	↗

Figure 37 : Récapitulatif de la réponse des différentes régions du dos à l'augmentation de la hauteur de l'eau lors de marche sur tapis immergé, *source : Delacharlerie Aurore.*

La hauteur d'eau concernée est précisée entre parenthèse lorsque nécessaire. Les symboles signifient : ↗, une augmentation du mouvement ; ↘, une diminution du mouvement ; =, un mouvement inchangé ; /, une absence de données.

1.2.2. Effets de la profondeur d'immersion et de la vitesse sur les déplacements dorso-ventraux, crânio-caudaux et médio-latéraux de la ligne médiane (de la nuque au sacrum) et du bassin

Les déplacements dorso-ventraux et crânio-caudaux de la nuque augmentent avec la profondeur de l'eau et la vitesse (0,8 à 1,7 m/s) (Pasman *et al.* 2022 ; Nankervis *et al.* 2023), avec un coefficient de régression maximal pour le déplacement crânio-caudal de la nuque avec une immersion au carpe. Dans leur étude, Nankervis *et al.* (2023) n'ont pas pu mener jusqu'au bout les sessions à 1,7 m/s pour un niveau d'eau au carpe et dans certains cas au boulet, du fait de l'observation de mouvements excessifs de la tête, une posture en extension et une rétraction excessive des membres postérieurs. **Les mouvements de la tête semblent donc un indicateur fiable de la bonne adéquation profondeur et vitesse** lors de la construction d'un protocole de réhabilitation en tapis immergé.

Les déplacements dorso-ventraux du bassin augmentent avec la profondeur de l'eau et la vitesse (0,8 à 1,7 m/s), avec une magnitude équivalente pour une élévation de la hauteur de l'eau au boulet ou au carpe, et une accélération de 0,3 m/s. Ces déplacements **reflètent l'augmentation de l'amplitude du mouvement des membres postérieurs** avec l'augmentation de la profondeur de l'eau et la vitesse (comme vu partie II.1.1).
Si la profondeur de l'eau et la vitesse sont augmentées simultanément, le cheval peut atteindre les limites de ses capacités en terme d'amplitude du mouvement articulaire, de sorte qu'il ne sera pas en mesure de maintenir sa position sur le tapis, et montrera une transition vers le trot. Cela est important à prendre en compte pour la construction d'un protocole sur tapis immergé (Nankervis *et al.* 2023).

L'augmentation de l'amplitude du mouvement médio-latéral du bassin est plus marquée lors d'augmentation de la profondeur de l'eau que de la vitesse (Tranquille *et al.* 2022a ; Nankervis *et al.* 2023).
Par ailleurs, Tranquille *et al.* (2022a) soulignent une augmentation de magnitude équivalente des déplacements verticaux des tubérosités coxales droite et gauche, et du sacrum, couplée à une augmentation des mouvements médio-latéraux du bassin, et une augmentation de la rétraction des membres postérieurs ; ceci suggère une **augmentation du roulement du bassin avec l'augmentation de la hauteur d'immersion**. Cette adaptation cinématique peut s'interpréter comme un mouvement compensateur du cheval qui est limité par la flexion maximale de son tarse. **Surveiller l'ampleur de roulement du bassin concours ainsi à l'évaluation d'un protocole de réhabilitation sur tapis immergé.**

Plus récemment, Fraschetto *et al.* (2024) étudient le **déplacement dorso-ventral du tronc** chez six *Standardbred* au **trot** à 3,5 m/s et 5 m/s sur tapis immergé (à sec, mi-canon, mi-radius et pointe de l'épaule). Les accéléromètres sont placés au niveau du garrot, de la jonction thoraco-lombaire (T18), des tubérosités sacrales, du sacrum (S5), et de la tubérosité coxale droite. Ils montrent que les déplacements verticaux sont significativement augmentés pour n'importe quelle position du capteur lorsque les chevaux trottent dans l'eau à mi-canon et mi-radius par rapport au tapis sec, avec la plus forte augmentation pour mi-radius et T18. **Lorsque la vitesse augmente de 3,5 à 5 m/s, les déplacements verticaux diminuent significativement au niveau de T18** pour chaque profondeur d'eau. Ainsi, **augmenter la profondeur de l'eau jusqu'à mi-radius entraine une augmentation du déplacement vertical du tronc d'environ 2 à 4 cm par rapport à la condition sur tapis à sec**. En revanche, une augmentation supplémentaire du niveau d'eau jusqu'à l'épaule ne produit pas de changement significatif dans le déplacement vertical du tronc, sauf une légère augmentation au niveau du garrot lors du trot lent.
Comme le trot comporte une phase de suspension, le mouvement dorso-ventral du tronc est un phénomène passif lié au déplacement de la masse abdominale pendant les phases d'appui et oscillante. Ainsi, l'augmentation du déplacement vertical du tronc observée à n'importe quelle position du capteur dans cette étude en réponse à des niveaux d'eau faibles ou intermédiaires devrait être

interprétée comme une conséquence de l'augmentation de l'inertie de la masse viscérale lorsque le cheval trotte en tentant de franchir la surface de l'eau (comme décrit ci-après) et que l'abdomen n'est pas ou partiellement immergé. Lorsque le niveau d'eau est trop élevé et que le cheval est presque complètement immergé, il n'y a plus d'augmentation de la suspension au trot, car la flottabilité et la pression hydrostatique limitent l'excursion verticale de la masse corporelle.

1.2.3. Interprétation de la réponse cinématique du dos à la démarche adoptée sur tapis immergé

Nous avons abordé, dans le Chapitre 1, la réduction des forces verticales de réaction du sol chez le chien, lors d'immersion au niveau du tarse (9 %), grasset (15 %) et hanche (62 %) (Levine *et al.* 2010). Cette diminution est due à la flottabilité. Elle fournit de l'aide au levé du membre dans le plan vertical, mais l'eau crée une résistance au mouvement dans le plan sagittal. Chez les chiens et les chevaux, les effets de la flottabilité sont minimaux lorsque seulement la partie distale des membres est immergée, alors qu'ils sont significatifs lorsque le tronc est immergé. Cela explique pourquoi la phase d'embrassée de terrain du membre dans le plan sagittal demande davantage d'énergie lors d'immersion, par rapport à l'embrassée de terrain usuelle et à un simple mouvement de levé du membre.

Chez le cheval, l'amplitude du mouvement en rotation axiale du dos est maximale pour une immersion au carpe (Mooij *et al.* 2013). Les auteurs proposent que jusqu'à cette profondeur, les chevaux sélectionnent une démarche associée à une augmentation de la flexion des articulations distale des membres, de sorte à minimiser les effets de la résistance de l'eau aux mouvements, et à privilégier une foulée avec la dépense énergétique la plus faible. L'animal tente donc, lors d'immersion au boulet ou au carpe, de lever les membres antérieurs et postérieurs au-dessus de l'eau. Ce mouvement des membres postérieurs est permis en association avec une augmentation de la rotation axiale du dos.
Lorsque le niveau d'eau atteint le coude ou l'épaule, le cheval est contraint d'adopter une autre démarche du fait de la résistance de l'eau. La profondeur est trop importante pour permettre uniquement une adaptation par la flexion distale des membres, de sorte que l'amplitude de rotation axiale du dos diminue, et une autre démarche est adoptée avec une augmentation de l'amplitude de flexion du bassin et une diminution de l'amplitude de flexion latérale du dos (Mooij *et al.* 2013 ; Nankervis, Finney, Launder 2016).

Il est à noter que Nankervis, Finney, et Launder (2016) n'observent pas d'association significative entre la rotation axiale du pelvis et la hauteur d'eau, comme décrite par Mooij *et al.* (2013). Le manque de corrélation est probablement lié aux quatorze chevaux de l'étude, dont le déplacement vertical maximum du pelvis n'est pas rapporté à la même hauteur d'eau : pour six lors d'immersion au grasset, pour trois lors d'immersion au tarse, pour trois lors d'immersion au boulet et pour un lors d'immersion au sabot. Cela suggère donc que les chevaux adoptent des stratégies différentes de mise en mouvements des membres postérieurs en réponse à la marche dans l'eau, possiblement du fait de différences dans la force des muscles des membres postérieurs, dans l'amplitude du mouvement des articulations, et de la présence éventuelle d'une boiterie.

1.3. Variations des mouvements de protraction et rétraction des membres lors de marche sur tapis immergé

Plusieurs études s'intéressent aux variations d'amplitude des mouvements de protraction et rétraction des membres lors de marche sur tapis immergé, à des **hauteurs d'immersion allant de la bande coronaire au grasset**, pour des **vitesses entre 0,8 et 1,7 m/s**, par rapport à la marche sur tapis à sec. Les méthodes et résultats détaillés de ces études sont donnés dans le tableau XVIII, la Figure 38 et en Annexe 4.

Tableau XVIII : Résultats des études s'intéressant aux mouvements de protraction et rétraction des membres en fonction de la profondeur de l'eau et de la vitesse lors de marche sur tapis immergé, ***source : Delacharlerie Aurore.***

		Nankervis et Lefrancois (2018)	Tranquille *et al.* (2022a)	De Geer *et al.* (2022)	Nankervis *et al.* (2023)
Membres antérieurs	Amplitude du mouvement protraction-rétraction	Significativement **inférieure** pour toutes les profondeurs d'immersion par rapport au tapis à sec.	/	**Augmentation** significative avec la **profondeur** de l'eau. **Augmentation** significative avec l'augmentation de la **vitesse** (0,9-1,2 m/s) sur tapis à sec et immergé.	/
	Angle de protraction maximale	**Inférieur** pour toutes hauteurs d'eau par rapport au tapis à sec, diminuant avec l'augmentation de la hauteur de l'eau ; et est significativement inférieur pour une immersion au jarret et au grasset par rapport au tapis à sec.	/	**Augmentation** significative avec l'augmentation de la **vitesse** (0,9-1,2 m/s) sur tapis à sec et immergé.	**Diminution** significative avec une **immersion au carpe**. **Augmentation** significative avec l'augmentation de la **vitesse** (0,8-1,7 m/s) sur tapis à sec et immergé.
	Angle de rétraction maximale	Absence de variation significative.	**Augmentation** significative avec la **profondeur** de l'eau.	**Augmentation** significative avec la **profondeur** de l'eau. **Augmentation** significative avec l'augmentation de la **vitesse** (0,9-1,2 m/s et 0,8 à 1,7 m/s) sur tapis à sec et immergé.	
Membres postérieurs	Amplitude du mouvement protraction-rétraction	Significativement **supérieure** pour une immersion au boulet, au jarret et au grasset, par rapport au tapis à sec et au sabot.	/	**Augmentation** significative avec la **profondeur** de l'eau.	/
	Angle de protraction maximale	**Supérieur** lors de marche dans l'eau par rapport au tapis à sec, et augmente avec la profondeur de l'eau, mais sans différences significatives.	/	**Augmentation** significative avec la **profondeur** de l'eau.	**Augmentation** significative avec l'augmentation de la **vitesse** (0,8-1,7 m/s) sur tapis à sec et immergé.
	Angle de rétraction maximale	**Supérieur** lors de marche dans l'eau par rapport au tapis à sec, et est significativement augmenté lors d'immersion au jarret par rapport au tapis à sec, et lors d'immersion au jarret et au grasset par rapport aux sabots.	**Augmentation** significative avec la **profondeur** de l'eau.	**Augmentation** significative avec la **profondeur** de l'eau. **Augmentation** significative avec l'augmentation de la **vitesse** (0,9-1,2 m/s et 0,8 à 1,7 m/s) sur tapis à sec et immergé.	

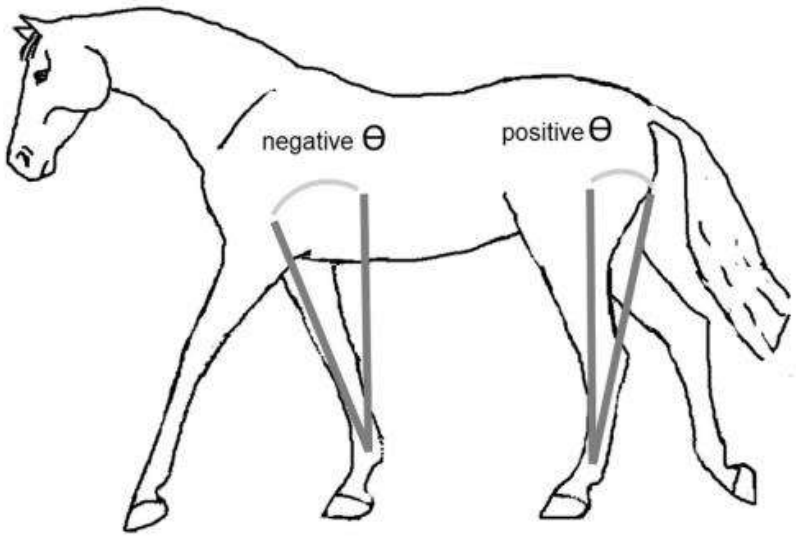


Figure 38 : Illustration de l'angle de rétraction (negative Θ) sur le membre antérieur droit et de l'angle de protraction (positive Θ) sur le membre postérieur gauche donnés par rapport à la verticale et à l'axe du membre, *source : Nankervis et Lefrancois (2018)*.

1.3.1. Réponses à l'augmentation de la hauteur de l'eau

L'augmentation de la hauteur de l'eau lors de marche sur tapis immergé est associée à une augmentation de l'amplitude du mouvement en protraction-rétraction, et une **augmentation de l'angle de protraction** (Nankervis, Lefrancois 2018 ; De Geer *et al.* 2022), **et de rétraction** (Nankervis, Lefrancois 2018 ; Tranquille *et al.* 2022a ; De Geer *et al.* 2022 ; Nankervis *et al.* 2023) **des membres postérieurs**.
L'augmentation de la hauteur de l'eau lors de marche sur tapis immergé est associée à une **diminution de l'angle de protraction** (Nankervis, Lefrancois 2018 ; Nankervis *et al.* 2023) et une **augmentation de l'angle de rétraction** (Tranquille *et al.* 2022a ; De Geer *et al.* 2022 ; Nankervis *et al.* 2023) des **membres antérieurs**. L'amplitude du mouvement en protraction-rétraction est rapportée diminuée (Nankervis, Lefrancois 2018) ou augmentée (De Geer *et al.* 2022) selon les études, pour les membres antérieurs avec l'augmentation de la hauteur de l'eau.

La diminution de protraction des membres antérieurs peut s'expliquer par l'augmentation des forces de résistance de l'eau, avec l'augmentation de la hauteur d'immersion, qui s'opposent au mouvement du membre vers l'avant. Une diminution de la vitesse de locomotion est souvent recommandée pour compenser cette augmentation de résistance. Nankervis et Lefrancois (2018) rapportent que malgré une diminution de 50 % de la vitesse, la protraction des membres antérieurs lors de marche sur tapis immergé à 0,8 m/s reste inférieure par rapport à la marche sur tapis à sec à 1,6 m/s.
Par ailleurs, Nankervis et Lefrancois (2018) rapportent une augmentation significative de la durée de la phase de protraction et une diminution significative de la durée de la phase de rétraction des membres antérieurs avec l'augmentation de la hauteur de l'eau. La vitesse angulaire en protraction et rétraction des membres antérieurs diminue également significativement avec l'augmentation de la profondeur de l'eau.
Il a été montré que l'augmentation de résistance durant la marche sur tapis immergé induit une augmentation de l'activité du muscle brachio-céphalique en parallèle à l'augmentation de la hauteur de l'eau[89] ou par rapport à la marche sur tapis à sec (Tokuriki *et al.* 1999), reflétant le rôle majeur de ce muscle dans la protraction du membre antérieur. Un effet à surveiller lors d'exercice sur tapis immergé pourra donc être un développement musculaire excessif de l'avant main chez le cheval, la

[89] Stanley S. Influence of water height on equine brachiocephalicus muscle activity during exercise on a water treadmill. B.Sc (Hons) Biomedical Science Thesis. Manchester Metropolitan University; 2014.

résistance de l'eau augmentant la charge associée à la protraction, au moins à partir d'une immersion au jarret (Nankervis, Lefrancois 2018).

La musculature des membres antérieurs est principalement adaptée au support du poids de l'avant-main, alors que les membres postérieurs ont davantage une fonction de propulsion. Les variations en termes de fonction et d'attaches musculaires des membres antérieurs et postérieurs expliquent que la réponse des postérieurs à l'immersion soit différente, avec une augmentation de la protraction et de la rétraction avec l'augmentation de la hauteur de l'eau.
En parallèle, Nankervis et Lefrancois (2018) rapportent une augmentation de l'écart-type des pics de protraction et rétraction des postérieurs quand l'eau augmente, ce qui reflète une augmentation de la **variabilité de mouvement entre les chevaux**. Dans leur étude, les chevaux montrent un pic de protraction soit pour une hauteur d'eau au jarret, soit au grasset, ce qui reflète des aptitudes différentes des chevaux à fléchir la région lombosacrée ou les articulations proximales du membre postérieur. Les chevaux limités dans ces flexions, du fait de leur conformation, de rigidité, ou d'une affection, auront moins tendance à répondre par une augmentation du mouvement de protraction des postérieurs à l'augmentation de la hauteur d'eau, mais davantage à augmenter le mouvement de rétraction. L'augmentation de rétraction des postérieurs à partir d'une certaine profondeur d'immersion, rapportée au jarret par Nankervis et Lefrancois (2018), favorise un mouvement en extension du dos, selon le *« bow and string concept »*.

1.3.2. Réponse à l'augmentation de la vitesse

L'augmentation de la vitesse lors de marche sur tapis immergé est associée à une **augmentation de l'amplitude du mouvement en protraction-rétraction des membres antérieurs**, et de **l'angle de protraction et de rétraction des membres antérieurs et postérieurs** (De Geer *et al.* 2022 ; Nankervis *et al.* 2023).
Lorsque la vitesse du tapis augmente, le membre est ramené passivement plus loin (en arrière) sur le tapis durant la phase d'appui[90], ce qui explique l'augmentation de rétraction des membres (De Geer *et al.* 2022).

À retenir :
Tableau XIX : Récapitulatif de la réponse en protraction et rétraction des membres du cheval à une augmentation de la hauteur de l'eau lors de marche sur tapis immergé, *source : Delacharlerie Aurore*.

	Membres antérieurs	Membres postérieurs
Protraction	↘	↗
Rétraction	↗	↗
Amplitude du mouvement en protraction-rétraction	↗ ou ↘ (selon études)	↗

Les symboles signifient : ↗, une augmentation du mouvement ; ↘, une diminution du mouvement.

À retenir :
Le tapis immergé pourra avoir des effets bénéfiques dans des programmes de réhabilitation à travers la flexion lombaire et l'augmentation du mouvement en protraction des postérieurs. Mais il faut surveiller une potentielle augmentation de la rétraction des postérieurs qui pourrait être contre-productive dans la réhabilitation de certaines conditions, comme par exemple une desmite proximale du suspenseur, une lésion du tendon du muscle fléchisseur profond du doigt, ou une lésion du dos (Nankervis, Lefrancois 2018).
Les différences de résultats entre les études peuvent s'expliquer par les différences de race, conformation ou d'entrainement des chevaux inclus.

[90] *Buchner, H.H.F., Savelberg, H.H.C.M., Schamhardt, H.C., Merkens, H.W., Barneveld, A., 1994b. Kinematics of treadmill versus overground locomotion in horses. Veterinary Quarterly 16 (Suppl. 2), 87–90.*

2. Analyse cinétique du mouvement dans l'eau

2.1. Forces de réaction du sol

Nous avons montré dans le Chapitre 1, que la marche sur tapis immergé, du fait de la flottabilité, contribue à diminuer significativement les forces de réaction du sol qui s'appliquent sur les membres chez l'Homme et le chien. Aucune étude similaire n'a été menée pour l'instant chez le cheval, bien que McClintock, Hutchins, et Brownlow (1987) se soient intéressés à la réduction du poids du corps lors d'immersion de chevaux dans une cuve de solution saline.

Lors d'exercice de chevaux sur tapis immergé, Greco-Otto *et al.* (2019) ont utilisé des accéléromètres pour mesurer les pics d'accélération des différents segments osseux des membres et l'atténuation des forces d'impact entre les structures anatomiques. Le pic d'accélération d'un segment osseux est représentatif de la charge d'impact sur ce segment au cours de la locomotion. L'atténuation des forces d'impact correspond à la diminution de l'ampleur et de la fréquence de l'onde de choc (Reenalda *et al.* 2019). Les accéléromètres sont placés au niveau du sabot, à mi-canon, et mi-radius, et les chevaux évoluent dans de l'eau à hauteur du mi-canon, carpe, grasset ou sur tapis à sec.
Greco-Otto *et al.* (2019) montrent ainsi que l'exercice sur tapis immergé, pour toute hauteur d'immersion, **réduit significativement les pics d'accélération des différents segments osseux** par rapport à l'exercice sur tapis à sec. L'augmentation de la hauteur de l'eau, entre le canon et le grasset, réduit également significativement les pics d'accélération et **augmente significativement l'atténuation des forces d'impact à travers le membre**. Par exemple, pour le sabot, l'immersion au grasset réduit de 30 % le pic d'accélération par rapport au tapis à sec ; et pour le sabot, le canon et le radius, l'immersion au grasset réduit de 5 % le pic d'accélération par rapport à mi-canon.

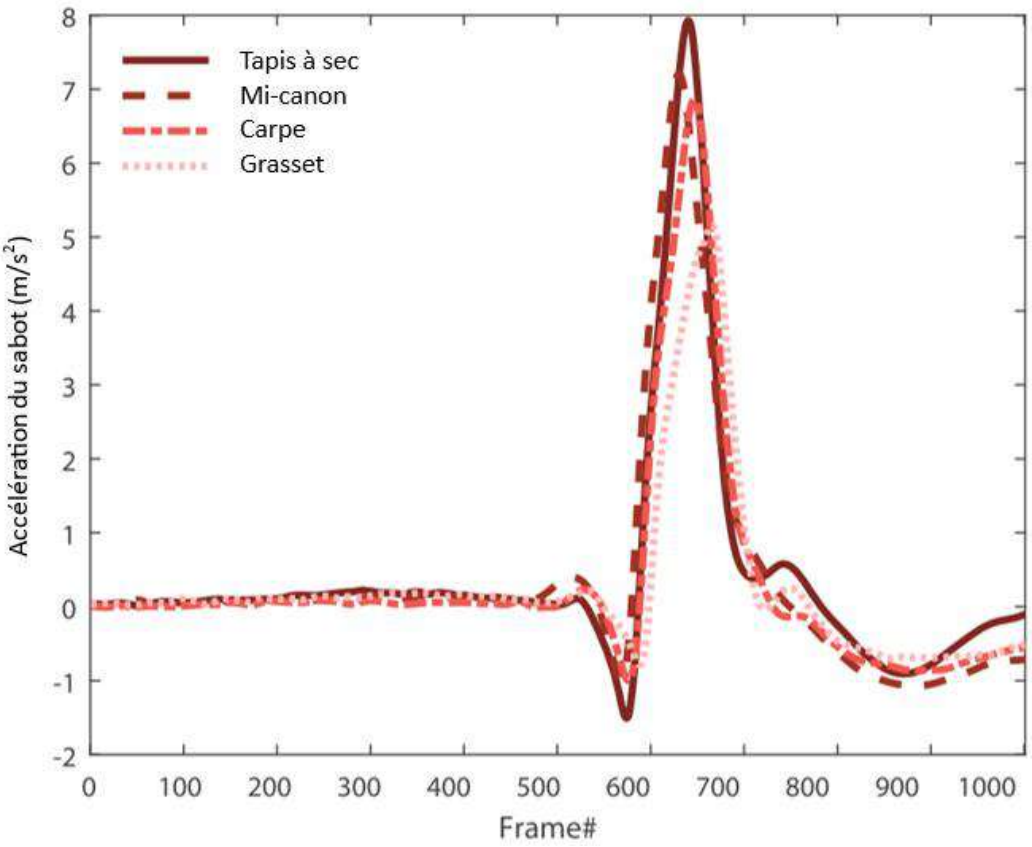


Figure 39 : Exemple de graphique représentant les mesures prises par l'accéléromètre placé au niveau du sabot durant un exercice sur tapis immergé à quatre hauteurs d'eau (sec, mi-canon, carpe, grasset) à une vitesse de 1,39 m/s, *d'après Greco-Otto et al. (2019)*.
Une foulée est isolée par extraction des données 500 frames avant et après le pic d'accélération du canon.

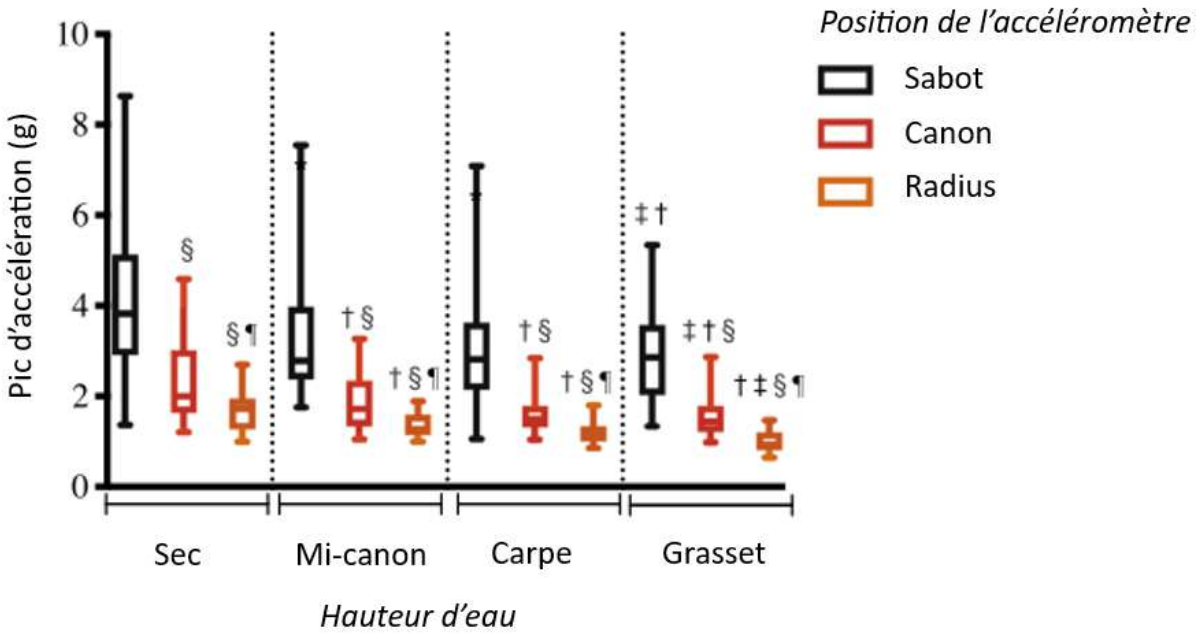


Figure 40 : Exemple de graphique représentant les pics d'accélération du sabot, canon et radius aux quatre hauteurs d'eau (sec, mi-canon, carpe, grasset) pour une vitesse de 0,83 m/s, *d'après Greco-Otto et al. (2019).*

Chaque paramètre est représenté par la médiane et l'écart interquartile pour les 21 chevaux de l'étude. † indique une différence significative avec le tapis à sec pour un même accéléromètre, ‡ indique une différence significative avec l'eau à mi-canon pour un même accéléromètre, § indique une différence significative par rapport à l'accéléromètre au sabot pour une même hauteur d'eau, ¶ indique une différence significative par rapport à l'accéléromètre au canon pour une même hauteur d'eau.

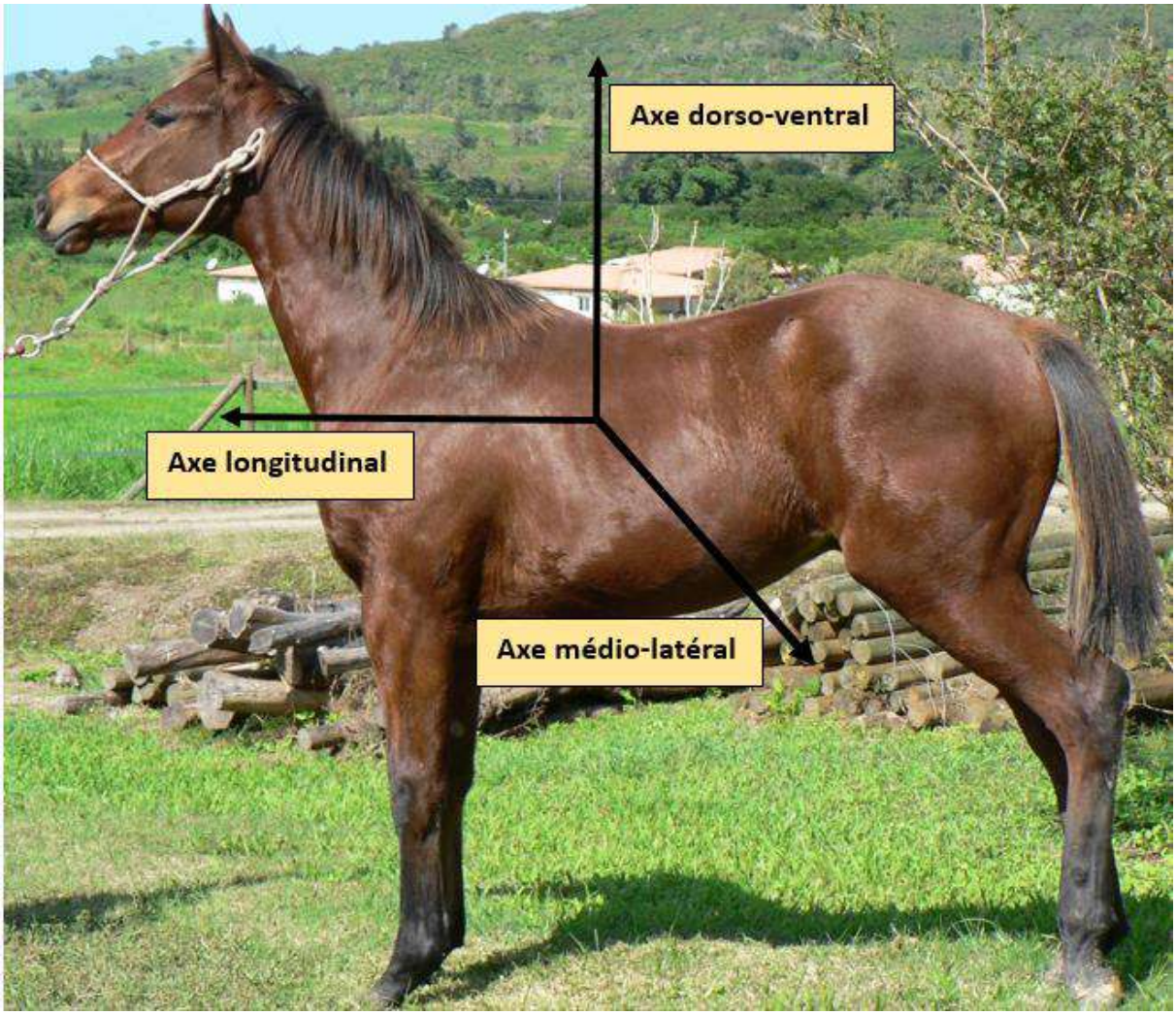
À retenir :
L'augmentation de la hauteur de l'eau lors de marche sur tapis immergé est associée à une réduction des pics d'accélération des segments osseux et une augmentation de l'atténuation des forces d'impact à travers les membres (Greco-Otto *et al.* 2019).

2.2. Étude des paramètres d'accélérométrie

Les différents paramètres d'accélérométrie et les axes anatomiques du cheval sont présentés dans le Tableau XX et la Figure 41 respectivement.

Tableau XX : Description des paramètres accélérométriques, *d'après López-Sanromán et al. (2012), Barrey (2014) et Saitua et al. (2020).*

	Paramètres	Unité	Signification
Paramètres spatiotemporels de la foulée	**Fréquence de foulées**	Foulée/s	Nombre de foulées par unité de temps.
	Longueur des foulées	mètre	/
Paramètres de coordination de la foulée	**Symétrie**	∅	Quantifie la similarité des accélérations gauches et droites.
	Régularité	∅	Quantifie la répétabilité des accélérations des foulées successives sur une période donnée.
Paramètres énergétiques de la foulée	**Activité dorso-ventrale**	W/kg	Intégrale du spectre de puissance obtenu par transformation de Fourier rapide à partir du signal d'accélération dorso-ventrale. Cette variable mesure la suspension du membre et l'activité de charge (pendant la phase d'appui).
	Activité longitudinale (crânio-caudale) = puissance de propulsion	W/kg	Intégrale du spectre de puissance obtenu par transformation de Fourier rapide à partir du signal d'accélération longitudinale. Cette variable quantifie les accélérations et décélérations selon l'axe longitudinal.
	Activité médio-latérale	W/kg	Intégrale du spectre de puissance obtenu par transformation de Fourier rapide à partir du signal d'accélération latérale. Cette variable quantifie les accélérations et décélérations selon l'axe latéral.
	Activité totale	W/kg	La somme des activités selon les trois axes (dorso-ventral, longitudinal, et médio-latéral) représente l'activité totale. Cette variable mesure la kinésie du corps.



<u>Figure 41</u> : Axes anatomiques chez le cheval, *source : Delacharlerie Aurore.*

2.2.1. Paramètres spatiotemporels de la foulée : fréquence, longueur et durée de la foulée

Plusieurs études s'intéressent aux variations de la fréquence, longueur et durée de la foulée lors de marche sur tapis immergé, à des **hauteurs d'immersion allant de la bande coronaire au grasset**, pour des **vitesses entre 0,8 et 1,7 m/s**, par rapport à la marche sur tapis à sec. Les méthodes et résultats détaillés de ces études sont donnés dans le tableau XXI et en Annexe 4.

Tableau XXI : Résultats des études s'intéressant à l'évolution des paramètres spatiotemporels de la foulée (longueur, fréquence, durée) en fonction de la profondeur de l'eau et de la vitesse lors de marche sur tapis immergé, *source : Delacharlerie Aurore.*

Études	Résumés des résultats
Scott *et al.* (2010)	- **Diminution** significative de la **fréquence** de la foulée avec de l'eau à hauteur du **carpe** *(0,51 ± 0,02 foulées/s)* et de l'**ulna** *(0,52 ± 0,03 foulées/s)* par rapport au contrôle *(0,57 ± 0,03 foulées/s).* Aucune différence significative observée à hauteur de l'articulation interphalangienne proximale *(0,54 ± 0,03 foulée/s)*. - **Augmentation** significative de la **longueur** de la foulée avec de l'eau à hauteur du **carpe** *(1,71 ± 0,08 m)* et de l'**ulna** *(1,68 ± 0,10 m)* par rapport au contrôle *(1,53 ± 0,09 m).* Aucune différence significative observée à hauteur de l'articulation interphalangienne proximale *(1,63 ± 0.10 m)*.
Mendez-Angulo *et al.* (2013)	**Augmentation** significative du pourcentage de durée de la **phase oscillante** et **diminution** significative du pourcentage de durée de la **phase d'appui** pour les membres antérieurs et postérieurs avec l'augmentation de la hauteur de l'eau.
Greco-Otto *et al.* (2019)	- A profondeur fixe, quand la vitesse augmente : augmentation de la fréquence de la foulée. - **A vitesse fixe, quand la hauteur d'eau augmente** : **diminution** significative de la **fréquence** de la foulée par rapport au tapis à sec.
Saitua *et al.* (2020)	**Diminution** de la **fréquence** de la foulée et **augmentation** de la **longueur** de la foulée pour des **hauteurs d'eau au boulet, carpe et grasset** par rapport au tapis à sec.
McCrae *et al.* (2021)	- **Diminution** significative de la **fréquence**, et **augmentation** significative de la **longueur** de la foulée avec de l'eau à hauteur du **carpe** et du **grasset** par rapport à la marche sur tapis à sec ou sur sable. - **Augmentation** significative du pourcentage de durée de la **phase oscillante** et **diminution** significative du pourcentage de durée de la **phase d'appui** avec de l'eau à hauteur du **carpe** et du **grasset** par rapport à la marche sur tapis à sec. En revanche ces pourcentages de durée de la phase oscillante et de la phase d'appui ne présentent pas de différence entre la marche dans l'eau et sur sable.
Tranquille *et al.* (2022a)	**Augmentation** significative de la **durée de la foulée avec l'augmentation de la hauteur de l'eau.**
Nankervis *et al.* (2023)	- A profondeur fixe, **quand la vitesse augmente** : **diminution significative de la durée de la foulée.** Une augmentation de vitesse de 1 km/h diminue la foulée de 0,2 s. - A vitesse fixe, **quand la hauteur d'eau augmente** (articulation métacarpo-phalangienne, carpe) : **augmentation significative de la durée de la foulée.**

L'exercice sur tapis immergé est associé à une **diminution** significative de la **fréquence** de la foulée et une **augmentation** significative de la **longueur** de la foulée avec l'augmentation de la hauteur de l'eau **du carpe au grasset** par rapport à la marche sur tapis à sec ou sur sable (Scott *et al.* 2010 ; Greco-Otto *et al.* 2019 ; Saitua *et al.* 2020 ; McCrae *et al.* 2021). L'augmentation de la hauteur de l'eau entraine une **augmentation** significative de la **durée** de la foulée (Tranquille *et al.* 2022a ; Nankervis *et al.* 2023), avec une **augmentation** significative du pourcentage de durée de la **phase oscillante** et une **diminution** significative du pourcentage de durée de la **phase d'appui** pour les membres antérieurs et postérieurs (Mendez-Angulo *et al.* 2013 ; McCrae *et al.* 2021).

L'augmentation de la vitesse du tapis pour une profondeur donnée entraine une **diminution** significative de la **durée** de la foulée (Nankervis *et al.* 2023), et donc une **augmentation** de la **fréquence** de la foulée (Greco-Otto *et al.* 2019). Nankervis *et al.* (2023) rapporte qu'une augmentation de vitesse de 1 km/h diminue la foulée de 0,2 s.

Ces modifications de mécanique de la foulée lors d'exercices aquatiques sont probablement liées à l'élévation de l'arc d'envol (voir partie II.1.1.1) qui correspond à une augmentation du déplacement vertical du membre, facilité par la flottabilité et en réponse à l'augmentation de la résistance aux déplacements dans le plan sagittal dans l'eau. La résistance de l'eau dans le plan sagittal contribue également à ralentir le mouvement (Scott *et al.* 2010 ; Greco-Otto *et al.* 2019 ; McCrae *et al.* 2021).
La réduction de la fréquence de la foulée est corrélée à la diminution des pics d'accélérations des membres lors d'exercice aquatique (voir partie II.2.1) (Greco-Otto *et al.* 2019).

Des variations sont observées lors des mesures de la foulée avec un accéléromètre placé au niveau du sternum ou du sacrum. Lors du positionnement au sacrum, la diminution de la fréquence, et l'augmentation de la longueur de la foulée sont décrites à partir d'une immersion au boulet. Lors de position au sternum, ces modifications ne sont observées qu'à partir d'une immersion au carpe. Ces résultats suggèrent que le comportement des membres antérieurs et postérieurs varie en réponse à l'immersion, probablement du fait des fonctions différentes des membres thoraciques et pelviens dans la locomotion (Muñoz *et al.* 2019).

À retenir :

Tableau XXII : Récapitulatif de l'évolution des paramètres spatiotemporels de la foulée (longueur, fréquence, durée) lors de marche sur tapis immergé, *source : Delacharlerie Aurore.*

Augmentation de la hauteur de l'eau	↗ Durée de la foulée avec ↗ %phase oscillante et ↘ %phase d'appui ↘ Fréquence de la foulée ↗ Longueur de la foulée
Augmentation de la vitesse	↘ Durée de la foulée ↗ Fréquence de la foulée

Les symboles signifient : ↗, une augmentation du paramètre ; ↘, une diminution du paramètre.

Les variations de la hauteur de l'eau et de la vitesse du tapis immergé ont toutes deux une influence sur la longueur et la fréquence de la foulée. La modulation de ces deux paramètres est donc importante à prendre en compte dans la construction d'un programme de réhabilitation, en fonction du schéma moteur recherché (Saitua *et al.* 2020).

2.2.2. Paramètres énergétiques de la foulée

Les différents paramètres accélérométriques de chevaux évoluant à différentes hauteurs d'eau et vitesses sur tapis immergé sont quantifiés à l'aide d'un analyseur 3D de la démarche (*Equimetrix ®, Centaure-Metrix®*), mesurant les accélérations selon les trois axes corporels (dorso-ventral, longitudinal, et médio-latéral) (Saitua *et al.* 2020). L'analyseur est placé au niveau de la :

- Région pectorale (PECT) : à proximité du centre de gravité, renseignant sur l'accélération des membres antérieurs.
- Ligne médiane du sacrum (SML) : renseignant sur l'accélération des membres postérieurs.

Tableau XXIII : Description des protocoles de l'étude menée par Saitua *et al.* (2020), *source : Delacharlerie Aurore.*

	Chevaux	Hauteurs d'eau	Vitesses
Protocole 1	n = 6 (4 croisés et 2 andalous)	- tapis à sec (contrôle) - boulet - carpe - grasset	- 1,7 m/s *(pour tapis à sec, boulet et carpe)* - 1,4 m/s *(pour grasset)*
Protocole 2	n = 5 (3 croisés et 2 andalous)		1,4 m/s

n : nombre de chevaux impliqués dans l'étude. Pour les deux protocoles, le poids moyen des chevaux est de 414 ± 45 kg.

Remarque : Avec de l'eau au niveau du grasset, les chevaux du protocole 1 n'ont pas été capables de maintenir la vitesse de 1,7 m/s, avec un recul sur le tapis lors des tentatives, en lien probablement avec une force de trainée trop importante, de sorte que la vitesse a été diminuée à 1,4 m/s. Comme les changements dans les paramètres d'accélérométrie du protocole 1 peuvent être associés aux différences de profondeur d'eau et de vitesse, le second protocole a été réalisé.

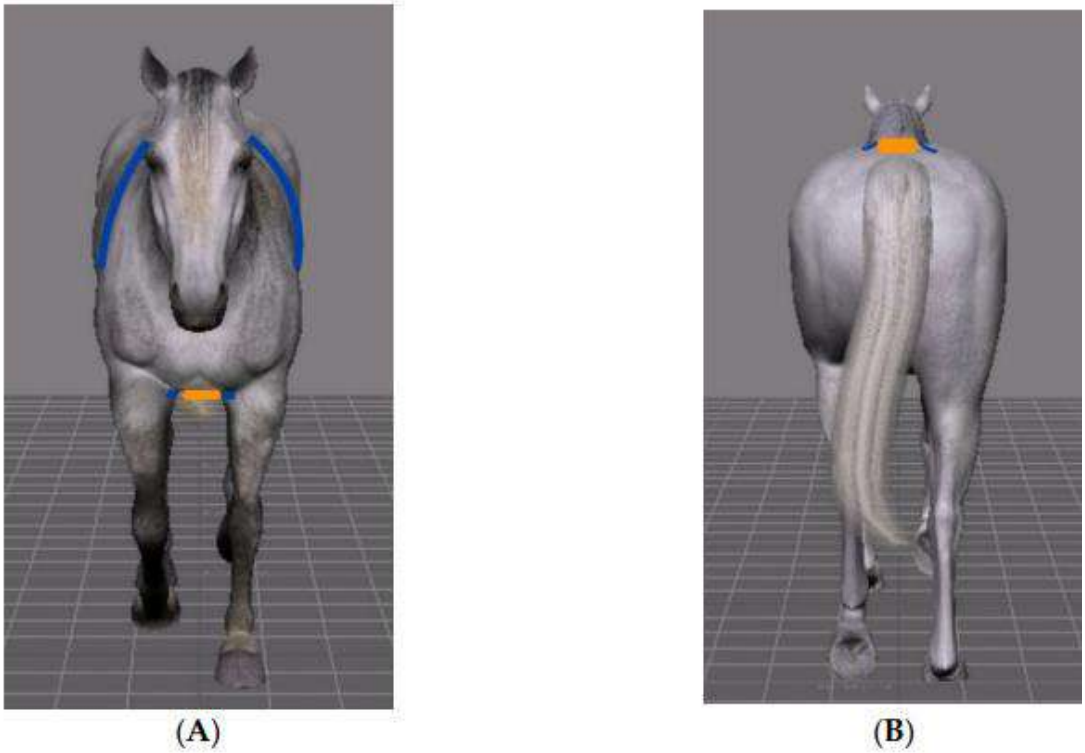


Figure 42 : Représentation de la position des accéléromètres (en orange) pour l'étude menée par Saitua *et al.* en 2020*, source : Saitua et al. (2022).*

(A) : fixé dans la région pectorale (PECT) avec une sangle. (B) : fixé sur la ligne médiane du sacrum (SML).

2.2.2.1. Activité totale

L'étude montre que pour l'accéléromètre placé :

- Au niveau de la région pectorale : l'activité totale est significativement supérieure pour une immersion au carpe, par rapport au tapis à sec ou au boulet.
- Au niveau du sacrum :
    - Protocole 1 : l'activité totale est significativement supérieure pour une immersion au carpe par rapport au boulet et au tapis à sec et pour une immersion au boulet par rapport au tapis à sec. Quand la vitesse est réduite pour l'immersion au grasset, l'activité totale diminue significativement en dessous de celle rapporté pour le tapis à sec.
    - Protocole 2 : la vitesse est maintenue constante entre les différentes hauteurs d'eau, l'activité totale augmente significativement avec l'immersion par rapport au tapis à sec mais sans différence entre les différentes hauteurs.

La puissance est dépendante de la vitesse. Une diminution de la vitesse provoque donc une diminution de la puissance. Par ailleurs, l'augmentation de la hauteur d'eau limite l'avancement dans la direction du mouvement du fait de l'augmentation de la flottabilité, ce qui peut contribuer à expliquer l'absence d'augmentation croissante de l'activité totale avec la hauteur d'eau au grasset.
Il a été décrit une réduction de l'activité totale après l'administration de différents sédatifs, comme la xylazine, la détomidine, et la rofimidine[91], et d'acépromazine[92]. Cette réduction est attribuée à la myorelaxation induite par les drogues. Ainsi, **l'augmentation de l'activité totale avec la hauteur d'eau, depuis le tapis à sec jusqu'à immersion au carpe, observée par Saitua *et al.* (2020), peut-elle être liée à une plus grande force musculaire générée**. La force musculaire résulte d'une combinaison de facteurs structuraux, neuromusculaires, hormonaux et métaboliques. Les facteurs neuromusculaires, qui correspondent à l'activation et au processus de recrutement des unités motrices, sont susceptibles de varier au cours d'une séance d'exercice, contrairement aux facteurs structuraux qui répondent à un entrainement chronique. Ainsi, les auteurs proposent d'expliquer les variations de puissance au cours de l'étude, en lien avec les différentes profondeurs d'immersion, par des facteurs neuromusculaires. **Le recrutement des unités motrices est modifié par l'exercice à différentes profondeurs d'eau.**

<u>À retenir :</u>

- L'activité totale augmente avec la profondeur de l'eau, jusqu'à atteindre le carpe (constaté à 1,7 m/s).
- Pour une immersion au grasset – on suppose du fait de la flottabilité – l'activité totale n'est pas significativement supérieure à celle pour l'eau au niveau du carpe (vitesse constante à 1,4 m/s).
- La diminution de la vitesse induit une diminution de l'activité totale (1,7 m/s à 1,4 m/s).
    - ⇨ Une combinaison adéquate de vitesse et profondeur d'eau peut être utile à la réhabilitation (et à l'entrainement) du cheval dont le niveau d'activité physique a été réduit.
    - ⇨ L'immersion au grasset permet d'améliorer la force musculaire (recrutement des unités motrices), tout en réduisant significativement la mise en charge des membres, ce qui pourrait limiter le risque de lésion musculosquelettique.

[91] *López-Sanromán, F.J.; Holmbak-Petersen, R.; Varela, M.; Del Alamo, A.S.; Santiago, I. Accelerometric comparison of the locomotor pattern of horses sedated with xylazine hydrochloride, detomidine hydrochloride, or romifidine hydrochloride. Am. J. Vet. Res. 2013, 4, 828–834.*
[92] *López-Sanromán, F.J.; Gómez-Cisneros, D.; Varela del Arco, M.; Santiago Llorente, I.; Santos González, M. The use of low doses of acepromazine as an aid for lameness diagnosis in horses: An accelerometric evaluation. Vet. Comp. Orthop. Traumatol. 2015, 28, 312–317.*

2.2.2.2. Activités et déplacements dorso-ventraux, longitudinaux et médio-latéraux

Une **augmentation significative du déplacement dorso-ventral (DVD) parallèle à une augmentation significative de l'activité dorso-ventrale (DVP)** pour les accéléromètres aux deux positions est montrée **lorsque la hauteur de l'eau augmente du tapis à sec au boulet, puis du boulet au carpe** (Saitua *et al.* 2020). Comme décrit pour l'activité totale avec l'accéléromètre au sacrum, une diminution significative des DVD et DVP est observée lors de l'immersion au grasset lorsque la vitesse est diminuée (protocole 1), mais pas lorsque la vitesse reste constante (protocole 2). L'activité dorso-ventrale et le déplacement dorso-ventral dépendent donc à la fois de la hauteur de l'eau et de la vitesse du mouvement.
L'exercice sur tapis immergé induit donc une augmentation significative des DVD et DVP lors d'une immersion du boulet au carpe par rapport au tapis à sec. Si ces modifications qui apparaissent lors de l'exercice dans l'eau persistent durant la locomotion terrestre, il y aurait un intérêt majeur à recommander l'utilisation du tapis immergé pour l'entrainement des chevaux de dressage et de saut d'obstacle.
En effet, les chevaux de dressage sont entrainés de sorte à améliorer leur coordination, souplesse et démarche ; le mouvement vers l'avant prend une composante davantage vers le haut, en parallèle d'une diminution de la fréquence de la foulée. Une augmentation du déplacement dorso-ventral de ces chevaux avec l'âge et l'entrainement, en parallèle d'une augmentation de la puissance musculaire, a été rapportée[93]. Par ailleurs, il a été montré que les jeunes chevaux de dressage présentant un meilleur déplacement dorso-ventral au pas et au trot et une meilleure activité longitudinale au pas, trot et canter, obtiennent de meilleurs scores dans les tests de performances, et font de meilleures performances durant leur première année de compétition de dressage[94].
Chez les chevaux de saut d'obstacle, la force produite par les membres postérieurs pour passer l'obstacle est un des facteurs principaux affectant le succès du saut, parce que cela détermine le vol balistique du centre de gravité. Des chevaux avec un meilleur déplacement dorso-ventral et une meilleure puissance dorso-ventrale seraient donc avantagés[95].

Néanmoins, l'augmentation des DVD et DVP apparait comme un facteur limitant à l'augmentation de l'activité longitudinale. Dans leur étude, Saitua *et al*. (2020) ne montrent pas de variation significative de l'activité longitudinale avec l'augmentation de la hauteur de l'eau. Parallèlement, une redistribution significative de l'activité totale est observée lors d'immersion au carpe par rapport au tapis à sec, avec une augmentation de l'activité dorso-ventrale aux dépens de l'activité longitudinale et médio-latérale.

[93] Barrey, E.; Desliens, F.; Poirel, D.; Biau, S.; Lemaire, S.; Rivero, J.L.; Langlois, B. Early evaluation of dressage ability in different breeds. Equine Vet. J. 2002, 34, 319–324.
[94] Biau, S.; Barrey, E. Relationships between stride characteristics and scores in dressage tests. Pferdeheilkunde 2004, 20, 1–4.
[95] Barrey, E.; Galloux, P. Analysis of the equine jumping technique by accelerometry. Equine Vet. J. 1997, 23, 45–49.

À retenir :
Une redistribution significative de l'activité totale apparait lors d'immersion au carpe par rapport au tapis à sec, avec une augmentation de l'activité dorso-ventrale aux dépens de l'activité longitudinale et médio-latérale.

Par la suite il sera donc important d'établir si après une session sur tapis immergé (Saitua *et al.* 2020) :

1- Les modifications persistent durant la locomotion terrestre.
   ⇨ L'utilisation du tapis immergé pour l'entrainement de chevaux dont l'activité longitudinale est primordiale, comme les chevaux d'endurance, devra être limitée. Mais, cela s'avèrera très utile pour l'entrainement des chevaux de saut d'obstacle et dressage.
2- Ou à l'inverse, si l'augmentation de l'activité totale résulte en une redistribution selon les trois axes anatomiques, et dépendante de l'exercice produit par le cheval.
   ⇨ N'importe quel cheval pourra bénéficier de l'exercice sur tapis immergé, puisque l'augmentation de l'activité totale pourra être redirigée vers n'importe lequel des trois axes anatomiques en fonction de l'exercice effectué.

3. Effets du travail sur tapis immergé sur la démarche terrestre

3.1. Effets immédiats après une session de travail sur tapis immergé

Tranquille *et al.* (2022b) ont cherché à déterminer l'effet d'un programme standard d'entrainement sur tapis immergé sur la cinématique des membres et les déplacements de la nuque, du garrot et du bassin lors de marche en main sur terre, en comparant les mesures avant et immédiatement après une session d'exercices aquatiques. Il est en effet possible de supposer que, par le recrutement ou l'activation de certains groupes musculaires en réponse à la marche dans l'eau, des changements biomécaniques pourraient être observés après une session sur tapis immergé.

Tableau XXIV : Caractéristiques et protocole de l'étude menée par Tranquille *et al.* (2022b), *source : Delacharlerie Aurore.*

Animaux	Protocole			
	Sur tapis immergé			Test
	Durée	Hauteur d'eau	Vitesse	
n = 6 chevaux Age = 15 ± 6.5 ans Taille = 164 ± 2 cm Poids = 539 ± 37 kg Exercés sur tapis immergé 2 fois par semaine depuis 6 à 24 mois.	19 min	Cinq hauteurs consécutives : - sur tapis à sec - à 7,5 cm (région de la bande coronaire) - à 21 cm (région du boulet) - à 34 cm (région du métacarpe proximal) - à 47 cm (région du radius distal)	1,6 m/s	Le cheval est marché en main deux fois en ligne droite sur 20 m, à une vitesse jugée confortable pour lui, avant et immédiatement après exercice sur le tapis immergé.

Aucune modification significative n'est rapportée concernant les déplacements de la nuque, du garrot ou du bassin, la durée de la foulée, l'angle articulaire des carpes, tarses, et boulets des membres antérieurs pour tout point de la foulée, et les angles de protraction et rétraction des membres antérieurs et postérieurs, après l'exercice aquatique décrit dans cette étude.
En revanche, **une diminution significative de l'extension des boulets postérieurs lors de la phase d'appui** est rapportée après l'exercice aquatique par rapport aux valeurs initiales. Une **augmentation de l'oscillation médio-latérale des tarses lors de la phase d'appui de la foulée** est également présente chez tous les chevaux après l'exercice sur tapis immergé. Dyson *et al.* (2018) ont proposé que

l'augmentation de l'instabilité (oscillation) du tarse reflète une **faiblesse musculaire**. L'augmentation d'oscillation observée peut donc être reliée à une fatigue musculaire localisée à l'issu de l'exercice aquatique, notamment les muscles responsables de la stabilisation des membres postérieurs, comme les muscles quadriceps et biceps fémoral. Il est probable que les chevaux de l'étude ne possédaient pas une force et une endurance musculaire suffisante leur permettant de maintenir le même schéma de locomotion sur terre avant et après travail sur tapis immergé.

McCrae *et al.* (2021) ont observé qu'immédiatement après une session d'exercice sur tapis immergé, **l'amplitude du mouvement du carpe** lors de marche sur sable est supérieure à celle avant la session ; et **l'élévation du coude et de l'épaule** lors de marche sur sable est supérieure à celle avant la session, et égale à celle observée lors d'immersion au grasset. Ces modifications ne semblent cependant pas perdurer dans le temps, puisqu'aucune différence n'est observée avant et après huit jours d'entrainement.

Saitua *et al.* (2022) montrent, lors d'exercice en longe 30 minutes après une session de 40 minutes d'exercice sur tapis immergé à 1,4 m/s, une **réduction des activités totale et longitudinale, du déplacement dorso-ventral et de la vitesse des chevaux**, principalement au trot et particulièrement pour l'accéléromètre placé au niveau de la ligne médiane du sacrum, pour une profondeur d'immersion au grasset. Ces résultats ont été attribués à la **fatigue** de l'exercice sur tapis immergé, associée à une plus grande force de traînée à cette profondeur. L'exercice dans l'eau à hauteur du grasset devrait donc être mis en place avec prudence chez les chevaux peu entrainés, avec éventuellement une réduction de la vitesse pendant la séance d'exercice à cette profondeur pour éviter la fatigue.

À retenir :
Les modifications de la locomotion rapportées sur terre après l'exercice aquatique semblent davantage liées à une fatigue musculaire après entrainement, retrouvée possiblement après tout type d'exercice suffisamment intense.
Des études supplémentaires sont nécessaires pour déterminer de la durée de ces modifications et comment d'autres vitesses de marche ou profondeur d'eau peuvent affecter le schéma locomoteur.

3.2. Effets sur le long terme

Les différentes études rapportées dans cette partie n'étudient pas ou ne mettent **pas en évidence d'effets ou de persistance à long terme sur la locomotion terrestre des modifications observées en termes de biomécanique** des membres et du dos lors d'exercice sur tapis immergé. Seuls McCrae *et al.* (2021) rapportent, **suite à huit jours d'entrainement sur tapis immergé, une augmentation de la flexion et une diminution de l'extension significatives de l'épaule** pour toutes les conditions (sur sable, tapis à sec, immersion au carpe et au grasset).
Des études supplémentaires, peut-être avec des durées d'entrainement supérieures, sont nécessaires.

Les modifications biomécaniques observées lors d'entrainement dans l'eau pourraient en effet avoir leur application sur terre. Par exemple, un cheval au pas sur terre, à une vitesse entre 1,2 et 1,8 m/s, présente une fréquence de foulée de 0,8 à 1,1 foulée/s, et une longueur de foulée entre 1,5 et 1,9 m[96]. Scott *et al.* (2010) rapportent une fréquence de foulée inférieure (0,51 foulée/s) et une longueur de foulée équivalente (1,7 m) pour des chevaux marchant à 0,9 m/s dans de l'eau au-dessus du carpe. Bien que la vitesse du tapis et la fréquence de foulée valent la moitié des valeurs rapportées pour un cheval au pas sur terre, la longueur de la foulée est elle comparable. Une immersion au-dessus du carpe permet donc de sélectionner un schéma de foulée plus lente et plus longue avec une réduction de la durée de la phase d'appui et une augmentation de la durée de la phase oscillante. Ce schéma de foulée adopté lors de marche dans l'eau peut avoir un intérêt pour l'entrainement des chevaux de dressage,

[96] *Clayton HM. Comparison of the stride kinematics of the collected, medium and extended walks in horses. Am J Vet Res 1995;56: 849–52.*

chez qui ces caractéristiques de foulée (augmentation de la longueur et diminution de la fréquence) sont recherchées (Tranquille *et al.* 2017).

À retenir :
Des études supplémentaires sont nécessaires afin d'étudier la persistance sur le long terme des modifications biomécaniques de la locomotion observées lors d'exercice du cheval sur tapis immergé. Plusieurs des modifications décrites dans cette partie trouveraient en effet des applications dans les différentes disciplines équestres.

III. Physiologie du cheval sur tapis immergé

1. Définition des paramètres d'évaluation de la condition physique (fitness) et de la charge de travail

Les capacités sportives supérieures de l'athlète équin sont permises par des adaptations physiologiques des différents systèmes de l'organisme : notamment une capacité aérobie maximale élevée, de larges réserves intramusculaires en substrats énergétiques (principalement du glycogène), l'aptitude à augmenter les capacités de transport de l'oxygène dans le sang au début de l'exercice via la contraction splénique, une allure et une thermorégulation efficaces (Hinchcliff, Geor 2008).

La mesure de certaines de ces variables physiologiques, qui évoluent avec l'entrainement, permet d'apprécier la fitness du cheval, ou la charge de travail associée à l'exercice. Evans (2007) et Greco-Otto *et al.* (2020) rapportent la mesure de la consommation d'oxygène, de la fréquence cardiaque, de la concentration en lactates dans le sang, et des paramètres respiratoires comme indicateurs significatifs.

1.1. La consommation d'oxygène maximale ou capacité maximale aérobie (Hinchcliff, Geor 2008 ; Poole, Erickson 2008 ; Ainsworth 2008 ; Pösö, Hyyppä, Geor 2008 ; Navas de Solis 2019)

La consommation d'oxygène est la quantité d'oxygène que le cheval peut transporter à travers le système respiratoire dans le sang artériel, et par le système cardiovasculaire jusqu'aux muscles pour la production d'énergie aérobie (Navas de Solis 2019). Durant la réalisation de tests de vitesse croissante, la consommation d'oxygène augmente de manière linéaire avec la vitesse jusqu'à un plateau, qui correspond à la consommation maximale en oxygène ou capacité maximale aérobie (VO2max).

Les athlètes équins ont une capacité maximale aérobie élevée, approximativement 2 à 2,5 fois supérieure à celle d'une Homme hautement entrainé (**142 mL O2/kg/min pour un *Thoroughbred*** (pur-sang galopeur) **et 138 mL O2/kg/min pour un *Standardbred***, contre 85 mL O2/kg/min pour un sprinter olympique) (Hinchcliff, Geor 2008 ; Ainsworth 2008).
La VO2max renseigne sur la capacité aérobie des muscles squelettiques et la condition cardiovasculaire de l'animal. Sa mesure permet de suivre les améliorations des capacités sportives liées à l'entrainement : une augmentation de la VO2max témoigne d'une amélioration de la capacité aérobie du cheval. La capacité maximale aérobie est également un des meilleurs indicateurs de la charge de travail associée à un exercice (Greco-Otto *et al.* 2020). Tout exercice à une intensité supérieure à la VO2max fait appel au métabolisme anaérobie.

Chez l'Homme, la VO2max augmente via l'entrainement, premièrement par des changements dans la stratégie respiratoire, avec une diminution de la fréquence respiratoire et une augmentation du volume tidal, ce qui diminue le travail respiratoire[97,98]. Chez le cheval, la fréquence respiratoire maximale n'est pas modifiée avec le conditionnement, potentiellement du fait d'une synchronisation entre le trot et la fréquence respiratoire chez les *Standardbred*[99], et d'un couplage locomotion-respiration observé à haute vitesse (canter et galop) chez les *Thoroughbred*[100] (Ainsworth 2008). L'augmentation de la VO2max chez le cheval est davantage liée à une amélioration de la fonction cardiaque, avec une

[97] *Rasmussen, B., Klausen, K., Clausen, J.P. and Trap-Jensen, J. (1975) Pulmonary ventilation, blood gases, and blood pH after training of the arms or the legs. Journal of Applied Physiology 38, 250 LP – 256.*
[98] *Tzankoff, S.P., Robinson, S., Pyke, F.S. and Brawn, C.A. (1972) Physiological adjustments to work in older men as affected by physical training. Journal of Applied Physiology 33, 346 LP – 350.*
[99] *Nyman G, Bjork M, Funkquist P, et al. Ventilation– perfusion relationships during graded exercise in the Standardbred trotter. Equine Vet J Suppl 1995; 18:63–69.*
[100] *Attenburrow DP, Goss VA. The mechanical coupling of lung ventilation to locomotion in the horse. Med Eng Phys 1994; 15:188–192.*

augmentation du volume d'éjection systolique et du débit cardiaque, mais aussi à une augmentation des capacités de diffusion musculaire de l'oxygène (Poole, Erickson 2008).

La mesure de la VO2max sur un tapis de course à haute vitesse est une pratique commune, bien qu'elle ne soit pas toujours vraiment représentative de l'activité du cheval ; les mesures sur le terrain sont plus complexes. Dans certains cas, le pic de consommation d'oxygène au cours d'un exercice est donc utilisé pour évaluer la performance aérobie sur le terrain.
Le pic de VO2 et la VO2max sont deux valeurs distinctes (Greco-Otto *et al.* 2020) :

- La VO2max est un paramètre calculé, et nécessite la réalisation d'un exercice standardisé selon des étapes d'intensité croissante, avec un contrôle rapproché de la vitesse.
- Le pic de VO2 est un paramètre mesuré, et utilise un exercice d'intensité supra-maximale, de durée suffisante, pour atteindre un état stable sans exigences spécifiques de vitesse. Il correspond à la valeur maximale de consommation d'oxygène atteinte au cours du test, mais n'est pas forcément la valeur maximale atteignable par l'animal. Une augmentation du pic de VO2 pourra être détectée parce qu'un exercice est d'intensité supérieure, de durée différente, ou dans des conditions d'ambiance différentes. Il est donc plus difficile d'attribuer une augmentation du pic de VO2 à une amélioration de la condition cardiovasculaire uniquement.

1.2. La fréquence cardiaque (Poole, Erickson 2008 ; McCrae 2019)

Le suivi de la fréquence cardiaque au cours de l'exercice et après l'exercice peut être un bon indicateur de la condition physique et de l'intensité de l'exercice.

La fréquence cardiaque du cheval augmente de manière linéaire avec la vitesse jusqu'à un plateau, défini comme la fréquence cardiaque maximale (FCmax) (entre 204 et 241 battements par minute). Elle n'est pas modifiée par l'entrainement.

La vitesse que le cheval peut atteindre à des fréquences cardiaques submaximales (140, 170 et 200 battements par minute – v140, v170 et v200) ou à fréquence cardiaque maximale (vFCmax) et le temps nécessaire après l'exercice pour récupérer la fréquence cardiaque de repos sont par exemple de bons indicateurs de la capacité cardiovasculaire et de la condition physique du cheval.
L'entrainement permet à l'animal d'effectuer le même exercice mais à une fréquence cardiaque diminuée. Ainsi par exemple v140, v170, v200 et vFCmax seront augmentées. Avec l'entrainement, le temps de récupération de la fréquence cardiaque de repos diminue.

Durant des tests à intensité submaximale, il faut tenir compte lors de l'interprétation de la fréquence cardiaque : de l'influence possible du stress, de l'excitation, de la douleur, de la déshydratation, de la température, ou d'atteintes respiratoires ou cardiovasculaires.

Il est intéressant de noter qu'il existe une relation linéaire entre le pourcentage de la FCmax et le pourcentage de la VO2max.

1.3. La concentration sanguine en lactates (Pösö, Hyyppä, Geor 2008 ; McCrae 2019)

Les lactates sont issus du métabolisme anaérobie, et leur concentration dans le sang augmente avec les exercices de haute intensité. La concentration sanguine en lactates varie chez le cheval en fonction de la vitesse, de l'allure, de la race, de la condition physique et du régime alimentaire[101]. La concentration en lactates dans le sang après un exercice peut varier jusqu'à 1,6 mmol/L suite à une course d'endurance, 21,6 mmol/L après une course de trot et 29,6 mmol/L après une course de galop.

[101] *MCGOWAN, C.M. and HAMPSON, B. (2016) Comparative exercise physiology. In Animal Physiotherapy: Assessment, Treatment and Rehabilitation of Animals. Eds C. McGowan and L. Goff. 2nd ed. John Wiley & Sons Ltd. pp 73–91.*

Le seuil de lactates vLa4 correspond à la vitesse pour laquelle la concentration sanguine en lactates atteint 4 mmol/L, et est un indicateur de la capacité aérobie. D'un point de vue métabolique, le seuil de lactates représente l'intensité de travail maximale pour laquelle l'adénosine triphosphate est produite de façon aérobie ; c'est-à-dire qu'il existe un état d'équilibre dans la concentration sanguine en lactates où les lactates sont libérés dans la circulation, principalement par les muscles, au même rythme qu'ils sont utilisés par d'autres tissus. Il a été montré que la concentration sanguine en lactates commence ensuite à augmenter de manière exponentielle pour des concentrations approchant 4 mmol/L.
L'entrainement permet une augmentation de vLa4, ce qui signifie que l'amélioration de la condition physique permet de retarder l'accumulation des lactates dans le sang : un cheval entrainé pourra courir plus vite avant que le seuil de lactates ne soit atteint.

2. Variations des différents paramètres physiologiques du cheval sur tapis immergé en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse

Lors d'exercice sur tapis immergé, la température de l'eau, la pression hydrostatique et la flottabilité sont à prendre en compte pour l'interprétation des paramètres physiologiques chez le cheval et l'Homme (Greco-Otto *et al.* 2017). En effet l'immersion, de par les propriétés physiques de l'eau, peut impacter les réponses physiologiques de l'organisme, ce qui rend plus difficile la comparaison des différents paramètres mesurés sur terre ou lors d'évolution dans l'eau. Lors d'exercice sur terre, la fréquence cardiaque et la consommation d'oxygène augmentent de façon linéaire avec l'intensité de l'exercice, jusqu'à une valeur maximale. Dans le Chapitre 3 sur l'Homme, nous avons montré que cette relation linéaire pouvait exister lors d'exercice sur tapis immergé, et que les réponses cardiorespiratoires peuvent être similaires entre des exercices réalisés sur tapis à sec ou tapis immergé (Silvers, Rutledge, Dolny 2007 ; Brubaker *et al.* 2011 ; Greene *et al.* 2011).

Plusieurs études s'intéressent aux variations des paramètres physiologiques lors de marche ou trot sur tapis immergé, à des **hauteurs d'immersion allant de la bande coronaire au grasset**, pour des **vitesses entre 0,9 et 5,5 m/s**, par rapport à la marche sur tapis à sec. Les méthodes et résultats détaillés de ces études sont donnés en Annexe 4, tableaux XXV (pour la fréquence cardiaque), XXVI (pour les paramètres de la ventilation), XXVII (pour la consommation en oxygène) et XXVIII (pour les paramètres métaboliques).

2.1. Fréquence cardiaque

Voss, Mohr, et Krzywanek (2002), et Scott *et al.* (2010) ne montrent **pas de variation significative de la fréquence cardiaque avec la hauteur de l'eau** (allant du tapis à sec au coude) pour une vitesse donnée. Scott *et al.* (2010) proposent que les modifications de la cinématique du mouvement en réponse à l'augmentation de résistance dans le plan transverse lors de marche dans l'eau, entre le sabot et le carpe à vitesse constante, ne sont pas accompagnées d'une augmentation concomitante de la charge de travail. En revanche Voss, Mohr, et Krzywanek (2002) soulignent une augmentation de la fréquence cardiaque avec la charge de travail : depuis une charge facile (marche sur tapis à sec) à une charge plus intense (trot avec immersion au carpe ou au coude).

De la même façon, Lindner, Wäschle, et Sasse (2012) ne rapportent pas de variation significative de la fréquence cardiaque avec la hauteur de l'eau (entre 20 et 77 % de la hauteur au garrot), pour une vitesse donnée supérieure (5,5 m/s). **La stabilisation de la fréquence cardiaque malgré l'augmentation de la hauteur de l'eau et des forces de résistance au déplacement peut s'expliquer par l'augmentation de la flottabilité qui s'oppose au poids du corps, et de la pression hydrostatique**. Plus le thorax du cheval est immergé dans l'eau, plus le gradient de pression hydrostatique se développe, augmentant le retour veineux, et le volume d'éjection systolique, expliquant l'absence d'augmentation de la fréquence cardiaque à des profondeurs au-delà de 50 % de la hauteur du garrot.

Par ailleurs, contrairement à ce qui est observé lors d'exercice sur terre, une relation linéaire entre la fréquence cardiaque et la vitesse jusqu'à une fréquence cardiaque maximale n'est pas observée lors d'exercice sur tapis immergé. La relation entre la vitesse et la fréquence cardiaque semble dépendre de la profondeur de l'eau. Lindner, Wäschle, et Sasse (2012) trottent des chevaux sur tapis immergé à vitesse croissante (entre 3,5 et 5,5 m/s) et profondeur d'immersion constante (10, 50 ou 80 % de la hauteur au garrot). **Une augmentation de la vitesse induit une augmentation de la fréquence cardiaque uniquement pour un faible niveau d'immersion** (10 et 50 %). **Lorsque le niveau d'eau atteint 80 %, la fréquence cardiaque reste constante malgré l'augmentation de la vitesse**.
Pour toutes les profondeurs et vitesses de l'étude, la fréquence cardiaque évolue entre 120 et 140 battements par minute. **Un haut niveau d'eau ne semble pas constituer la plus haute intensité d'exercice sur tapis immergé, et l'augmentation de la vitesse ne semble pas induire d'augmentation de la fréquence cardiaque quand l'immersion est profonde**.
Ces conclusions sont en accord avec des études menées chez l'Homme, où des plateaux ou une réduction de la fréquence cardiaque lors d'exercices avec une profondeur d'eau croissante ont été montrés (voir Chapitre 3).

Plus récemment, Greco-Otto *et al.* (2017) ont montré que les variations de hauteur d'eau et de vitesse affectent la charge de travail sur tapis immergé, avec un impact plus important de la hauteur de l'eau sur l'intensité de l'exercice que la vitesse. **Pour une vitesse donnée, une augmentation significative de la fréquence cardiaque avec la hauteur de l'eau (tapis à sec au grasset) est observée**, avec un pic de fréquence cardiaque au plus haut niveau d'eau et plus grande vitesse (grasset, 1,39 m/s), suggérant que ces conditions créent probablement la charge de travail la plus importante. Ces résultats diffèrent de ceux rapportés plus haut par Voss, Mohr, et Krzywanek (2002), Scott *et al.* (2010), et Lindner, Wäschle, et Sasse (2012), peut-être du fait des différences de niveau d'eau et vitesse entre les protocoles.
La fréquence cardiaque maximale d'un *Standardbred* d'âge moyen (15,2 ± 0,04 ans) est de 213 ± 3 bpm[102]. En supposant que les chevaux utilisés dans l'étude de Greco-Otto *et al*. (2017) présentent des valeurs de fréquence cardiaque maximale similaires, il est possible d'établir que le travail dans l'eau, entre 1,11 et 1,39 m/s à des hauteurs d'eau entre mi-canon et le grasset, produit des fréquences cardiaques entre 27,7 et 32,7 % de la fréquence cardiaque maximale. Une relation linéaire entre la fréquence cardiaque et la vitesse n'est de nouveau pas observée, probablement du fait des vitesses relativement faibles étudiées.

À retenir :
Les études rapportent des résultats contradictoires : pour une vitesse donnée, l'augmentation de la hauteur de l'eau induit soit une absence de variation significative de la fréquence cardiaque, soit une augmentation significative de la fréquence cardiaque.
Il ne semble pas exister de relation linéaire entre la vitesse et la fréquence cardiaque lors d'exercice aquatique, avec une absence d'augmentation de la fréquence cardiaque lors d'augmentation de la vitesse quand l'immersion est profonde.

[102] *Betros C, Mckeever K, Kearns C, Malinowski K. Effects of ageing and training on maximal heart rate and V O 2max. Equine Exerc Physiol. 2002;34:100–5.*

<u>Tableau XXV</u> : Résultats des études s'intéressant à l'évolution de la fréquence cardiaque en fonction de la profondeur de l'eau et de la vitesse lors de marche sur tapis immergé, *source : Delacharlerie Aurore.*

<table>
<tr><th>Études</th><th>Fréquence cardiaque (FC)</th></tr>
<tr><td>Voss, Mohr, et Krzywanek (2002)</td><td>- Pour une vitesse donnée (pas, trot) : absence d'augmentation significative avec l'augmentation de la hauteur d'eau (à sec, carpe, coude).
- Pour une profondeur donnée : augmentation significative (18 bpm) entre la marche et le trot.
Fréquence cardiaque entre 69 ± 15,4 bpm (marche, à sec), 80 bpm (marche au carpe) et 96 ± 11,8 bpm (trot au coude).</td></tr>
<tr><td>Scott et al. (2010)</td><td>Absence de variation significative avec l'augmentation de la hauteur de l'eau.
Fréquence cardiaque entre 60 et 64 ± 8 bpm (hauteur d'eau entre le sabot et l'ulna).</td></tr>
<tr><td>Lindner, Wäschle, et Sasse (2012)</td><td>- Pour une hauteur d'eau donnée, la fréquence cardiaque a tendance à augmenter avec la vitesse de course (entre 3,5 et 5,5 m/s) jusqu'à un plateau (fréquence cardiaque initiale à 40 bpm puis plateau entre 120 et 140 bpm) :
<table>
<tr><td>Hauteur de l'eau</td><td></td><td colspan="5">10 % de la hauteur au garrot</td><td colspan="5">50 % de la hauteur au garrot</td><td colspan="5">80 % de la hauteur au garrot</td></tr>
<tr><td>Vitesse (m/s)</td><td rowspan="2">1,6 m/s (Echauffement)</td><td>3,5</td><td>4</td><td>4,5</td><td>5</td><td>5,5</td><td>3,5</td><td>4</td><td>4,5</td><td>5</td><td>5,5</td><td>3,5</td><td>4</td><td>4,5</td><td>5</td><td>5,5</td></tr>
<tr><td>FC</td><td>I*</td><td>I*</td><td>I*</td><td>I</td><td>I</td><td>I*</td><td>I*</td><td>C</td><td>C</td><td>C</td><td>I*</td><td>C</td><td>C</td><td>C</td><td>C</td></tr>
</table>
I = augmentation par rapport à l'étape précédente ; C = constant par rapport à l'étape précédente ; D = diminution par rapport à l'étape précédente ; * = variation significative.
- Pour une vitesse donnée, absence de variation significative de la fréquence cardiaque avec l'augmentation de la hauteur de l'eau (fréquence cardiaque évoluant entre 120 et 160 bpm) :
<table>
<tr><td>Vitesse</td><td colspan="5">5,5 m/s</td></tr>
<tr><td>Hauteur de l'eau</td><td>20 % de la hauteur au garrot</td><td>35 % de la hauteur au garrot</td><td>49 % de la hauteur au garrot</td><td>63 % de la hauteur au garrot</td><td>77 % de la hauteur au garrot</td></tr>
<tr><td>FC</td><td>I*</td><td>C</td><td>C</td><td>C</td><td>C</td></tr>
</table>
I = augmentation par rapport à l'étape précédente, C = constant par rapport à l'étape précédente, D = diminution par rapport à l'étape précédente, * = variation significative.</td></tr>
<tr><td>Greco-Otto et al. (2017)</td><td>Pour une vitesse donnée : augmentation de la FC avec la hauteur de l'eau.
- Pour de l'eau à hauteur du carpe ou du grasset, FC est significativement supérieure au tapis à sec pour les 3 vitesses.
- Pour l'eau à mi-canon, FC est significativement supérieure au tapis à sec pour une marche à 1,25 m/s et 1,39 m/s.
- Pour l'eau au grasset, FC est significativement supérieure à l'eau à mi-canon pour les 3 vitesses.
L'exercice dans l'eau produit des fréquences cardiaques médianes entre 59 bpm (mi-canon, 1,11m/s) et 69 bpm (grasset, 1,39 m/s).

Aucune corrélation n'est observée entre FC et VO2.</td></tr>
</table>

2.2. Paramètres de la ventilation

Greco-Otto *et al.* (2017) ont suivi l'évolution des paramètres de la ventilation chez des chevaux *Quarter Horses* lors d'exercices sur tapis immergé à différentes vitesses et hauteurs d'eau. Lors de l'évolution sur tapis immergé, lorsque la charge de travail est minimale, les chevaux présentent une respiration plus erratique, probablement parce que l'effort demandé n'est pas suffisant pour induire une respiration rythmique et contrôlée reflétant le niveau de dépense énergétique. **Lorsque la charge de travail augmente, avec de l'eau au grasset, à vitesse constante, les chevaux commencent à respirer plus lentement et profondément, comme montré par l'augmentation du volume tidal et la diminution de la fréquence respiratoire**. Cette stratégie respiratoire favorise la ventilation alvéolaire et les échanges gazeux (Greco-Otto *et al.* 2017).

Pour les *Quarter Horses* de l'étude, la fréquence respiratoire observée lors de l'évolution sur tapis immergé est d'environ 46 respirations/min, à mi-chemin entre celle rapportée lors de la nage[103] (environ 22 respirations/min) et celle lors de marche sur tapis à sec (*Thoroughbreds* – environ 65 respirations/min à 1,6 m/s[104], *Standardbreds* – environ 79 respirations/min à 1,7 m/s[105]). Le volume tidal mesuré sur tapis immergé, avec une médiane à 4,9 L (4,53-5,68), est lui similaire aux valeurs obtenues sur tapis à sec chez des *Thoroughbreds*[104] (VT = 5,8 L à 1,6 m/s) et *Standardbreds*[105] (VT = 5,0 L à 1,7 m/s). Cependant, alors que le volume tidal augmente avec le niveau d'eau et la vitesse, la ventilation minute atteint un pic à mi-canon puis diminue au grasset. L'explication physiologique pour ces différences de variation dans les paramètres de ventilation ne peut être fournie par les données de l'étude.

Durant un exercice terrestre, l'ampleur d'augmentation du débit respiratoire est fonction de l'intensité et de la durée de l'exercice. Sur tapis à sec, le volume tidal et la ventilation minute augmentent de façon linéaire avec la vitesse, en corrélation avec l'augmentation de l'activité des muscles inspiratoires[103,105] (Ainsworth 2008). Greco-Otto *et al.* (2017) observent ce même rapport entre la vitesse et les paramètres respiratoires (volume tidal et ventilation minute) lors d'exercice à une profondeur donnée sur tapis immergé.

À retenir :

Pour une vitesse donnée, l'augmentation de la profondeur d'immersion ne présente aucun effet significatif sur la fréquence respiratoire, mais est associée à une augmentation significative du volume tidal. Lorsque la charge de travail augmente, avec de l'eau au grasset à vitesse constante, les chevaux commencent à respirer plus lentement et profondément, ce qui favorise la ventilation alvéolaire et les échanges gazeux.

Pour une profondeur donnée, le volume tidal et la ventilation minute augmentent de façon linéaire avec la vitesse.

De façon générale, tant que les échanges gazeux pulmonaires sont optimaux, ce qui a été montré aux charges de travail induites par un exercice sur tapis immergé, la consommation d'oxygène est déterminée davantage par le débit cardiaque et les ajustements circulatoires qui augmentent l'apport d'oxygène aux muscles, et la quantité d'oxygène utilisée par ces muscles (différence artério-veineuse en oxygène), que par la ventilation minute (Greco-Otto *et al.* 2017).

---

[103] *Hobo S, Yoshida K, Yoshihara T. Characteristics of respiratory function during swimming exercise in thoroughbreds. J Vet Med Sci. 1998;60:687–9. Available from: http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9673938.*

[104] *Art T, Anderson L, Woakes AJ, et al. Mechanics of breathing during strenuous exercise in thoroughbred horses. Resp Physiol 1990; 82:279–294.*

[105] *Art T, Lekeux P. Ventilatory and arterial blood gas tension adjustments to strenuous exercise in Standardbreds. Am J Vet Res 1995; 56:1332–1337.*

<u>Tableau XXVI</u> : Résultats de l'étude menée par Greco-Otto *et al.* (2017) s'intéressant à l'évolution des paramètres de la ventilation en fonction de la profondeur de l'eau et de la vitesse lors de marche sur tapis immergé, *source : Delacharlerie Aurore.*

Étude	Ventilation		
	Fréquence respiratoire (FR)	**Volume tidal (VT)**	**Ventilation minute (VM)**
Greco-Otto *et al.* (2017)	- **Aucun effet de la vitesse** sur la FR pour le **tapis à sec**. - **Aucun effet** significatif de **l'immersion** sur la FR **par rapport au tapis à sec**. *Tendance :* pour une vitesse donnée, la FR **augmente avec la hauteur de l'eau jusqu'au carpe, puis diminue au grasset**. FR est alors significativement supérieure pour l'eau à mi-canon et carpe par rapport au grasset (valeur la plus basse au grasset, la plus haute au carpe) pour toutes les vitesses.	- Pour une profondeur donnée, **augmentation** du VT **avec la vitesse de marche.** - Pour une vitesse donnée, **augmentation** du VT **avec la profondeur de l'eau** : o Au **grasset**, VT est significativement **supérieur au tapis à sec, et à l'eau à mi-canon et au carpe** pour les 3 vitesses. o **A mi-canon et carpe**, VT est significativement **supérieur au tapis à sec** pour une marche à 1,25 m/s et 1,39 m/s.	- *Tendance :* pour une profondeur donnée, **augmentation** de VM **avec la vitesse de marche**. - *Tendance :* pour une vitesse donnée, VM **augmente avec la hauteur de l'eau jusqu'au carpe, puis diminue au grasset** : o VM est **significativement supérieure pour l'eau à mi-canon et carpe par rapport au grasset**, pour toutes les vitesses. o VM est **significativement supérieure pour l'eau au carpe par rapport au contrôle** pour toutes les vitesses. o VM est **significativement supérieure pour l'eau à mi-canon par rapport au contrôle** pour 1,25 et 1,39 m/s.

2.3. Consommation en oxygène

Greco-Otto *et al.* (2017) s'intéressent pour la première fois à la consommation d'oxygène lors d'exercice sur tapis immergé, et rapportent une influence de la hauteur de l'eau et de la vitesse du tapis :

- Pour une vitesse donnée (1,11 à 1,39 m/s), **l'augmentation du niveau d'eau (du tapis à sec au grasset) entraine une augmentation de la consommation d'oxygène**. Par exemple, les valeurs hautes médianes à 1,39 m/s pour le contrôle (tapis à sec) sont de 8,93 mL/kg/min et pour l'eau au grasset de 16,7 mL/kg/min. De la même façon dans une étude suivante, la valeur médiane de VO2 à 1,45 m/s sur tapis à sec est de 14,6 mL/kg/min, et pour une immersion au grasset est de 22 mL/kg/min (Greco-Otto *et al.* 2020). Ces valeurs sont comparables à celles rapportées chez des *Thoroughbreds*[106] lors d'exercice sur tapis à sec à 1,6 m/s : 20,2 mL/kg/min.
- Pour un niveau d'immersion donné (mi-canon, carpe, grasset), **l'augmentation de la vitesse (1,11 à 1,39 m/s) entraine une augmentation de la consommation d'oxygène**.

L'augmentation malgré tout relativement faible de la consommation d'oxygène répond à l'augmentation limitée de la fréquence cardiaque (voir partie précédente (Greco-Otto *et al.* 2017)). La similitude d'évolution des deux variables est attendue, du fait de leur association via l'équation de Fick. Même lors d'exercice au grasset, l'augmentation des deux variables est limitée, ce qui permet de qualifier le **travail sur tapis immergé d'exercice d'intensité submaximale**.

Tableau XXVII : Résultats des études s'intéressant à l'évolution de la consommation en oxygène en fonction de la profondeur de l'eau et de la vitesse lors de marche sur tapis immergé, *source : Delacharlerie Aurore.*

Études	Consommation en oxygène (VO2)
Greco-Otto *et al.* (2017)	- Pour une **hauteur d'eau donnée** (mi-canon, carpe, grasset) : **VO2 est supérieure à 1,39 m/s par rapport à 1,11 m/s**. - Pour le **tapis à sec : pas de différence significative de VO2 avec la vitesse**. - Pour une **vitesse donnée, VO2 augmente avec l'augmentation du niveau de l'eau** : o Pour de l'eau à hauteur du **carpe ou du grasset**, VO2 est **significativement supérieure par rapport au tapis à sec** pour les 3 vitesses. o Pour l'eau à **mi-canon**, VO2 est **significativement supérieure au tapis à sec** pour une marche à 1,25 m/s et 1,39 m/s. o Pour de l'eau à hauteur du **grasset**, VO2 est **significativement supérieure à l'eau à mi-canon** pour les 3 vitesses. *L'exercice dans l'eau produit des VO2 entre 10,44 et 16,70 mL/kg/min (hauteurs d'eau entre mi-canon et grasset, vitesses entre 1,11 et 1,39 m/s).*
Greco-Otto *et al.* (2020)	La charge de travail, évaluée par la VO2, est **significativement supérieure pour une immersion au grasset par rapport au tapis à sec** : - Immersion au **grasset à 1,45 m/s** : Valeur médiane de **VO2 = 22 ml/kg/min = 21,7% du pic de VO2 avant entrainement**. - **Tapis à sec à 1,45 m/s** : Valeur médiane de **VO2 = 14,6 ml/kg/min = 15,5% du pic de VO2 avant entrainement**.

[106] *Art T, Anderson L, Woakes AJ, et al. Mechanics of breathing during strenuous exercise in thoroughbred horses. Resp Physiol 1990; 82:279–294.*

À retenir :
Pour une vitesse donnée, l'augmentation de la profondeur d'immersion est associée à une augmentation de la consommation d'oxygène.
Pour un niveau d'immersion donné, l'augmentation de la vitesse est associée à une augmentation de la consommation d'oxygène.
Ces augmentations de la consommation d'oxygène restent relativement faibles, ce qui permet de qualifier le travail sur tapis immergé d'exercice d'intensité submaximale.

2.4. Paramètres métaboliques

Plusieurs études se sont intéressées à l'évolution de la **concentration sanguine en lactates** lors d'exercice sur tapis immergé, à différentes hauteurs d'immersion et vitesse, et rapportent toutes des **valeurs inférieures au seuil de lactates (4 mmol/L), traduisant un métabolisme aérobie** (Voss, Mohr, Krzywanek 2002 ; Lindner, Wäschle, Sasse 2012 ; Vincze *et al.* 2013 ; Greco-Otto *et al.* 2017).
Lindner, Wäschle, et Sasse (2012) ont étudié l'effet de l'augmentation de la hauteur de l'eau (entre 20 et 77 % de la hauteur au garrot), à une vitesse de 5,5 m/s (trot) sur tapis immergé, sur la concentration sanguine en lactates. Les auteurs rapportent que les lactates ont tendance à augmenter jusqu'à un plateau, puis à diminuer avec l'augmentation de la hauteur d'eau. Cette diminution des lactates, observée lorsque le niveau d'eau atteint 63 à 77 % de la hauteur du garrot, peut s'expliquer par différents facteurs : l'augmentation de la flottabilité associée, une modification des proportions des masses musculaires impliquées dans la locomotion, l'inhibition de la production de lactates par glycolyse anaérobie du fait de la diminution de la température musculaire (en lien avec l'immersion), et une diminution de la clairance musculaire des lactates par vasoconstriction.

L'activité plasmatique de la **créatine phosphokinase** (CK) a également été mesurée dans plusieurs études pour décrire les effets de la charge de travail associée à l'exercice sur tapis immergé sur les muscles et comme indicateur d'une potentielle rhabdomyolyse.
Une **augmentation continue puis une stabilisation des CK** sont observées lors d'augmentation de la vitesse pour une profondeur d'immersion donnée, et lors d'augmentation du niveau d'eau pour une vitesse donnée (Lindner, Wäschle, Sasse 2012). Pour l'ensemble des exercices sur le tapis immergé, les valeurs rapportées sont comprises entre 30 et 75 u/L. De la même façon, Borgia, Valberg, et Essen-Gustavsson (2010) rapportent une activité plasmatique des CK dans les normales sur l'ensemble des entrainements sur tapis immergé (272,4 ± 52,8 u/L).

À retenir :
Lors d'exercice sur tapis immergé, les concentrations sanguines en lactates rapportées pour différentes hauteurs d'immersion et vitesses sont inférieures au seuil de lactates (4 mmol/L), traduisant un métabolisme aérobie. L'activité plasmatique des CK apparait dans les normales sur l'ensemble des entrainements sur tapis immergé.

<u>Tableau XXVIII</u> : Résultats des études s'intéressant à l'évolution de la concentration plasmatique en lactates en fonction de la profondeur de l'eau et de la vitesse lors de marche sur tapis immergé, *source : Delacharlerie Aurore.*

<table>
<tr><th>Études</th><th>Concentration plasmatique en lactates</th></tr>
<tr><td>Voss, Mohr, et Krzywanek (2002)</td><td>Absence d'augmentation significative avec la hauteur de l'eau ou la vitesse lors d'exercice par rapport au repos.
Variations des concentrations entre 0,59 mmol/L et 1,24 mmol/L.</td></tr>
<tr><td>Lindner, Wäschle, et Sasse (2012)</td><td>- Pour une hauteur d'eau donnée, tendance de la concentration sanguine en lactates à augmenter jusqu'à un plateau puis voire à diminuer avec l'augmentation de la vitesse. Variations des concentrations entre 1 et 2,3 mmol/L.
<table>
<tr><td>Hauteur de l'eau</td><td rowspan="3">1,6 m/s (Echauffement)</td><td colspan="5">10 % de la hauteur au garrot</td><td colspan="5">50 % de la hauteur au garrot</td><td colspan="5">80 % de la hauteur au garrot</td></tr>
<tr><td>Vitesse (m/s)</td><td>3,5</td><td>4</td><td>4,5</td><td>5</td><td>5,5</td><td>3,5</td><td>4</td><td>4,5</td><td>5</td><td>5,5</td><td>3,5</td><td>4</td><td>4,5</td><td>5</td><td>5,5</td></tr>
<tr><td>Concentration en lactates</td><td>I*</td><td>I*</td><td>I*</td><td>I</td><td>I</td><td>I*</td><td>I*</td><td>I*</td><td>I</td><td>C</td><td>I</td><td>I*</td><td>I*</td><td>C</td><td>D</td></tr>
</table>
I = augmentation par rapport à l'étape précédente ; C = constant par rapport à l'étape précédente ; D = diminution par rapport à l'étape précédente ; * = variation significative.
- Pour une vitesse donnée, tendance de la concentration sanguine en lactates à augmenter jusqu'à un plateau puis à diminuer avec l'augmentation de la hauteur d'eau. Variations des concentrations entre 1 et 2 mmol/L.
<table>
<tr><td>Vitesse</td><td colspan="5">5,5 m/s</td></tr>
<tr><td>Hauteur de l'eau</td><td>20 % de la hauteur au garrot</td><td>35 % de la hauteur au garrot</td><td>49 % de la hauteur au garrot</td><td>63 % de la hauteur au garrot</td><td>77 % de la hauteur au garrot</td></tr>
<tr><td>Concentration en lactates</td><td>I*</td><td>I*</td><td>C</td><td>D</td><td>D</td></tr>
</table>
I = augmentation par rapport à l'étape précédente, C = constant par rapport à l'étape précédente, D = diminution par rapport à l'étape précédente, * = variation significative.</td></tr>
<tr><td>Greco-Otto et al. (2017)</td><td>Absence de variations significatives entre les différentes conditions, avec une valeur médiane inférieure à 1 mmol/L et un pic à 1,7 mmol/L.</td></tr>
</table>

À retenir :

L**e travail sur tapis immergé est principalement une forme d'exercice aérobie.** Contrairement à la nage, où les fréquences cardiaques peuvent atteindre 200 battements/min, l'exercice sur tapis immergé sera peu efficace comme substitut à un travail de canter ou de galop au sein d'un programme d'entrainement (Scott *et al.* 2010).

Les chevaux peuvent atteindre une **charge de travail significative, lors d'exercice sur tapis immergé, via la mise en place de protocoles à faible vitesse et haut niveau d'eau** (Greco-Otto *et al.* 2017). L'intensité du travail associé reste néanmoins légère.

La hauteur de l'eau dicte l'intensité de l'exercice, par l'augmentation des forces de résistance au mouvement des membres. Cependant, cette propriété est vérifiée uniquement jusqu'à un certain point, comme cela a été montré Chapitre 3 chez l'Homme. En effet, chez ce dernier, lorsque le niveau d'eau dépasse la taille, les demandes métaboliques diminuent, avec une baisse de la consommation d'oxygène, car la résistance est partiellement contrebalancée par la flottabilité. La hauteur d'eau optimale pour le conditionnement chez le cheval n'a pas encore été définie.

À retenir :

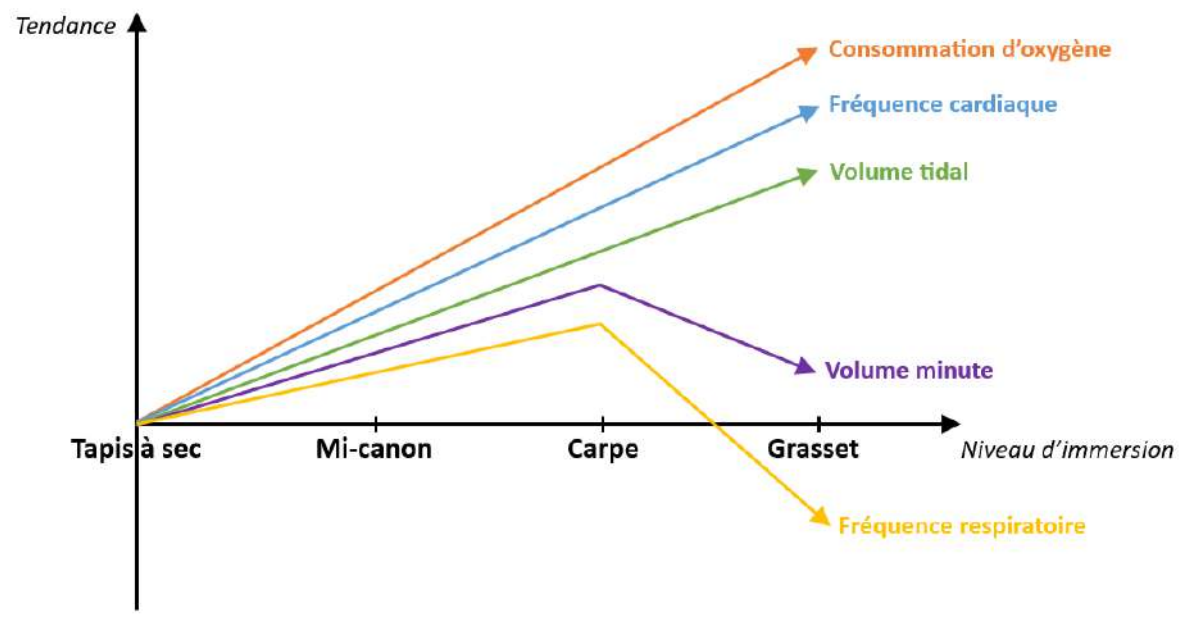


Figure 43 : Bilan graphique de l'évolution des paramètres physiologiques du cheval lors de marche sur tapis immergé à vitesse constante et pour différents niveaux d'immersion, d'après les résultats des études menées par Greco-Otto *et al.* en 2017 et 2020. *Source : Delacharlerie Aurore.*

3. Adaptations physiologiques chroniques à l'exercice sur tapis immergé

3.1. Composante cardiovasculaire

Des études chez l'Homme ont montré que l'entrainement sur tapis immergé permet de susciter des réponses physiologiques submaximale à maximale et un conditionnement cardiorespiratoire comparables à celui sur tapis à sec[107,108,109] (Silvers, Rutledge, Dolny 2007 ; Greene *et al.* 2011 ; Brubaker *et al.* 2011 ; Greco-Otto *et al.* 2020) (voir Chapitre 3). Par ailleurs, Greene *et al.* (2011) ont observé une amélioration de la VO2max et du taux de masse maigre chez des adultes obèses à l'exercice soit sur tapis à sec, soit sur tapis immergé à hauteur de la poitrine.

Chez le cheval, deux études menées par un même groupe ont cherché à évaluer les effets chroniques du travail sur tapis immergé sur les propriétés des fibres musculaires (voir partie III.3.3), et les réponses cardiovasculaires et métaboliques.
Tout d'abord, un programme de réhabilitation sur tapis immergé pour tendinite est mené chez cinq chevaux sains pendant quatre semaines avec de l'eau à hauteur de la limite ventrale de l'abdomen, à 2 m/s (voir Annexe 4) (Borgia, Valberg, Essen-Gustavsson 2010). Ils participent avant et après la réhabilitation à un test d'effort où sont mesurés la vitesse pour laquelle la fréquence cardiaque atteint 200 bpm, et l'hématocrite. Aucune différence significative de ces deux paramètres n'est observée entre les deux tests d'effort réalisés. Les auteurs suggèrent que dans le cadre de l'entrainement d'un athlète, un protocole plus intense devrait être utilisé. Néanmoins, dans le cas d'une réhabilitation, le protocole permet *a priori* le maintien de la condition physique.
La deuxième étude compare les effets de huit semaines d'exercice sur tapis immergé à hauteur de l'olécrâne ou sur tapis à sec à 1,5 m/s chez six chevaux sains (Firshman, Borgia, Valberg 2015) (voir Annexe 4). Ils participent avant et après chaque programme à un test d'effort où sont mesurées la vitesse pour laquelle la fréquence cardiaque atteint 180 bpm, et la concentration sanguine en lactates. Aucune différence significative n'est mise en évidence pour ces deux paramètres avant et après les deux types d'entrainement.
Les résultats de ces deux études suggèrent que de tels protocoles sur tapis immergé n'induisent pas d'altération des propriétés cardiovasculaires (Borgia, Valberg, Essen-Gustavsson 2010 ; Firshman, Borgia, Valberg 2015) : **la condition physique des chevaux est maintenue** (ni amélioration ni perte), ce qui présente de l'intérêt dans le cadre d'un programme de réhabilitation où les exercices choisis seront de faible intensité.

Les effets de l'entrainement sur tapis à sec sur la VO2max des pur-sang de course ont fait l'objet de plusieurs études. Une augmentation de 23 % de la VO2max après sept semaines d'entrainement sur tapis de course entre 4 et 8,3 m/s avec une pente de 3 à 6 degrés est observée[110]. De la même façon, après neuf semaines d'entrainement sur tapis incliné à 9 degrés, alternant les exercices de faible intensité, aérobie, et fractionnés, la VO2max augmente de 25 % chez un autre groupe de pur-sang[111]. Il a été montré que l'entrainement traditionnel sur tapis à sec améliore davantage la VO2max via des adaptations cardiovasculaires que respiratoires[2829].
Par comparaison, Greco-Otto *et al.* (2020) proposent un entrainement de 18 jours à 1,45 m/s, avec augmentation progressive de la durée jusqu'à 20 min par jour, sur tapis immergé au grasset ou tapis à sec. Un test d'intensité maximale sur hippodrome est réalisé avant et après entrainement. La charge

[107] *Wyatt FB, Milam S, Manske RC, et al. The effects of aquatic and traditional exercise programs on persons with knee osteoarthritis. J Strength Cond Res 2001;15:337–40.*
[108] *Nikolai AL, Novotny BA, Bohnen CL, et al. Cardiovascular and metabolic responses to water aerobics exercise in middle-aged and older adults. Journal of Physical Activity Health 2009;6:333–8.*
[109] *Rahmann AE, Brauer SG, Nitz JC. A specific inpatient aquatic physiotherapy program improves strength after total hip or knee replacement surgery: a randomized controlled trial. Arch Phys Med Rehabil 2009;90:745–55.*
[110] *Evans DL, Rose RJ. Cardiovascular and respiratory responses to submaximal exercise training in the thoroughbred horse. Pflugers Arch 1988;411:316–21.*
[111] *Art T, Lekeux P. Training-Induced modifications in cardiorespiratory and ventilatory measurements in thoroughbred horses. Equine Vet J 1993;25:532–6.*

de travail associée à l'exercice sur tapis immergé est rapportée au neuvième jour à 21,7% du pic de VO2 initial, ce qui reflète une faible intensité de travail, et ne semble pas adéquate pour remplacer des entrainements effectués sur le sol au galop par exemple, d'intensité submaximale à maximale. Néanmoins, les résultats de l'étude montrent que le pic de VO2 augmente significativement après l'entrainement sur tapis immergé (environ 16,1 %) par rapport à la condition initiale, contrairement à l'entrainement sur tapis à sec où ce pic reste stable. Le pic de VO2 du groupe après entrainement sur tapis immergé est significativement supérieur à celui du groupe contrôle après entrainement sur tapis à sec. **Le protocole d'exercice sur tapis immergé décrit par Greco-Otto *et al.* (2020) semble donc suffisant pour induire une augmentation significative du pic de VO2 chez le cheval, malgré la faible intensité rapportée**. Le détail des résultats de l'étude menée par Greco-Otto *et al.* (2020) est donné dans le Tableau XXIX.

Cependant, la comparaison entre les résultats des différentes études doit tenir compte de la différence entre les deux variables que sont la VO2max et le pic de VO2. La réalisation du test d'intensité maximale sur hippodrome rend difficile le contrôle strict de la vitesse, ce qui explique le choix du pic de VO2 comme variable. Cependant, l'augmentation du pic de VO2 peut être influencée par une augmentation de l'intensité de l'exercice, de sa durée, ou du fait de conditions ambiantes différentes. En conséquence, l'augmentation du pic de VO2 ne peut être reliée directement à la seule amélioration de la condition cardiovasculaire.

Mais Greco-Otto *et al.* (2020) s'intéressent en complément à d'autres paramètres dans leur étude. Ils montrent ainsi que la **vitesse moyenne sur les 30 dernières secondes du test d'intensité maximale augmente** de 12,1 % après entrainement sur tapis immergé, et ne varie pas après entrainement sur tapis à sec. Bien que non mesurée, il est possible que cette augmentation de la vitesse moyenne soit liée à une augmentation de la force des muscles de la propulsion et une amélioration de la stabilité posturale. Par ailleurs, la **vitesse moyenne sur l'ensemble du test d'intensité maximale** (800 m) **augmente** de 17,4 % après entrainement sur tapis immergé, et ne varie pas après entrainement sur tapis à sec. La concentration sanguine en lactates ne semble pas affectée par les entrainements.

Greco-Otto *et al.* (2020) concluent donc que **18 jours d'entrainement sur tapis immergé augmentent significativement le pic de VO2 des chevaux et améliorent leur endurance (augmentation de la vitesse moyenne sur l'ensemble du test et sur les 30 dernières secondes)**. Il est intéressant de noter que la charge de travail associée à l'entrainement sur tapis à sec était vraiment légère, comme reflété par les fréquences cardiaques au cours de l'étude. Néanmoins, cela montre que **pour des conditions égales, l'ajout d'eau augmente effectivement la charge de travail**.

À retenir :

Une intensité d'exercice suffisante, difficile à maximale (60 % de VO2max), est importante pour l'amélioration de la condition physique (fitness) des chevaux. Cependant, les programmes d'entrainement traditionnels, avec des exercices intenses effectués sur terre, peuvent générer des forces excessives et une surcharge sur les structures squelettiques de support.

L'intérêt des exercices en milieu aquatique repose sur la réduction des forces d'impact au sol (et donc des contraintes sur les structures anatomiques des membres) ainsi que sur l'augmentation de la résistance au déplacement dans l'eau qui influence la charge de travail.

Le travail sur tapis immergé, dans les conditions décrites précédemment (Borgia, Valberg, Essen-Gustavsson 2010 ; Firshman, Borgia, Valberg 2015 ; Greco-Otto *et al*. 2020), est considéré comme un exercice d'intensité submaximale. Malgré l'intensité relativement faible associée à cet exercice, un protocole employant une hauteur d'eau suffisamment élevée peut permettre d'augmenter le pic de VO2 et l'endurance chez les pur-sang de course. Ainsi, l'introduction d'exercices sur tapis immergé peut avoir des effets bénéfiques sur le conditionnement physique et cardiovasculaire lors d'entrainement chez les chevaux de course, et s'avère efficace pour le maintien de la condition cardiovasculaire lors de programme de réhabilitation.

Tableau XXIX : Résultats de l'étude menée par Greco-Otto *et al.* (2020), *source : Delacharlerie Aurore*.

Étude	Consommation en oxygène (VO2)	Fréquence cardiaque	Ventilation *(volume tidal, ventilation minute, fréquence respiratoire)*	Vitesse instantanée et moyenne
Greco-Otto *et al.* (2020)	Lors du test d'intensité maximale sur hippodrome : - Le **pic de VO2 après les 18 jours d'entrainement sur tapis immergé est significativement supérieur** à celui sur tapis à sec. - Le pic de VO2 après les 18 jours d'entrainement sur tapis immergé **augmente de 16,1 %** (96,3 mL/kg/min pour la condition initiale, et 121 ml/kg/min après entrainement). - Le **pic de VO2 après les 18 jours d'entrainement sur tapis à sec ne présente pas de variation significative** voire tend à diminuer (103,1 mL/kg/min pour la condition initiale, et 84,2 ml/kg/min après entrainement).	Le **temps de récupération de la fréquence cardiaque** (temps pour atteindre 50 % de la FC maximale) **n'est pas modifié après 18 jours d'entrainement** pour le groupe s'entrainant sur tapis à sec et sur tapis immergé (353 secondes (265–445)). *L'interprétation de cette variable est à nuancer, car davantage indicative du stress que de la condition physique.*	**Absence de variation significative avant et après entrainement et entre les deux types d'entrainements** pour les paramètres de la ventilation lors du test d'intensité maximale sur hippodrome.	Lors du test d'intensité maximale sur hippodrome : - **Absence de variation significative avant et après entrainement** (sur tapis immergé ou à sec) pour la **vitesse instantanée maximale**. - La **vitesse moyenne** sur le test **augmente de 17,4 % après entrainement sur tapis immergé** (depuis 8,7 m/s pour la condition initiale, à 10,5 m/s après entrainement). - La **vitesse moyenne sur les 30 dernières secondes** du test **augmente de 12,1 % après entrainement sur tapis immergé** (depuis 8 m/s pour la condition initiale, à 9,1 m/s après entrainement), et **ne varie pas après entrainement sur tapis à sec**.

3.2. Composantes osseuse et cartilagineuse

Une étude récente de Silvers *et al.* (2020) s'est intéressée aux effets de l'exercice sur le métabolisme osseux et cartilagineux chez des jeunes chevaux. Trente Quarter Horse yearlings ont été répartis en trois groupes s'exerçant sur tapis à sec, tapis immergé à 60 % de la hauteur au garrot, ou uniquement au box et au près. Les résultats de l'étude indiquent qu'un exercice forcé précoce (sur tapis à sec ou immergé) contribue à stimuler le métabolisme osseux nécessaire à une croissance uniforme et au développement osseux. Aucun effet négatif sur le métabolisme cartilagineux des chevaux exercés pendant 112 jours sur tapis immergé n'est rapporté lors de la transition à 28 jours d'exercice intense sur terre, en comparaison du groupe au box et au près, et du groupe entrainé sur tapis à sec.

3.3. Composante musculaire

Chez le cheval, deux études menées par un même groupe ont cherché à évaluer les effets du travail sur tapis immergé sur les propriétés métaboliques des fibres musculaires (Borgia, Valberg, Essen-Gustavsson 2010 ; Firshman, Borgia, Valberg 2015).

Les propriétés métaboliques des muscles squelettiques peuvent être modulées dès dix jours d'entrainement, retardant ainsi la survenue de la fatigue. L'entrainement en résistance en particulier augmente la charge de travail des muscles sans augmenter la vitesse des exercices, et peut ainsi fournir un moyen d'augmenter rapidement les capacités oxydatives des muscles (Borgia, Valberg, Essen-Gustavsson 2010).

Les propriétés métaboliques des **muscles fessier moyen et fléchisseur superficiel du doigt** lors de marche sur tapis immergé sont étudiées par Borgia, Valberg, et Essen-Gustavsson (2010). Cinq chevaux non entrainés sont mis à l'exercice cinq jours par semaine pendant quatre semaines, de 5 à 20 minutes par session, sur tapis immergé à hauteur de l'abdomen ventral, à 2 m/s. Ils participent avant et après l'entrainement à un test d'effort où sont effectuées des biopsies musculaires pour des analyses biochimiques et histologiques. A l'issu du programme, les concentrations musculaires en glycogène, adénosine triphosphate, glucose-6-phosphate, et lactates, et les activités enzymatiques de la citrate synthase et 3-hydroxyacyl coenzyme A déshydrogénase ne sont pas significativement différentes des valeurs initiales pour les deux muscles. **Aucun changement significatif dans les capacités oxydatives des deux muscles n'est donc observé à l'issu de la marche sur tapis immergé**.

La réponse de ces deux muscles à un test d'exercice standardisé est comparée après un entrainement sur tapis immergé ou conventionnel (Firshman, Borgia, Valberg 2015). Six chevaux sont marchés cinq jours par semaine pendant huit semaines sur tapis immergé à hauteur de l'olécrâne, ou sur tapis conventionnel, à 1,5 m/s, pendant 20 à 40 min. Aucune différence significative n'est rapportée sur la composition en type de fibres, le diamètre des fibres de type II, la concentration musculaire en analytes (lactates, glycogène, adénosine triphosphate), et la concentration sanguine en lactates entre les chevaux avant entrainement et après l'entrainement conventionnel ou sur tapis immergé.

À retenir :
Un entrainement de quatre à huit semaines sur tapis immergé n'induit pas de modification des propriétés métaboliques des muscles squelettiques, au moins pour les programmes décrits par Borgia, Valberg, et Essen-Gustavsson (2010), et Firshman, Borgia, et Valberg (2015).

4. Effets de la température de l'eau sur certains paramètres physiologiques

4.1. Fréquence cardiaque

L'augmentation de la fréquence cardiaque durant un exercice est principalement reliée à l'intensité de l'exercice et donc au taux métabolique ; mais l'augmentation de la température corporelle peut contribuer à l'augmentation de la fréquence cardiaque, indépendamment de l'activité métabolique musculaire (Nankervis, Thomas, Marlin 2008).

Notamment, lors d'exercice dans l'eau, comme la conductivité thermique est supérieure à celle observée dans l'air, la température de l'eau peut avoir une influence significative sur la température corporelle et les échanges de chaleur, par rapport à l'exercice dans l'air. Durant l'immersion dans de l'eau à une température comprise dans la zone de neutralité thermique, inconnue chez le cheval, il n'y a ni perte, ni gain de chaleur pour l'organisme, et la température corporelle est maintenue constante. **Lorsque la température de l'eau est plus froide, une vasoconstriction périphérique se produit**, associée à une augmentation du retour veineux, une augmentation du volume d'éjection systolique, et une **diminution relative de la fréquence cardiaque**. A l'inverse, **lorsque la température de l'eau est plus élevée, une vasodilatation périphérique est observée**, avec une **augmentation relative de la fréquence cardiaque**, quelque soit la charge de travail associée (Nankervis, Thomas, Marlin 2008 ; Lindner, Wäschle, Sasse 2012).

L'effet de la température de l'eau sur la fréquence cardiaque a été étudié chez huit chevaux marchant sur un tapis immergé à hauteur de l'épaule, et à vitesse constante (entre 1,1 et 1,4 m/s). Nankervis, Thomas, et Marlin (2008) montrent que la fréquence cardiaque, sur une période de 16 min, est la plus basse à 13 °C (79 ± 6 bpm), intermédiaire à 16 °C (89 ± 7 bpm) et la plus élevée à 19 °C (92 ± 5 bpm), avec une différence significative entre les fréquences cardiaques à 13 et 16 °C, et 13 et 19 °C. Sur les neuf premières minutes d'exercice, la fréquence cardiaque a tendance à diminuer pour les trois températures d'eau. Cette diminution est sûrement liée à la dissipation de la chaleur et à la stimulation des récepteurs cutanés par l'eau froide, entrainant une augmentation de la résistance périphérique des vaisseaux sanguins. Sur la période 9 à 16 min, elle continue de diminuer pour l'eau à 13 et 16 °C, mais augmente légèrement pour l'eau à 19 °C. Lors d'exercice sur terre, la dissipation de la chaleur se fait essentiellement par transpiration et évaporation, mécanisme qui ne peut avoir lieu lorsque la surface cutanée est immergée (voir Chapitre 1). L'augmentation de la fréquence cardiaque à 19 °C entre 9 et 16 min peut s'expliquer par un certain degré de **dérive cardiovasculaire** ; donc même un exercice de faible intensité dans de l'eau à 19 °C peut entrainer un stockage de chaleur. Si l'exercice avait été continué sur une plus longue période, à une intensité supérieure, une température d'eau plus élevée ou une hauteur d'immersion supérieure, la dérive cardiovasculaire aurait pu être plus marquée.
Les études chez l'Homme[112,113] ont également montré que la fréquence cardiaque augmente plus rapidement avec la profondeur de l'eau ou la vitesse lorsque la température de l'eau augmente, car la nécessité de dissiper la chaleur s'ajoute à la charge sur le système cardiovasculaire (Tranquille *et al.* 2017).

[112] Hall J, Macdonald IA, Maddison PJ, O'hare JP. Cardiorespiratory responses to underwater treadmill walking in healthy females. Eur J Appl Physiol Occup Physiol 1998;77:278–84.
[113] Gleim GW, Nicholas JA. Metabolic costs and heart rate responses to treadmill walking in water at different depths and temperatures. Am J Sports Med 1989;17:248–52.

À retenir :

De façon général, une baisse de température de l'eau est associée à une diminution de la fréquence cardiaque, et par opposition une augmentation de la température de l'eau à une augmentation de la fréquence cardiaque. Il faut néanmoins tenir compte des différences en termes de dissipation de chaleur entre les milieux terrestre et aquatique : l'évaporation de la transpiration ne peut se produire lors d'immersion. Un stockage de chaleur peut donc se produire plus rapidement lors d'exercice aquatique, avec une dérive cardiovasculaire.

La mesure de la fréquence cardiaque chez le cheval est un indicateur pratique de la charge de travail. Mais il faut tenir compte de variations en lien avec la hauteur d'immersion, ou de facteurs non liés à la charge de travail comme la température de l'eau, ou l'anxiété ou l'excitation associé à un exercice inhabituel sur un tapis immergé. Si la fréquence cardiaque est utilisée comme suivi de la condition physique du cheval, de l'acclimatation ou de la charge de travail, lors d'exercices dans l'eau, il faut s'assurer que la température de l'eau et le niveau d'immersion sont standardisés, de sorte que les résultats soient comparables entre les sessions.

4.2. Concentration sanguine en lactates

La température de l'eau peut influencer le taux de production et de clairance des lactates. Spécifiquement, lors d'exercice dans une eau profonde de **faible température**, il peut en résulter une **réduction de la production de lactates** car la température des muscles diminue, et une **diminution de la clairance des lactates** du fait de la vasoconstriction (Lindner, Wäschle, Sasse 2012).

Les effets de la température de l'eau sur la fréquence cardiaque et la concentration sanguine en lactates semblent augmenter avec la profondeur d'immersion chez l'Homme, du fait de l'augmentation de la surface de contact entre l'eau et les muscles[114]. Cet effet est moins marqué chez le cheval car l'immersion concerne le plus souvent les membres, avec en général la majeure partie du tronc au-dessus du niveau de l'eau.

À retenir :

Plusieurs études ont tenté de décrire l'intensité des exercices sur tapis immergé chez le cheval. Plusieurs hauteurs d'eau, vitesse, et durée d'exercices ont été associées, et permettent de conclure que le travail sur tapis immergé, en suivant des protocoles standards, est un exercice aérobie (Voss, Mohr, Krzywanek 2002 ; Nankervis, Williams 2006 ; Scott *et al.* 2010 ; Lindner, Wäschle, Sasse 2012 ; Vincze *et al.* 2013).

Bien que la fréquence cardiaque soit un indicateur moins fiable du travail effectué lorsque le cheval est partiellement immergé, elle peut néanmoins être utilisée pour comparer les charges de travail des chevaux, dans la mesure où la température de l'eau est fixée et où les chevaux ont bénéficié d'une période d'habituation appropriée aux tapis immergé (Nankervis, Thomas, Marlin 2008).

L'entrainement sur tapis immergé peut être bénéfiques dans le maintien, voire l'amélioration, de la condition cardiovasculaire de l'athlète équin, selon l'intensité des exercices. Ces exercices restant d'intensité inférieure à la nage, Scott *et al.* (2010) proposent leur utilisation préférentielle dans les stades précoces des programmes de réhabilitation.

Les vitesses et hauteurs d'eau décrites dans les différents protocoles présentés précédemment doivent être nuancées lors d'application à un programme de réhabilitation spécifique. Les effets du tapis immergé sur le conditionnement du cheval sont encore à l'étude, et une plus grande variété d'intensités d'exercices et d'indicateurs de la condition physique sont à explorer.

[114] *Gleim, G.W. and Nicholas, J.A. (1989) Metabolic costs and heart rate responses to treadmill walking in water at different depths and temperatures. The American Journal of Sports Medicine 17, 248–252.*

IV. Recrutement musculaire lors de marche sur tapis immergé

Les propriétés de l'eau sont telles que :

- du fait de la flottabilité de l'eau, la charge qui s'applique sur les articulations est réduite lors d'immersion ;
- du fait de la viscosité de l'eau et l'augmentation de résistance aux mouvements qui lui est associée, les mouvements dans l'eau nécessitent probablement davantage de travail musculaire que dans l'air.

Ainsi, lors de marche sur tapis immergé, il est possible de postuler que les variations de hauteur de l'eau et donc de flottabilité et résistance vont influencer l'activation des fibres musculaires. Il est raisonnable de penser que l'augmentation de la hauteur de l'eau va augmenter la résistance que le corps en mouvement doit surmonter, et donc la charge de travail liée au mouvement. Mais cet effet pourra être contrebalancé par la diminution des forces de charge associée à la flottabilité (Vitger *et al.* 2021). Par ailleurs, nous pouvons supposer que l'eau va affecter l'activité musculaire différemment selon le rôle des muscles : les muscles responsables du support du poids corporel auront un besoin énergétique diminué, et ceux responsables de la propulsion un besoin énergétique augmenté, avec des variations selon la vitesse et la hauteur d'immersion (Tranquille *et al.* 2017).

Cependant, peu d'études ont été menées sur l'effet spécifiques de l'eau sur le travail musculaire dans l'espèce équine et canine. Le manque de recherches sur les variations d'activité musculaire à différentes hauteurs d'eau lors d'exercice sur tapis immergé peut s'expliquer par l'intérêt encore récent porté à cette modalité de réhabilitation et d'entrainement chez les animaux, et par la difficulté méthodologique à analyser l'activité musculaire en milieu aquatique (Yarnell *et al.* 2014 ; Tranquille *et al.* 2017). Du fait du nombre limité d'études, et des similarités de cinématique entre des espèces quadrupèdes comme le chien et le cheval, les résultats des deux espèces sont ici exposés.

1. Mesure de l'activité musculaire

1.1. Études chez le chien

La charge de travail des muscles **fessier moyen** et **longissimus lombo-thoracique** est étudiée chez sept chiens lors de marche sur tapis immergé à quatre hauteurs d'eau : à sec (1), mi-tarse (2), entre la malléole latérale et l'épicondyle latéral du fémur (3) et entre l'épicondyle latéral et le grand trochanter (4), à une vitesse jugée confortable pour l'animal (Parkinson *et al.* 2018). Les mesures sont réalisées par **électromyographie de surface**. Le muscle longissimus lombo-thoracique est un extenseur du pont vertébral, mais il assure surtout une certaine rigidité et stabilité de la colonne durant la locomotion. Le muscle fessier moyen agit comme extenseur de la hanche, sa contraction tire le membre postérieur vers l'arrière et contribue à la propulsion et l'impulsion. Les résultats montrent que la charge de travail estimée diminue significativement pour les deux muscles bilatéralement entre les profondeurs 2 et 3, et 2 et 4, et augmente entre les profondeurs 1 et 2 (uniquement significatif pour le muscle fessier moyen droit).

L'étude suggère donc une **augmentation de la charge de travail des muscles fessier moyen et longissimus pour de l'eau au niveau du carpe, et une diminution lorsque l'eau atteint l'articulation du grasset**.

L'activation **des muscles vaste latéral du quadriceps fémoral et biceps fémoral** sont mesurées par **myographie acoustique par** (Vitger *et al.* 2021). Le muscle biceps fémoral est fléchisseur du grasset au soutien, et concourt à l'extension de la hanche, voire du grasset, lors de la phase d'appui ; il participe à la rétraction du membre pelvien et à la propulsion. La contraction du muscle vaste latéral du quadriceps fémoral est associée à l'extension du grasset permettant à l'appui la propulsion, et au soutien l'engagement des postérieurs lors de la phase de protraction. Il intervient également dans le support du poids corporel.

La myographie acoustique analyse le signal obtenu à partir des sons émis par les muscles squelettiques lors de leur contraction, et mesure ainsi l'activité musculaire. Trois paramètres sont pris en compte :

- L'efficacité (E) : mesure du rapport entre la durée d'activité et d'inactivité des fibres musculaires. Cela rend compte de l'efficacité et de la coordination du travail musculaire. Une bonne coordination du muscle, efficace à s'activer et s'inactiver, présentera un score E élevé.
- L'amplitude du signal (S) : si l'amplitude mesurée est basse alors peu de fibres musculaires sont recrutées et le score S est élevé.
- La fréquence de recrutement des fibres musculaires (T) : si la fréquence de recrutement des fibres musculaires est basse alors le score T est élevé.

Ainsi, durant un travail musculaire intense, les muscles doivent répondre en augmentant le temps d'activité des fibres musculaires et en recrutant davantage de fibres à une plus haute fréquente, ce qui se traduit par des scores E, S, et T bas.

Vingt-cinq chiens sains sont étudiés lors de marche sur tapis à des vitesses de 0,5 m/s et 0,8 m/s et à quatre hauteurs d'eau : à la limite de l'épaisseur du tapis, au jarret, grasset, et à mi-fémur.

Les résultats de l'étude montrent que :

- **L'augmentation de la vitesse de marche**, pour toutes les hauteurs d'eau, entraine une **augmentation de l'activation des fibres musculaires** des deux muscles (diminution des scores E, S et T).
- Une **augmentation du travail musculaire** est requise lors d'exercice avec de **l'eau à mi-fémur** par rapport aux niveaux inférieurs, notamment pour le muscle biceps fémoral à 0,8 m/s. Cela peut s'expliquer par l'augmentation de la demande en force propulsive et de protraction pour surmonter la résistance au mouvement liée à la profondeur de l'eau et la vitesse.
- La marche dans l'eau à hauteur du jarret et du grasset ne semble pas augmenter la charge de travail des deux muscles en comparaison de la marche sans immersion.

Étant donné l'augmentation du travail musculaire en réponse à l'augmentation des forces de résistance de l'eau lors de marche avec de l'eau à mi-fémur rapportée ici, il est étonnant de ne pas détecter d'augmentation d'activité des fibres musculaire pour des niveaux d'immersion inférieurs, par rapport à la marche sur tapis à sec. Une explication à ces résultats, proposée par les auteurs, peut être la modification de la cinématique du mouvement dans l'eau, avec une augmentation de la flexion des articulations des membres lors d'immersion, maximale chez le chien pour une eau au grasset pour la hanche, le grasset et le jarret (Levine *et al*. 2014 ; Bliss, Terry, de Godoy 2022). L'augmentation de la mobilité permet de libérer l'énergie élastique des tendons *(« spring-mass model »)*[115], diminuant ainsi la demande pour la contraction musculaire. Il faut également noter que le muscle vaste latéral et la partie crâniale du muscle biceps fémoral fonctionnent principalement comme des extenseurs du grasset ; donc l'augmentation attendue de la charge de travail associée à la flexion du grasset pour la protraction lors d'immersion est plus susceptible de concerner les muscles fémoraux caudaux. Bien que cette étude ne montre pas d'augmentation de l'activité musculaire lors de la marche dans l'eau en dessous de mi-fémur par rapport à l'absence d'eau, d'autres muscles, tels que les fléchisseurs des membres et les muscles du tronc, pourraient être sollicités dans une eau moins profonde, entrainant une augmentation de la charge musculaire totale, comme suggéré par la consommation accrue d'oxygène documentée chez d'autres espèces.

L'augmentation de travail musculaire dans cette étude concerne principalement le muscle biceps fémoral, par rapport au vaste latéral moins sollicité. Cela peut s'expliquer par la demande importante en forces propulsives pour surmonter la résistance aux mouvements dans l'eau. Lors d'immersion en eau profonde, le temps de support du poids du corps et les charges sont réduits du fait de la flottabilité, de sorte que la sollicitation du muscle vaste latéral impliqué dans le support du poids corporel sera diminué par rapport au biceps fémoral impliqué dans la propulsion.

[115] *Blickhan R. The spring-mass model for running and hopping. J Biomech. 1989;22:1217–27.*

Pour une immersion supérieure à mi-fémur, nous pouvons postuler que l'effet de la flottabilité pourra diminuer la demande musculaire, comme vu Chapitre 3 chez l'Homme pour une immersion à la taille.

Vitger *et al.* (2021) ont montré que l'activité musculaire nécessaire pour marcher dans l'eau à une profondeur supérieure à l'articulation du grasset est plus importante que celle requise pour marcher à des niveaux d'eau inférieurs. Ces résultats ne concordent pas avec ceux de l'étude menée par Parkinson *et al.* (2018), où l'électromyographie de surface rapporte une diminution de la charge de travail lorsque l'eau devient supérieure au grasset par rapport aux niveaux inférieurs. Pourtant, du fait des similitudes de fonction entre les muscles fessier moyen et biceps fémoral (extension/propulsion de la hanche), on pourrait s'attendre à ce que l'activité de ces deux muscles pendant l'exercice sur tapis immergé soit similaire. La différence d'activation rapportée entre ces deux études peut être liée en partie à des différences méthodologiques. Par ailleurs, les amplitudes générées avec la myographie acoustique, mais aussi l'électromyographie de surface, sont significativement supérieures pour le muscle biceps fémoral par rapport au muscle fessier moyen, de sorte que les variations d'activité sont potentiellement plus faciles à détecter de façon fiable pour le muscle biceps fémoral. Il est aussi possible que les résultats de myographie acoustique aient été influencés par l'activation musculaire des muscles environnants.

À retenir :

Chez des chiens à l'exercice sur tapis immergé :

- L'électromyographie de surface montre une augmentation de la charge de travail des muscles fessier moyen et longissimus pour de l'eau au niveau du carpe, et une diminution lorsque l'eau atteint l'articulation du grasset.
- Par opposition, la myographie acoustique montre une augmentation de l'activité musculaire des muscles vaste latéral du quadriceps fémoral et biceps fémoral lors de marche dans l'eau à une profondeur supérieure à l'articulation du grasset par rapport à des niveaux d'eau inférieurs.

Les différences d'activation rapportées entre ces deux études peuvent être liées en partie à des différences méthodologiques, aux différences d'amplitudes générées par les muscles évalués, ou à l'influence de l'activation musculaire des muscles environnants. Il apparait donc difficile de conclure.

1.2. Études chez le cheval

Une seule étude a été menée jusqu'à aujourd'hui sur **l'activité électromyographique** des chevaux lors d'exercice sur tapis immergé. Tokuriki *et al*. (1999) utilise l'électromyographie pour observer l'activité musculaire des membres antérieurs chez six chevaux lors de marche sur terre, de nage ou de marche (1,34 m/s) et trot (2,67 m/s) sur tapis immergé à une hauteur d'eau de 1,2 m. Il montre ainsi que :

- Le **muscle brachiocéphalique**, impliqué dans la protraction du membre antérieur lors de l'embrassée de terrain et l'extension de l'épaule, présente une activité maximale durant la nage, suivie par la marche et le trot sur tapis immergé et enfin la marche sur terre.
- Le **muscle extenseur dorsal du doigt**, impliqué dans l'extension du carpe et du doigt, et la flexion du coude, avec une action en fin de la phase d'embrassée de terrain, présente une intensité électromyographique supérieure lors de marche et trot sur tapis immergé par rapport aux autres types de locomotion. Cela indique que l'action du muscle extenseur dorsal du doigt participe probablement à la protraction du membre contre la résistance de l'eau.
- Le **muscle fléchisseur profond du doigt** présente une activité maximale durant la nage, suivie par la marche et le trot sur tapis immergé et enfin la marche sur terre. Ce muscle est impliqué dans la flexion du carpe et du doigt, et l'extension du coude. Il participe à fléchir le membre

pendant la phase d'embrassée de terrain et aide ainsi à la protraction. Pendant la phase d'appui, il supporte l'articulation du boulet vis-à-vis du poids du corps.

- Les auteurs concluent que la marche sur tapis immergé nécessite une activité musculaire plus intense, pour certains muscles du membre antérieur, que le trot sur tapis immergé. Deux explications sont proposées à cela : la résistance rencontrée lors de marche rapide dans l'eau est supérieure à celle lors de trot lent, car durant le trot le cheval présente davantage de déplacements verticaux, diminuant efficacement la proportion de membre immergée dans l'eau ; et secondairement, au trot l'arrière main contribue davantage à l'énergie nécessaire pour la propulsion (Tranquille *et al.* 2017).

Il ressort de ces conclusions un potentiel effet négatif de l'exercice sur tapis immergé : un développement trop important des muscles des membres antérieurs, et une tendance du cheval à davantage « tirer » avec l'avant main plutôt que de « pousser » avec les membres postérieurs (Scott *et al.* 2010 ; Nankervis, Lefrancois 2018).

L'activité du **muscle semi-tendineux** durant l'exercice sur tapis immergé a aussi été étudié par **thermographie infrarouge** (Yarnell *et al.* 2014). Le muscle semi-tendineux est impliqué dans la flexion du grasset. La thermographie infrarouge permet d'évaluer les changements de température à la surface de la peau, comme indicateur du flux sanguin local et du métabolisme tissulaire, et indirectement de l'activité musculaire. Yarnell *et al.* (2014) mesurent l'activité du muscle semi-tendineux chez sept chevaux évoluant sur un tapis à sec et sur un tapis immergé avec de l'eau à hauteur de l'articulation interphalangienne proximale, et à hauteur du carpe, à une vitesse de 1,6 m/s. Ils montrent que :

- La température de surface, en région du muscle semi-tendineux, augmente dès le début de l'exercice et jusqu'à la fin, pour les trois conditions. Lorsque l'intensité de l'exercice augmente, la température du muscle à l'effort augmente également.
- La température de surface du membre postérieur apparait significativement supérieure tout au long de l'exercice pour le tapis à sec par rapport au tapis immergé, et aucune différence significative n'est observée entre les deux conditions sur tapis immergé. Les auteurs proposent que la présence d'eau pourrait avoir eu un effet refroidissant sur la circulation et par conséquent sur les températures de surface. Par ailleurs, la température de surface est supérieure avant le commencement de l'exercice pour les chevaux marchant sur le tapis à sec, ce qui peut nuancer les résultats.
- La différence de température de surface entre la phase avant l'exercice et la température maximale pendant l'exercice est supérieure pour les conditions sur tapis immergé, mais sans être significative. Cela suggère que l'augmentation de résistance induite par l'eau génère une augmentation de l'activité musculaire supérieure au tapis à sec, mais sans différence lors d'augmentation de la hauteur d'eau.

Les conclusions de cette étude sont à prendre avec du recul, la sensibilité et la spécificité des changements de température de surface pour décrire l'activité d'un muscle n'étant pas clairement confirmées (Tranquille *et al.* 2017), et compte tenu de certains résultats non expliqués.

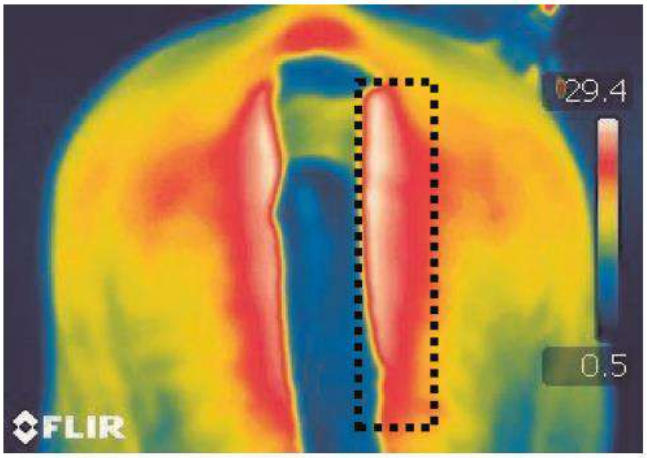


Figure 44 : Exemple d'une image thermique de l'arrière main d'un cheval, *source : Yarnell et al. (2014).*
Le muscle semi-tendineux droit est encadré. L'échelle thermique est visible à droite en degrés Celsius.

À retenir :
La marche sur tapis immergé, pour une profondeur suffisante (1,2 m), est associée à une activité musculaire supérieure des muscles brachiocéphalique, extenseur dorsal du doigt, et fléchisseur profond du doigt par rapport à la marche sur terre, mesurée par électromyographie. Par ailleurs, la thermographie infrarouge laisse supposer une augmentation de l'activité musculaire supérieure du muscle semi-tendineux lors d'exercice sur tapis immergé par rapport au tapis à sec, sans preuve de qualité.

Les conclusions des études menées chez le chien et le cheval sur l'activité musculaire lors d'immersion restent pour le moment partielles, et des études complémentaires avec une analyse des autres muscles de la locomotion et une comparaison des résultats pour différentes méthodes de mesure de l'activité musculaire seraient nécessaires.

2. Développement musculaire

Les effets au long terme de l'exercice sur tapis immergé sur le développement musculaire des chevaux sont peu décrits. Les deux études mentionnées ci-dessous ont été exposées lors *du British Equine Veterinary Association Congress 2020* et du *11th International Conference on Equine Exercise Physiology 2022*. Les articles correspondants n'ont pas encore été publiés.

Une **grille d'évaluation visuelle subjective** est utilisée pour suivre le développement musculaire pendant 20 semaines, chez 44 chevaux dont l'entrainement inclut des exercices toutes les semaines ou toutes les deux semaines sur tapis immergé par comparaison avec 23 chevaux n'utilisant pas le tapis immergé dans leur entrainement (Murray *et al.* 2020). Ils rapportent qu'après 20 semaines de tapis immergé, le développement musculaire **des muscles du cou, de la partie thoracique du trapèze, du thorax, de la région lombosacrée, des fessiers, et de la cuisse** est significativement augmenté, avec l'augmentation la plus marquée pour les muscles des membres postérieurs. Il n'est pas noté de développement significatif des muscles de la région abdominale et de la partie cervicale du trapèze. Dans le groupe contrôle, seul un développement significatif des muscles de le cuisse est rapportée à l'issue des 20 semaines. Les résultats de cette étude suggèrent **qu'un exercice régulier sur tapis immergé peut permettre le développement musculaire particulier des membres postérieurs et de la région lombo-sacrée**.

Récemment Berg *et al.* (2022) ont utilisé la **myographie acoustique** pour mesurer l'activité musculaire **des muscles longissimus lombo-thoracique, la partie thoracique du trapèze, biceps fémoral, et oblique externe,** chez cinq chevaux de selle entrainés trois fois par semaine pendant huit semaines sur

tapis immergé. Des variations des scores E, S et T sont rapportées mais sans être significatives. La myographie acoustique apparait néanmoins une méthode efficace pour évaluer la fonction musculaire durant l'exercice sur tapis immergé, et pourra être utilisée pour élaborer des protocoles de réhabilitation plus adaptés.

L'effet sur la **musculature épaxiale** d'un entrainement sur tapis immergé a été étudié chez six chevaux (Fair, Blake, Blake 2023). Sur une période de quatre semaines, 24 sessions de 15 min sont effectuées sur tapis immergé à mi-hauteur du troisième métacarpe. La vitesse du tapis est définie proche de 1 m/s, avec une inclinaison du tapis de 4 %. L'évolution de la musculature épaxiale est évaluée à l'aide d'une **règle flexible courbe**. L'étude révèle une augmentation significative du profil musculaire épaxial à chacun des points de référence anatomiques étudiés (vertèbres thoraciques 5 (T5), 9 (T9), 14 (T14) et 18 (T18)), observée dès la troisième semaine d'exercice, avec généralement une augmentation supplémentaire à la quatrième semaine. Les changements les plus significatifs ont été observés aux niveaux de T5 et T18. Les résultats suggèrent donc que **l'exercice répété sur tapis immergé incliné a un effet significatif sur le taux et la taille de croissance de la musculature du dos en région thoracique**. Ces résultats semblent en accord avec ceux de Murray *et al.* (2020). Néanmoins, l'étude manque de groupes contrôles, et des recherches supplémentaires sont nécessaires pour déterminer quelle intervention est la plus pertinente, l'inclinaison ou l'immersion, et si les deux interventions ont un effet synergique.

À retenir :
De la même façon, les conclusions sur le développement musculaire lors d'exercice sur tapis immergé restent partielles. Il semble qu'un programme d'entrainement sur tapis immergé suffisamment long permette le développement musculaire des membres postérieurs, de la région lombo-sacrée et épaxiale thoracique. Des études complémentaires sont néanmoins encore nécessaires, avec l'utilisation de méthodes de mesure plus standardisées.

V. Réhabilitation aquatique du cheval

L'objectif d'un programme de réhabilitation d'une lésion musculosquelettique est de restaurer la fonction du membre atteint, en assurant le maintien de la flexibilité des tissus mous lésés, des forces musculaire et osseuse, et de l'amplitude du mouvement des articulations affectées, tout en préservant la condition cardiorespiratoire de l'athlète (Mendez-Angulo *et al.* 2013).

1. Rappel de l'intérêt des propriétés physiques de l'eau

Les exercices aquatiques, comme la natation ou la marche sur tapis immergé, sont utilisés chez l'Homme pour la réhabilitation de l'athlète, et permettent notamment (voir Chapitre 3) : l'augmentation ou le maintien de la condition cardiovasculaire, de l'amplitude du mouvement articulaire, l'amélioration de la force et de l'activation musculaire, la diminution des stresses mécaniques qui s'exercent sur les membres, la rééducation à des schémas locomoteurs normaux, la limitation des déficits proprioceptifs. Au cours de la réhabilitation, les exercices aquatiques permettent la prise en charge d'une lésion musculosquelettique primaire, mais ils contribuent également à réduire les effets délétères des changements locomoteurs générés en réponse à l'altération initiale.

Ces effets dérivent des différentes propriétés physiques de l'eau, comme la flottabilité, la viscosité, la pression hydrostatique, qui, associées à des variations de température, d'osmolarité, de profondeur de l'eau ou de vélocité des mouvements, permettent la création de différentes combinaisons thérapeutiques. Ces différentes combinaisons des paramètres permettent une adaptation aux objectifs d'un programme de réhabilitation, d'entrainement, à l'affection ou à la phase de guérison considérée (King *et al.* 2013a ; Muñoz *et al.* 2019).
Les principaux effets thérapeutiques associés aux différentes propriétés de l'eau sont rappelés dans le Tableau XXX, et ont été présentés plus en détails dans le Chapitre 1.

Tableau XXX : Propriétés physiques de l'eau utiles pour la réhabilitation et leurs effets thérapeutiques, *d'après Muñoz et al. (2019).*

Propriétés physiques	Effets thérapeutiques
Flottabilité	- Réduction des forces axiales qui s'exercent sur les articulations et tissus mous environnants - Réduction de l'effort cardiovasculaire (l'exercice aquatique est associé à une augmentation de fréquence cardiaque inférieure par rapport à l'effort sur terre)
Viscosité et force de trainée	- Augmentation de l'amplitude du mouvement articulaire - Maintien, voire augmentation, de la force et puissance musculaire - Amélioration du contrôle neuromoteur
Pression hydrostatique	- Diminution de l'œdème et de l'inflammation - Amélioration du retour lymphatique - Augmentation du volume d'éjection systolique - Augmentation du flux sanguin aux muscles, et de la diffusion des déchets métaboliques produits par les muscles vers le sang - Diminution de la douleur - Augmentation de l'amplitude du mouvement articulaire - Renforcement musculaire
Température (froid)	- Diminution du flux sanguin - Contrôle de l'œdème, de l'inflammation et de la douleur - Diminution de la fatigue

Le nombre d'études scientifiques sur l'utilisation des tapis immergés pour la réhabilitation de lésions locomotrices chez le cheval reste limité. Néanmoins, la connaissance des variations de cinématique et cinétique de la locomotion équine lors d'immersion permet d'intégrer les tapis immergés à des programmes de réhabilitation de façon plus ciblée.

2. Résumé des propriétés de l'exercice sur tapis immergé

Il n'est pas possible pour l'instant d'établir de consensus sur le caractère approprié des exercices sur tapis immergé pour la réhabilitation d'une condition orthopédique spécifique, d'autant que s'ajoutent les variations individuelles des chevaux en terme de conformation, de posture dynamique ou de coexistence éventuelle d'une autre boiterie (Nankervis *et al*. 2021), éléments développés partie VII.

Néanmoins, le travail sur tapis immergé induit des modifications cardio-respiratoires et de la cinématique et cinétique de mouvement chez le cheval, par rapport aux exercices sur terre ou tapis à sec, qui s'avèrent intéressantes pour la réhabilitation de certaines affections. Les modifications majeures, développées dans les parties précédentes, sont résumées dans le Tableau XXXI ci-dessous.

Tableau XXXI : Récapitulatif des modifications cinématiques, cinétiques, cardiovasculaires et musculaires induites lors d'augmentation de la hauteur de l'eau sur tapis immergé, *source : Delacharlerie Aurore.*

Dynamique de la foulée	- Augmentation de l'amplitude du mouvement des articulations (notamment en flexion) des boulets, carpes, tarses, coudes → en général une immersion au tarse est indiquée - Diminution de l'amplitude du mouvement de l'épaule - Extension thoracique crâniale, flexion de la région thoracique caudale et lombaire de la colonne vertébrale - Membres antérieurs : diminution de protraction et augmentation de rétraction - Membres postérieurs : augmentation de protraction et rétraction - Diminution des pics d'accélération des segments osseux et augmentation de l'atténuation des forces d'impact à travers les membres - Diminution de la fréquence et augmentation de la longueur de la foulée - Augmentation de la durée de la foulée avec une augmentation du pourcentage de durée de la phase oscillante et diminution du pourcentage de durée de la phase d'appui - Augmentation de l'activité totale : augmentation de la force musculaire générée - Augmentation des déplacements dorso-ventraux et de l'activité dorso-ventrale
Exercice aérobie	- Augmentation de la fréquence cardiaque - Augmentation de la consommation d'oxygène (jusqu'à 20 % de VO2max lors d'immersion au grasset) → maintien de la condition cardiorespiratoire au cours de la réhabilitation.
Modification du recrutement musculaire et du développement musculaire *(peu d'études)*	- Augmentation de l'activité des muscles brachiocéphalique, extenseur dorsal du doigt, fléchisseur profond du doigt, et éventuellement semi-tendineux - Renforcement musculaire des muscles du cou, de la partie thoracique du trapèze, du thorax, de la région lombosacrée, du longissimus lombo-thoracique, des fessiers, de la cuisse, et de l'oblique externe

L'utilisation du tapis immergé n'est pas recommandée comme seule forme de réhabilitation ou comme premier exercice dans le cadre d'un protocole de réhabilitation, sauf s'il est spécifiquement indiqué pour une affection particulière, auquel cas généralement sur une période limitée (Nankervis *et al.* 2021).

Le travail sur tapis immergé permet la réalisation d'exercices en ligne droite, contrôlés, sans cavalier. Ceux-ci peuvent ainsi être intégrés dans un entrainement croisé, en parallèle de l'entrainement normal sur terre, par exemple chez les chevaux de sport ou dressage, une à deux fois par semaine (Nankervis *et al.* 2021).

3. Applications du tapis immergé à la réhabilitation

3.1. État des lieux des affections prises en charge par l'intégration du tapis immergé aux programmes de réhabilitation

Des indications à la thérapie aquatique ont été proposées par Adair (2011) : la réhabilitation après une chirurgie (par exemple d'arthroscopie), des lésions tendineuses des membres, une fracture non déplacée, de la raideur articulaire, de l'ostéoarthrose, en alternative à la marche en main, pour l'augmentation du développement musculaire, l'amélioration de la symétrie des allures et du développement du dos, le conditionnement cardiovasculaire, et le reconditionnement après une mise au repos.

Plus récemment, une enquête internationale menée par Tranquille *et al.* (2018) a permis de recenser les différentes affections (Tableau XXXII) pour lesquelles les tapis immergés sont actuellement utilisés au sein de programmes de réhabilitation.

<u>Tableau XXXII</u> : Affections ou circonstances pour lesquelles un tapis immergé est utilisé au sein d'un programme de réhabilitation, *d'après Tranquille et al. (2018).*

Conditions	Proportion d'utilisation
Atteintes tendineuses et ligamentaires Ligament suspenseur du boulet (LSB) Desmite proximale du LSB Avulsion d'une branche du LSB Bride carpienne Tendon du muscle fléchisseur profond du doigt Tendon du muscle fléchisseur superficiel du doigt Déchirure de la gaine digitale Ligaments collatéraux	**41 %**
Affections diverses Ostéoarthrose Retour au travail Baisse de performance Exercice post chirurgie Amélioration du gainage Conditionnement après un épisode de coliques	**25 %**
Dorsalgies Conflit des processus épineux Faiblesse ou lésion sacro-iliaque Fracture d'une tubérosité coxale Défaut d'alignement du pelvis Tensions en région lombaire Déchirure ligamentaire	**20 %**
Recommandations du vétérinaire traitant	**10 %**
Lésions des membres postérieurs Boiterie bilatérale Lésion du grasset, du jarret Synovite bilatérale des tarses Lésion des muscles de la cuisse Accrochement de la patella	**8 %**
Lésions du sabot Modifications bilatérales de l'os naviculaire Maladie naviculaire Contusion ou inflammation de la troisième phalange Atteinte de l'articulation interphalangienne distale Fourbure	**7 %**
Fractures Hanche, coude, carpe, os sésamoïdes, métacarpes/métatarses rudimentaires, troisième phalange	**5 %**
Recommandations d'un physiothérapeute	**3 %**
Lésion du boulet Éparvin	**1 %**
Boiterie générale	**1 %**
Recommandations de l'entraineur	**1 %**
Restrictions de mouvement des antérieurs	**1 %**

Les tapis immergés sont donc majoritairement utilisés chez le cheval pour la réhabilitation d'affections musculosquelettiques, conformément aux études chez l'Homme[116,117] et le chien[118,119].

3.2. Lésions articulaires

Un objectif important de la réhabilitation est la restauration de la fonction articulaire. Une amplitude du mouvement articulaire limitée est souvent associée au développement d'allures asymétriques, résultant finalement en une altération de la mise en charge et de la fonction articulaire (McCrae *et al.* 2021). Des exercices précoces de flexion et extension passives ou actives des membres blessés sont conseillés pour la réhabilitation chez l'Homme suite à une atteinte orthopédique[120] (Mendez-Angulo *et al.* 2013). Suite à une ACLR par exemple, des exercices aquatiques permettent le recouvrement de l'amplitude du mouvement articulaire (voir Chapitre 3). Des études menées chez le chien suite à une ostéotomie de nivellement du plateau tibial ont montré que la mise en place d'un programme de réhabilitation, incluant le tapis immergé, permet une augmentation de la circonférence des cuisses et de l'amplitude du mouvement du grasset[37].

De la même façon chez le cheval, la marche sur tapis immergé est associée à une augmentation de l'amplitude du mouvement des articulations des membres. Le tapis immergé **pourra donc être utilisé précocement pour la réhabilitation de lésions musculosquelettiques subaiguës ou dans le cadre d'ankylose articulaire ou ostéoarthrose chronique, en permettant l'augmentation des mouvements articulaires en flexion ou extension** (Mendez-Angulo *et al.* 2013 ; Haussler, King 2016 ; Muñoz *et al.* 2019).
Cependant, l'augmentation de l'amplitude du mouvement du tarse associée à la marche dans l'eau est une contre-indication à l'utilisation de tapis immergé chez les chevaux présentant une synovite du tarse (Nankervis, Launder, Murray 2017).

[116] *Denning WM, Bressel E, Dolny DG. Underwater treadmill exercise as a potential treatment for adults with osteoarthritis. Int J Aquat Res Educ 2010;4: 70e80.*
[117] *Roper JA, Bressel E, Tillman MD. Acute aquatic treadmill exercise improves gait and pain in people with osteoarthritis. Arch Phys Med Rehabil 2013;94:419e25.*
[118] *Kathmann I, Cizinauskas S, Doherr MG, Steffen F, Jaggy A. Daily controlled physiotherapy increases survival time in dogs with suspected degenerative myelopathy. J Vet Intern Med 2006;20:927e32.*
[119] *Monk ML, Preston CA, McGowan CM. Effects of early intensive postoperative physiotherapy on limb function after tibial plateau leveling osteotomy in dogs with deficiency of the cranial cruciate ligament. Am J Vet Res 2006;67: 529e36.*
[120] *Yen CH, Chan WL, Wong JW, et al. Clinical results of early active mobilisation after flexor tendon repair. Hand Surg 2008;13:45 50.*
Valtonen A, Poyhonen T, Sipila S, et al. Effects of aquatic resistance training on mobility limitation and lower-limb impairments after knee replacement. Arch Phys Med Rehabil 2010;91:833–839.

3.3. Lésions tendineuses et ligamentaires

Figure 45 : Anatomie de l'extrémité distale du membre antérieur du cheval, *d'après Smith et Goodship (2008).*
IO III : le muscle interosseux III, et EDD : le muscle extenseur dorsal du doigt.

3.3.1. Tendon du muscle fléchisseur superficiel du doigt (SDFT)

Lors de marche sur tapis immergé, l'augmentation de la hauteur de l'eau est associée à une augmentation de la résistance aux mouvements dans le plan sagittal, qui se traduit par une réduction de la protraction des membres antérieurs, alors que la protraction des membres postérieurs est inchangée ou augmentée par rapport à sur tapis à sec.
Lors de marche sur terre, la protraction de la partie distale des membres est principalement passive, due à la libération d'énergie élastique stockée dans le tendon du muscle fléchisseur superficiel du doigt et dans une moindre mesure dans le ligament suspenseur du boulet (Harrison *et al.* 2010).
L'augmentation d'activité du muscle brachiocéphalique durant l'exercice sur tapis immergé, afin de permettre l'avancement des membres antérieurs, modifie la dynamique normale de la phase d'embrassée de terrain. De ce fait, l'utilisation du tapis immergé n'est **pas recommandée en cas de lésion aiguë du tendon du muscle fléchisseur superficiel du doigt pour les membres antérieurs** (Nankervis, Launder, Murray 2017 ; Muñoz *et al.* 2019).

En revanche, en cas de **tendinite subaiguë ou chronique, l'exercice sur tapis immergé peut être recommandé** (Muñoz *et al.* 2019).
La tension maximale sur le SDFT et la bride radiale s'applique durant la phase d'appui de la foulée. Du fait de la **flottabilité** dans l'eau, la charge qui s'applique sur le membre, et donc le tendon, diminue proportionnellement à la hauteur d'immersion. Il est donc conseillé de débuter la réhabilitation par des exercices dans une eau profonde et de progressivement diminuer le niveau d'eau.

La fonction du SDFT dépend de la tension passive de la bride radiale, mais également de la contraction musculaire du corps charnu. Pour cette raison, il est important d'éviter la fatigue musculaire. Le muscle fléchisseur superficiel du doigt présente une proportion importante de fibres de type I à contraction

lente (environ 45 %) et une très faible proportion de fibres de type IIX à contraction rapide (environ 2 %) (Borgia, Valberg, Essen-Gustavsson 2010). Malgré la proportion importante de fibres de type I, Firshman, Borgia, et Valberg (2015) ont rapporté des concentrations en lactates musculaires 2 à 3 fois supérieures à celles au repos pour le muscle fléchisseur superficiel du doigt en réponse à un exercice sur tapis à haute vitesse (10 min à vitesse croissante entre 1,5 et 11,2 m/s). Ces concentrations musculaires en lactates indiquent une réponse anaérobie significative du muscle et donc le **potentiel du muscle fléchisseur superficiel du doigt à fatiguer rapidement** ; ceci doit être pris en considération lors de réhabilitation de lésions du SDFT, d'autant qu'une fatigue des jonctions musculo-tendineuses peut aggraver la lésion initiale (Muñoz *et al*. 2019).

3.3.2. Tendon du muscle fléchisseur profond du doigt (DDFT)

Durant la dernière partie de la phase d'appui (la propulsion), le soulèvement du boulet est assuré par une contraction active du corps charnu du muscle fléchisseur profond du doigt et la tension du DDFT et du ligament accessoire du DDFT (AL-DDFT). L'étirement des DDFT et AL-DDFT est maximal durant cette phase (Denoix 2014).
Lors de marche sur tapis immergé ou à sec, l'augmentation de contraction du muscle fléchisseur profond durant la phase d'appui (voir partie IV) peut donc générer une augmentation de la tension sur ces structures anatomiques (DDFT et AL-DDFT)[121].
Par ailleurs, la locomotion sur tapis (à sec ou immergé) est caractérisée par une augmentation du mouvement de rétraction des membres antérieurs et postérieurs par rapport à la marche sur terre, car le sabot est tiré vers l'arrière par le mouvement du tapis lors de la phase d'appui. Cela peut donc induire une augmentation d'autant plus marquée de l'étirement des AL-DDFT et DDFT à la fin de la phase d'appui.
Ces variations cinématiques font que la réhabilitation de lésions du DDFT sur tapis immergé ou à sec n'est pas recommandée si des options alternatives sont disponibles. Néanmoins, si les autres options de prise en charge sont plus à risque, parce qu'il n'est pas possible de contenir le cheval lors de marche en main par exemple, alors l'utilisation du tapis pourra être envisagée (Nankervis, Launder, Murray 2017 ; Muñoz *et al.* 2019).
Des études observationnelles ont également montré que les chevaux avec certaines conformations anatomiques, comme une hyperextension du carpe ou des membres postérieurs très droits, montrent une augmentation plus marquée du mouvement de rétraction lors d'exercice sur tapis immergé (Nankervis, Launder, Murray 2017). En absence d'études concrètes sur ce sujet, les exercices sur tapis immergé doivent donc être utilisés avec prudence chez les chevaux présentant de telles conformations.

Paradoxalement, Muñoz *et al*. (2019) ont observé que les chevaux présentant des lésions chroniques du DDFT ne s'améliorent pas lors d'exercice sur tapis à sec ; en revanche la marche sur tapis immergé semble amener à une réduction de la taille de la région lésée, probablement grâce aux effets de la pression hydrostatique qui contribue à diminuer l'œdème et l'inflammation. Ces résultats sont issus d'études observationnelles.

3.3.3. Ligament suspenseur du boulet

Comme abordé précédemment, une augmentation du mouvement de rétraction des membres est associée à la marche sur tapis, en lien avec l'augmentation de la hauteur de l'eau, et car le sabot est tiré vers l'arrière durant la phase d'appui par le mouvement du tapis. La flexion des articulations distales des membres est également augmentée significativement lors d'immersion au tarse. Ces **augmentations de rétraction et de flexion des articulations des membres postérieurs peuvent**

[121] *Buchner H.H., Savelberg H.H., Schamhardt H.C., Merkens H.W., Barneveld A.: Kinematics of treadmill versus overground locomotion in horses. Vet Q 1994, 16, 87–90.*

s'avérer contre-productives, voire aggraver les lésions, dans le cas de desmite proximale du ligament suspenseur du boulet (Muñoz *et al.* 2019).
Cependant, la mise en place d'exercices aquatiques associant **un niveau d'immersion suffisant (au-dessus du grasset), et une vitesse réduite du tapis peut permettre de réduire la mise en charge du LSB durant la phase d'appui**. D'autre part, la résistance aux mouvements dans l'eau permet de renforcer le travail musculaire des membres postérieurs, et la nature relativement ferme de la surface du tapis favorise le retour de l'énergie élastique accumulée au membre. Ainsi, si le cheval est capable de maintenir une phase d'embrassée suffisante lors d'immersion dans une eau profonde, l'utilisation d'un tapis immergé pour limiter la charge sur le LSB tout en permettant le développement musculaire des membres postérieurs pourrait être indiquée. La vitesse sur le tapis immergé doit être réduite par rapport à la locomotion sur terre du fait des forces de trainées dans l'eau : en général la moitié de la vitesse terrestre est conseillée (Nankervis, Launder, Murray 2017 ; Muñoz *et al.* 2019). Néanmoins, les desmites proximales du LSB sont souvent associées à d'autres causes de boiterie (par exemple une douleur de l'articulation sacro-iliaque). Il est donc nécessaire d'évaluer de façon individuelle le mouvement du cheval dans l'eau, afin de juger de l'intérêt d'une réhabilitation sur tapis immergé (Nankervis, Launder, Murray 2017).

L'une des principales conséquences de **l'augmentation du mouvement dorso-ventral du tronc et de la suspension lors du trot dans l'eau jusqu'à un niveau intermédiaire** pourrait être l'influence sur la charge supportée par les articulations distales des membres et l'appareil suspenseur pendant la phase d'appui. Le pic d'extension des articulations métacarpo-phalagiennes et métatarso-phalangiennes, et les contraintes maximales sur le tendon fléchisseur superficiel du doigt et le ligament suspenseur du boulet, s'observent au milieu de la phase d'appui, et sont proportionnels aux forces verticales de réaction du sol. En raison de la flottabilité, les forces verticales de réaction du sol et l'accélération verticale diminuent proportionnellement à l'augmentation de la profondeur de l'eau. Sur la base de ces observations, **l'exercice dans l'eau au trot pour des chevaux en convalescence d'une lésion du ligament suspenseur du boulet ou de l'articulation du boulet devrait être évité durant la phase aiguë ou réalisé dans des niveaux d'eau plus élevés.** En revanche, trotter dans l'eau à des **profondeurs intermédiaires au niveau du canon ou du radius peut être indiqué en phase chronique, pour restaurer l'élasticité des tissus palmaires ou plantaires**. Cependant, des travaux supplémentaires dans ce domaine sont nécessaires pour extrapoler d'autres considérations cliniques (Fraschetto *et al.* 2024).

Il est intéressant de noter que le poids du cavalier influence la cinématique des membres, et augmente la durée relative de la phase d'appui, l'extension maximale et l'amplitude du mouvement des boulets. Il est donc recommandé chez des chevaux avec des lésions au niveau du boulet, du SDFT, ou du LSB, d'introduire des exercices sur tapis immergé (ou tapis à sec) avant les exercices montés (Muñoz *et al.* 2019).

3.4. Dorsalgies

L'exercice sur tapis immergé est de plus en plus utilisé pour la réhabilitation de chevaux souffrant de baisses de performance ou raideurs du dos, bien que son efficacité ne soit pas prouvée.

La cinématique du dos lors de marche dans l'eau est influencée par la position de la tête et de l'encolure, et les variations de la cinématique des membres (voir partie II). À faible profondeur d'eau, le cheval maintient sa tête et son encolure relativement basses, ce qui créée une légère flexion thoracique crâniale jusqu'à T13. Cependant, lorsque le niveau d'eau monte, le cheval a tendance à lever la tête pour éviter le contact avec l'eau, de sorte qu'une extension cervicale et thoracique crâniale (T13) sont observées. En revanche, l'augmentation de protraction des membres postérieurs et de la flexion des articulations distales des membres postérieurs avec l'augmentation de la hauteur d'eau explique, selon le *« bow and string concept »*, une augmentation de flexion de la région lombaire (L3). La région

thoracique caudale (T18) montre un schéma intermédiaire entre T13 et L3. La marche dans l'eau est donc associée à une extension thoracique crâniale et une flexion de la région thoracique caudale et lombaire (Muñoz *et al.* 2019).

En favorisant la flexion de la région thoracique caudale et lombaire de la colonne vertébrale, la marche sur tapis immergé pourra présenter un intérêt pour la réhabilitation de certaines affections. En revanche, le **mouvement en extension plus crânialement** doit être pris en considération et peut constituer un **frein à son utilisation chez des chevaux souffrant de conflit des processus épineux (le plus souvent entre T13 et T18)** par exemple. Dans le cas d'une telle affection, le but de la réhabilitation est de développer l'amplitude du mouvement en flexion dans la région affectée, en renforçant la musculature abdominale afin de courber l'arc selon le *« bow and string concept »*, de sorte à élargir l'espace entre les processus épineux (Nankervis, Finney, Launder 2016). Le travail sur tapis immergé à faible niveau d'eau (boulet) pourra être considéré, permettant au cheval de baisser l'encolure et donc une flexion thoracique crâniale, tout en assurant le renforcement des muscles du tronc.
Un exercice sur tapis immergé à hauteur du carpe/tarse serait donc un compromis intéressant permettant la flexion lombaire sans induire d'extension thoracique (Nankervis, Launder, Murray 2017 ; Muñoz *et al.* 2019). Néanmoins, le degré auquel les exercices sur tapis immergé influence la cinématique du dos dépend de la conformation dorsale du cheval et de l'amplitude du mouvement thoraco-lombaire préexistante. Chaque cheval en fonction de sa conformation peut donc adopter une stratégie cinématique différente en réponse à la hauteur de l'eau (Nankervis, Launder, Murray 2017 ; Muñoz *et al.* 2019).

L'augmentation de résistance dans **l'eau influence également la dynamique du trot, forçant le cheval à adopter une posture thoraco-lombaire en extension**, ce qui n'est pas conseillé lors de réhabilitation d'une atteinte thoraco-lombaire ou des membres postérieurs (Nankervis, Launder, Murray 2017).
Par ailleurs, les muscles droit de l'abdomen et longissimus lombo-thoracique sont activés lors du trot pour stabiliser la colonne vertébrale du cheval en réponse aux forces dynamiques générées par l'inertie de la masse viscérale pendant les phases d'appui et oscillante de la foulée. Lorsque des chevaux trottent sur un tapis à sec à vitesse croissante, l'activité des muscles droit de l'abdomen et longissimus lombo-thoracique augmente linéairement avec la vitesse, entrainant une réduction simultanée de l'amplitude du mouvement du dos en flexion-extension et de la flexion thoraco-lombaire. Il est possible de supposer une activation similaire ou supérieure de ces muscles lors du trot dans l'eau à vitesse croissante, avec des effets plus prononcés au niveau de la jonction thoraco-lombaire, comme observé dans l'étude menée par Fraschetto *et al.* (2024). Sur la base de ces résultats, il est **déconseillé de faire trotter les chevaux souffrant de douleurs dorsales chroniques dans l'eau à vitesse croissante, notamment si l'objectif de la réhabilitation est de restaurer l'amplitude du mouvement de la colonne vertébrale**.

Par ailleurs, la marche dans l'eau est associée à une **augmentation des mouvements de rotation axiale du pelvis, de sorte que les chevaux présentant une boiterie des postérieurs ou une affection lombo-pelvienne doivent être entrainés avec précaution** sur tapis immergé, et les mouvements surveillés pour détecter les signes de fatigue, comme une asymétrie marquée de la rotation axiale du pelvis (Mooij *et al.* 2013 ; Nankervis, Finney, Launder 2016).

3.5. Fractures

La marche dans l'eau est un exercice d'intérêt pour la réhabilitation de chevaux pour lesquels une réduction des forces de réaction du sol est recherchée. Nankervis, Launder, et Murray (2017) donnent ainsi l'exemple des **lésions articulaires de type *« chip »* du boulet ou du carpe**, et de la **maladie dorsale du métacarpe chez les chevaux de course** *(« bucked shins »).* Une remise en charge progressive du

membre au cours du programme de réhabilitation est ensuite conseillée, en diminuant progressivement la hauteur de l'eau.

3.6. Maintien des conditions cardiorespiratoire et musculaire

Le travail sur tapis immergé, dans les conditions décrites dans la partie III, est considéré comme un exercice d'intensité submaximale. La fréquence cardiaque associée aux principaux programmes de réhabilitation ou entrainement sur tapis immergé utilisés ne semble pas dépasser 140 battements par minutes. Le travail en milieu aquatique n'apparait donc pas comme un substitut efficace au canter ou au galop (160 à 200 battements par minutes). Malgré l'intensité relative faible, il semble néanmoins permettre le maintien de la condition cardiovasculaire, voir une augmentation du pic de VO2 lorsque l'exercice se fait à niveau d'immersion suffisant. Cela présente un intérêt dans les programmes de réhabilitation où le cheval est souvent mis au repos au box quelques semaines, ou contraint à un exercice restreint, pour permettre la cicatrisation puis une remise progressive des structures en tension. **En autorisant un exercice contrôlé, réduisant les forces axiales qui s'exercent sur les tissus, et de faible intensité, le tapis immergé offre une solution pour éviter la perte de condition cardiovasculaire de l'athlète pendant sa période de réhabilitation. Le maintien de la condition cardiovasculaire permet dans un second temps un retour plus rapide à la compétition, puisque moins de temps d'entrainement sera nécessaire pour retrouver le niveau avant lésion.**

Chez le chien, les exercices sur tapis immergé sont fréquemment utilisés comme moyen de réhabilitation[122,123]. Leur incorporation à un programme de haute intensité peut aider à prévenir l'atrophie musculaire, et participer au renforcement musculaire. Les exercices sur tapis immergé ne doivent néanmoins pas être utilisés de manière isolée, mais au sein d'un programme général de réhabilitation. Chez le cheval, plusieurs études ont montré que la marche sur tapis immergé peut augmenter l'activité de certains muscles par rapport à l'exercice sur terre. Un développement musculaire significatif des muscles des membres postérieurs et de la région lombo-sacrée a également été rapportée après 20 semaines d'exercice régulier sur tapis immergé (voir partie IV). **La marche sur tapis immergé peut donc contribuer au maintien de la condition musculaire voire au renforcement musculaire chez le cheval.** Le renforcement des muscles stabilisateurs au sein du programme de réhabilitation est important comme soutien des différentes structures : stabilité posturale, support au squelette axial et aux articulations pour apporter une résistance appropriée aux mouvements (Reiman, Lorenz 2011 ; McGowan, Cottriall 2016 ; Clayton 2016). Par la suite, **un retour plus précoce à la compétition sera permis, puisque moins de temps d'entrainement sera nécessaire pour retrouver le niveau avant lésion.** Des recherches supplémentaires sur l'activité musculaire dans l'eau sont néanmoins nécessaires à une meilleure utilisation des exercices aquatiques pour la réhabilitation.
Par ailleurs, il est à noter que la marche dans **l'eau peut renforcer des asymétries de mouvement du pelvis déjà existantes**. Il est donc nécessaire de s'assurer de la symétrie de la foulée avant de mettre en place des exercices de renforcement musculaire (Nankervis, Launder, Murray 2017 ; Nankervis, Lefrancois 2018).

3.7. Prévention de la fourbure d'appui du membre sain controlatéral lors d'immobilisation d'un membre

Parmi les affections musculosquelettiques des membres les plus communes chez le cheval, on compte les fractures, arthrites septiques, lésions des tendons et ligaments, et les fourbures. Ces affections affectent la capacité ambulatoire du cheval, et peuvent avoir un mauvais pronostic lié en partie aux complications secondaires se développant au cours du traitement de la lésion primaire.

---

[122] Kathmann I, Cizinauskas S, Doherr MG, Steffen F, Jaggy A. Daily controlled physiotherapy increases survival time in dogs with suspected degenerative myelopathy. J Vet Intern Med 2006;20:927–32.

[123] Monk ML, Preston CA, McGowan CM. Effects of early intensive postoperative physiotherapy on limb function after tibial plateau leveling osteotomy in dogs with deficiency of the cranial cruciate ligament. Am J Vet Res 2006;67:529–36.

Notamment, une réponse compensatoire naturelle à la douleur sur un membre est la redistribution du poids à distance, permettant donc de soulager le membre atteint mais créant une surcharge des autres membres. La quantité de poids redistribuée peut augmenter avec le temps ; il a été montré jusqu'à approximativement 33 % de poids supplémentaire sur le membre controlatéral du membre atteint[124]. Une fourbure d'appui du membre controlatéral, due à un support de poids excessif et statique par le membre sain, peut alors se développer (Steinke, Carmalt, Montgomery 2021).
Le mécanisme exact de développement de la fourbure mécanique n'est pas complètement résolu. Une surcharge du membre résulte en une diminution de la perfusion des lamelles dermiques de l'appareil suspenseur de la phalange distale. Par ailleurs, la fréquence du cycle de charge et décharge du pied intervient dans la perfusion lamellaire : une augmentation de la fréquence induite par la marche améliore la perfusion, alors qu'une réduction de la fréquence est associée à une diminution de la perfusion. Chez des chevaux sains à l'écurie, le cycle de charge et décharge normal se produit une à cinq fois par minute. La réduction de perfusion du chorion lamellaire associée à une surcharge persistante du membre peut donc induire des lésions hypoxiques et un stress oxydatif. L'ischémie lamellaire et le défaut d'apport d'énergie peut commencer entre 48 et 72 heures après le début de mise en charge excessive (Lischer, Mählmann 2022).

Les buts de la prévention de la fourbure d'appui sont de diminuer la pression sur l'appareil suspenseur de la phalange distale, en diminuant le poids supporté par le membre, et de maintenir la perfusion du tissu lamellaire, notamment en encourageant le mouvement et la mise en charge et décharge cyclique périodique des membres porteurs (Steinke, Carmalt, Montgomery 2021).
La mise en place d'exercices sur tapis immergé pourrait donc être intéressante dans la prévention de la fourbure mécanique, en permettant une réduction du poids sur les membres, et en autorisant le cycle de charge et décharge. Néanmoins, son utilisation doit également prendre en compte la nature de la lésion primaire. À ce stade, davantage d'études sur la thérapie aquatique chez les chevaux sont nécessaires pour évaluer des potentiels bénéfices sur la prévention de la fourbure d'appui du membre controlatéral.

Les méthodes utilisées actuellement pour réduire le poids incluent les harnais *(« slings »)*, le décubitus forcé, les tanks de flottaison, les tapis immergés et la thérapie aquatique. Ces différentes méthodes ont montré des résultats encourageants sur certains chevaux mais restent associées à des complications significatives. Parmi elles, un soulagement de poids trop important peut conduire à une fonte musculaire et de l'ostéopénie (Steinke, Carmalt, Montgomery 2021).

3.8. Équilibre psychologique du cheval

Chez l'Homme, les exercices aquatiques peuvent générer des niveaux de perception de l'effort similaires à ceux observés lors d'entrainement sur terre (voir Chapitre 3). Ainsi, la marche dans l'eau peut donner au cheval une impression suffisante d'effort, bénéfique pour maintenir son bien-être psychologique durant une période prolongée de réhabilitation avec des exercices de faible intensité (Nankervis, Launder, Murray 2017).

[124] Gardner, A.K., van Eps, A.W., Watts, M.R., Burns, T.A. and Belknap, J.K. (2017) A novel model to assess lamellar signalling relevant to preferential weight bearing in the horse. Vet. J. 221, 62–67.

À retenir :

Il est nécessaire d'adapter la hauteur de l'eau en fonction de l'objectif du programme de réhabilitation et du stade d'évolution de la lésion prise en charge. Il est alors possible de cibler en priorité l'augmentation d'amplitude du mouvement d'une articulation, la diminution des forces d'impact et de la mise en charge du membre, ou bien le maintien de la condition cardiovasculaire et le travail musculaire par l'augmentation de la résistance aux mouvements.

Le succès de la réhabilitation dépend autant du fait d'éviter des exercices inappropriés que de la sélection d'exercices bénéfiques (Nankervis, Launder, Murray 2017).

Tableau XXXIII : Récapitulatif des indications et contre-indications à l'utilisation du tapis immergé au sein d'un programme de réhabilitation d'une affection musculosquelettique d'un membre, *source : Delacharlerie Aurore.*

Indications	**Lésions musculosquelettiques subaiguës, ankylose articulaire, ostéoarthrose chronique**	Travail de l'amplitude du mouvement articulaire.
	Tendinite subaiguë à chronique du SDFT	Commencer par des exercices dans une eau suffisamment profonde, et d'intensité modérée du fait de la fatigue musculaire rapide.
	Desmite proximale du ligament suspenseur du boulet	Commencer par des exercices dans une eau suffisamment profonde (au-dessus du grasset), à faible vitesse.
	Restauration de l'élasticité des tissus palmaires ou plantaires en phase chronique d'atteinte du LSB	Trot à niveau d'immersion intermédiaire (radius).
	Maintien de la condition cardiorespiratoire	Par le biais d'un exercice contrôlé, réduisant les forces axiales qui s'exercent sur les tissus, et de faible intensité.
	Maintien de la condition musculaire	Peu d'études.
	Prévention de la fourbure d'appui du membre sain controlatéral au membre atteint	Encore à l'étude.
	Conflit des processus épineux	Faible niveau d'eau (boulet).
	Favoriser le mouvement en flexion de la région thoracique caudale et lombaire de la colonne vertébrale	
	Fracture de type *« chip »* du boulet ou carpe **Maladie dorsale du métacarpe chez les chevaux de course *(« bucked shins »)***	
Contre-indications	**Synovite du tarse**	
	Tendinite aiguë du SDFT	
	Lésions du DDFT	
	Conformation en hyperextension du carpe et membres postérieurs droits	
	Trot à faible niveau d'eau (inférieur au égal à mi-radius) lors de **lésion aiguë au niveau de l'articulation du boulet ou du LSB**	
	Conflit des processus épineux pour des niveaux d'eau intermédiaires à élevés	
	Trot lors de douleurs dorsales chroniques	
	Asymétries de mouvement du pelvis	

4. L'ostéoarthrose chez l'athlète équin

Les athlètes équins de haut niveau sont soumis à des entrainements et compétitions intenses, qui souvent les prédisposent à des lésions musculosquelettiques. Parmi ces lésions, l'ostéoarthrose et les tendinites sont les plus communes des membres antérieurs.
L'ostéoarthrose est une des atteintes musculosquelettiques les plus débilitantes chez l'athlète équin. Elle constitue une cause commune de baisse de performance et d'arrêt précoce du sport. L'ostéoarthrose se définit comme une maladie dégénérative caractérisée par de la douleur articulaire, de l'inflammation, de l'effusion synoviale, une diminution de l'amplitude du mouvement articulaire et une dégénérescence progressive du cartilage articulaire. Dans les stades avancés d'ostéoarthrose, il est possible d'observer une fibrose et un épaississement de la capsule articulaire, des érosions et fibrillations du cartilage articulaire, et la formation d'ostéophytes, altérant la fonction articulaire.
La douleur articulaire et l'inflammation associées peuvent générer des réponses compensatrices inappropriées de l'organisme, comme un retard de l'activation musculaire, de la faiblesse musculaire, une restriction de l'amplitude du mouvement articulaire, et un report du poids du corps. L'explication du mécanisme physiologique associé est donné dans le Chapitre 2. Ces réponses visent à protéger le membre affecté, mais peuvent conduire à une exacerbation de la lésion articulaire initiale, faisant progresser l'ostéoarthrose, et prédisposer à la survenue de lésions d'autres articulations et de boiterie compensatrice (Caron 2011 ; King *et al.* 2013a ; McIlwraith 2016).

Ainsi, lors de la prise en charge d'atteinte articulaire ou tendineuse, il faut tenir compte des effets secondaires de la douleur qui va entrainer un trouble de la fonction motrice au sein du membre affecté mais aussi des autres membres. La rééducation physique est une option de traitement efficace de nombreuses atteintes musculosquelettiques, contribuant à réduire ou prévenir l'installation d'une démarche compensatrice nuisible. Les programmes de réhabilitation décrits chez l'Homme pour la gestion de l'ostéoarthrose incorporent souvent des exercices aquatiques (voir Chapitre 3). Comme décrit précédemment, la réalisation d'exercices dans l'eau est un moyen efficace d'augmenter la mobilité articulaire, de renforcer les schémas moteurs normaux, d'augmenter l'activation musculaire et de réduire l'incidence de lésions musculosquelettiques secondaires à l'atteinte articulaire primaire (King *et al.* 2013a).

King *et al.* (2013b) puis King *et al.* (2017) se sont intéressés aux effets de l'exercice sur tapis immergé chez des chevaux souffrant d'ostéoarthrose du carpe induite expérimentalement. Le protocole associé à ces études est donné dans le Tableau XXXIV.

<u>Tableau XXXIV</u> : Description des protocoles des études menées par King *et al.* (2013b ; 2017) sur l'effet d'un exercice sur tapis immergé sur la réhabilitation de chevaux suite à l'induction expérimentale d'une ostéoarthrose du carpe, *source : Delacharlerie Aurore.*

<table>
<tr><th rowspan="2">Animaux</th><th colspan="6">Protocole</th></tr>
<tr><th>Jour 0</th><th>Jours 1 à 14</th><th colspan="4">Jour 15 à Semaine 10</th></tr>
<tr><td rowspan="2">n = 16 chevaux sains

Âge = 2 à 4 ans

Taille au garrot = 146 ± 0,04 cm

Poids = 385 ± 40 kg</td><td rowspan="2">Arthroscopie médio-carpienne bilatérale

Induction sous arthroscopie d'une ostéoarthrose médio-carpienne par création d'un fragment ostéochondral (sélection aléatoire du carpe)</td><td rowspan="2">Repos strict au boxe (3,7m x 3,7m)</td><td>Groupe réhabilité sur tapis immergé (n = 8)</td><td rowspan="2">Exercice pour induction et progression de l'ostéoarthrose :

Sur tapis à sec
5 jours/semaine

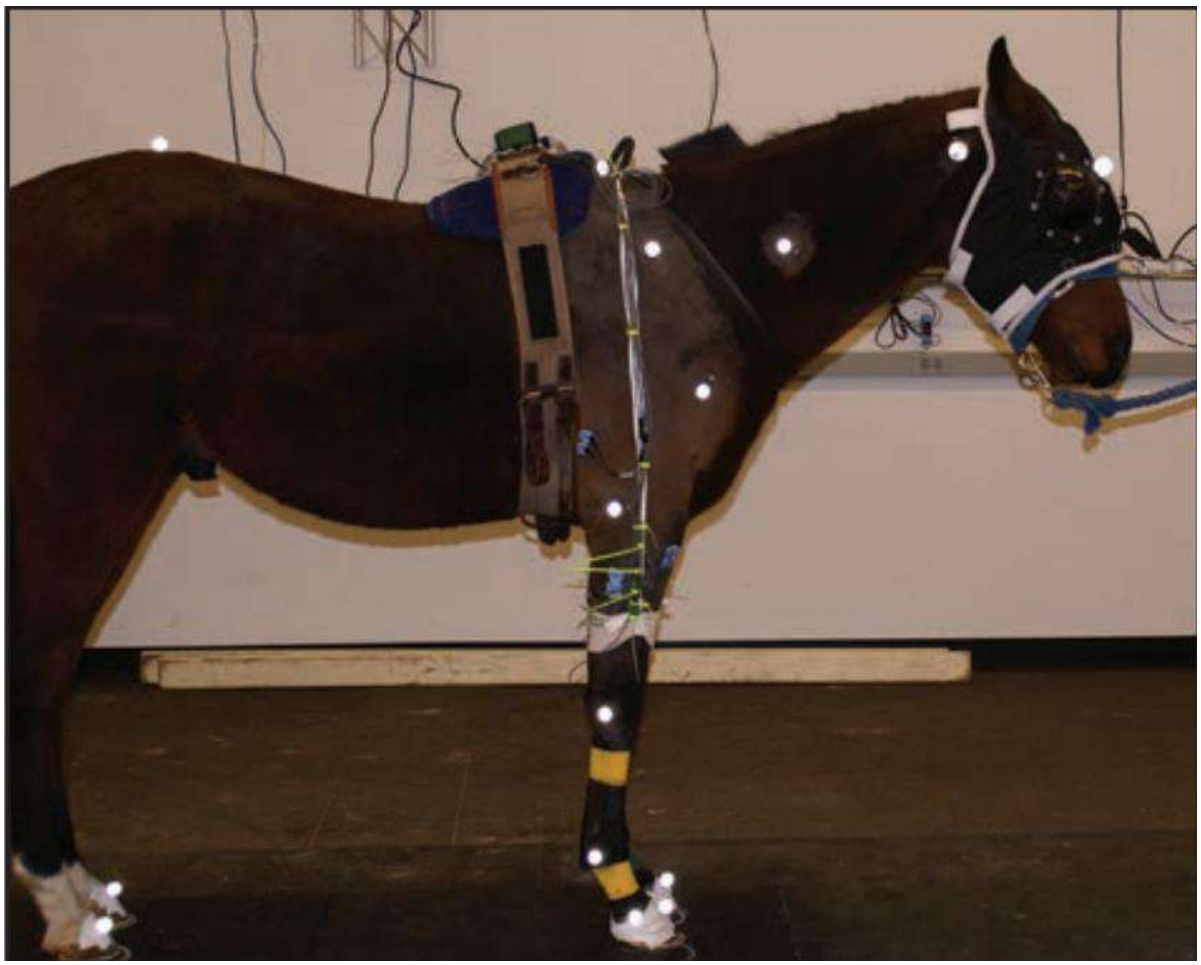
Trot à 4,4 m/s (2 min),
Galop à 8,8 m/s (2 min),
Trot à 4,4 m/s (2 min)</td><td rowspan="2">+</td><td>Programme de réhabilitation :
5 jours par semaine, 1 fois par jour
<u>Vitesse</u> : 2,1 m/s
<u>Hauteur d'eau</u> : pointe de l'épaule
<u>Durée</u> : 5 min pour la première semaine puis augmentation de 5 min par semaine, jusqu'à un maximum de 20 min par session</td></tr>
<tr><td>Groupe contrôle (n = 8)</td><td>Même protocole que sur tapis immergé mais sur tapis à sec</td></tr>
</table>

4.1. <u>Stabilité posturale</u>

La stabilité posturale est permise par l'intégration sensorielle et neurale précise des informations proprioceptives, vestibulaires et visuelles. Le contrôle postural effectif repose également sur la composante motrice du système musculosquelettique afin de maintenir l'équilibre, via la stabilité articulaire et le contrôle neuromusculaire. Comme abordé au Chapitre 2, une lésion articulaire comme l'ostéoarthrose va altérer ce contrôle postural.
Les plateformes de force sont utilisées pour enregistrer les variations des centres de pression, définis comme les points d'application des forces de réaction du sol sous les sabots. Le trajet (amplitude et patron) du centre de pression donne un aperçu du contrôle de l'équilibre, car les variations des centres de pression sont directement reliées aux mouvements du centre de masse de l'individu. Le balancement postural est défini par les mesures des mouvements des centres de pression dans les directions crânio-caudale et médio-latérale (King *et al.* 2013b).

Les effets de la réhabilitation sur tapis immergé sur le balancement postural en position statique sont étudiés par King *et al.* (2013b). Trois positions sont analysées sur les plateformes de force :

- Position normale au carré ;
- Position rapprochée des membres antérieurs : l'aspect médial du sabot de chaque membre thoracique est en contact avec le controlatéral ;
- Position normale au carré, avec retrait de la vision (bandeau sur les yeux).



<u>Figure 46</u> : Photographie d'un cheval en position normale au carré sur deux plateformes de force (une pour les membres antérieurs et une pour les postérieurs) avec un bandeau sur les yeux pour le retrait des informations visuelles, pour la mesure du balancement postural en position statique, *source : King et al. (2013b).*

Les mesures directes de déplacement des centres de pression dans l'étude confirment que la position avec les antérieurs rapprochés et la position normale avec les yeux bandés diminuent significativement la stabilité posturale. Le contrôle de l'équilibre est une tâche dynamique dans laquelle le système sensorimoteur doit interagir avec l'environnement extérieur pour maintenir la stabilité. Les différences les plus notables sont observées lorsque les animaux ont les yeux bandés. Privés de la vision, les chevaux se reposent davantage sur les informations issues du système vestibulaire et somatosensoriel pour maintenir leur équilibre.

La comparaison des deux groupes de traitement montre l'influence significative de la présence ou de l'absence d'exercices aquatiques :

- Le **balancement crânio-caudal est significativement diminué** dans le groupe sur tapis immergé par rapport au groupe contrôle pour les positions avec les antérieurs rapprochés et les yeux bandés (mesures réalisées à 42 et 70 jours, soit quatre et huit semaines après initiation des traitements). En revanche aucune différence significative n'est rapportée entre les deux groupes pour la position normale.
- Le **balancement médio-latéral est significativement diminué** dans le groupe sur tapis immergé par rapport au groupe contrôle pour les positions avec les antérieurs rapprochés et les yeux bandés (mesures réalisées à 42 jours), et pour la position normale (à 42 et 70 jours).
- L'aire donnée par les centres de pression pour les 4 membres et la vitesse de déplacement de ces centres de pression sont significativement inférieures dans le groupe sur tapis immergé par rapport au groupe contrôle (mesures réalisées à 42 et 70 jours).

Ces résultats montrent donc que les exercices sur tapis immergé améliorent significativement le contrôle de l'équilibre statique chez des chevaux atteints d'ostéoarthrose du carpe par rapport au groupe contrôle.
Les chevaux dans le groupe contrôle présentent davantage de troubles de l'équilibre postural, notamment dans les situations nécessitant davantage d'influx proprioceptif et de contrôle moteur pour le maintien de l'équilibre. Ce déséquilibre postural plus marqué peut être **associé à l'augmentation de stimulation des voies nociceptives et donc l'altération des signaux afférents issus des mécanorécepteurs articulaires** du fait de la douleur, de l'inflammation, et de l'effusion synoviale[125]. L'altération des signaux sensoriels afférents compromet l'activité musculaire, ce qui finalement réduit la capacité du cheval à générer des ajustements moteurs efficaces.
Il est suggéré que cette **altération des signaux sensoriels peut être atténuée par l'effet de l'augmentation de la pression hydrostatique dans l'eau chez les patients humains**[126]. L'exercice sur tapis immergé peut avoir augmenté l'excitation afférente des motoneurones pour les muscles responsables de la stabilisation des membres thoraciques et pelviens. Ainsi, les récepteurs sensoriels (fuseaux neuromusculaires, organes tendineux de Golgi, et mécanorécepteurs articulaires), la transmission afférente, et le contrôle moteur efférent semblent-ils avoir été positivement affectés par les exercices aquatiques, ce qui résulte en une amélioration du contrôle postural chez les chevaux.

Durant l'analyse dynamique de la foulée, une diminution du score de boiterie est rapportée chez les chevaux réhabilités sur tapis immergé à partir du 28e jour de traitement et jusqu'à la fin de l'étude ; mais une différence significative avec le groupe contrôle n'est observée qu'aux jours 28 et 35 après initiation du traitement. Cette diminution du score de boiterie fait écho à l'amélioration des variables du balancement postural. Ainsi, **même si le travail sur tapis immergé n'a pas d'effet bénéfique sur le score de boiterie de manière linéaire sur l'étude, l'amélioration du contrôle de l'équilibre dans les différentes positions testées semble bien se transférer à une amélioration de la locomotion**. Une étude menée chez l'Homme rapporte une amélioration du contrôle postural statique et de l'équilibre dynamique après 12 semaines d'exercices aquatiques[127]. **Les exercices aquatiques affectent à la fois l'équilibre et la force, ce qui finit par améliorer le contrôle dynamique sur terre**. Le renforcement des influx afférents utilisés dans le maintien de la position de support de base chez les chevaux sur tapis immergé constitue une base à un contrôle neuromusculaire dynamique précis.

À retenir :
Finalement, la création d'un fragment ostéochondral dans l'articulation du carpe influence l'amplitude de déplacement crânio-caudal des centres de pression dans les positions avec les antérieurs rapprochés, et normale avec les yeux bandés. Les chevaux dans le groupe contrôle ont davantage tendance à déplacer les centres de pression à distance du membre affecté, de sorte à décharger l'articulation lésée et douloureuse. L'amplitude de déplacement crânio-caudal des centres de pression est diminuée pour les deux membres antérieurs (avec et sans ostéoarthrose) chez les chevaux réhabilités sur tapis immergé, ce qui renforce l'évidence du potentiel thérapeutique associé aux exercices aquatiques pour l'amélioration du contrôle de l'équilibre statique.
Des études supplémentaires sont nécessaires pour déterminer de l'influence de l'amélioration du contrôle postural statique sur l'équilibre dynamique et les performances du cheval.

[125] *Palmieri R, Tom J, Edwards J, et al. Arthrogenic muscle response induced by an experimental knee joint effusion is mediated by pre- and post-synaptic spinal mechanisms. J Electromyogr Kinesiol 2004;14:631–640.*
[126] *Kamioka H, Tsutani K, Okuizumi H, Mutoh Y, Ohta M, Handa S, et al. Effectiveness of aquatic exercise and balneotherapy: a summary of systematic reviews based on randomized controlled trials of water immersion therapies. J Epidemiol 2010;20:2–12.*
[127] *Waters D, Hale L. Do aqua-aerobics improve gait and balance in older people? Int J Ther Rehab 2007;14:538–542.*

4.2. Étude biomécanique

Les études biomécaniques menées chez le cheval ont montré le développement d'une démarche compensatrice en réponse à des boiteries musculosquelettiques de différents types ou sévérité. Typiquement le cheval va modifier sa foulée en réduisant la charge du membre boiteux et en compensant par redistribution du poids du corps sur les autres membres. Lors de boiterie de grade léger à modéré (inférieur ou égal à 3/5 selon *l'American Association of Equine Practitioners*), afin de soutenir l'impulsion nécessaire à la propulsion, la durée de la phase d'appui du membre boiteux va augmenter alors que le pic des forces de réaction verticales du sol va diminuer. L'augmentation de la phase d'appui est un mécanisme compensatoire, qui permet de redistribuer les forces associées au poids du corps sur une plus longue durée, réduisant ainsi l'ampleur des forces verticales de réaction du sol (Buchnefp *et al.* 1995 ; Weishaupt 2008).

Les effets de la réhabilitation sur tapis immergé suite à une ostéoarthrose induite du carpe sur la biomécanique des membres thoraciques sont analysés par King *et al.* (2017). Les analyses cinétiques sont effectuées à l'aide de deux plateformes de force disposées au milieu d'une ligne droite de 25 mètres, sur lesquelles les chevaux passent à une vitesse de trot constante. Les chevaux présentent des boiteries de grade inférieur ou égal à 2 tout au long de l'étude. **Le groupe de chevaux exercés sur tapis immergé présente une symétrie de mise en charge des membres, avec un pic des forces verticales de réaction du sol et un taux de mise en charge verticale similaires entre le membre antérieur atteint d'ostéoarthrose et le membre sain controlatéral**. Dans le groupe contrôle, le membre avec un fragment ostéochondral montre une diminution significative du taux de mise en charge verticale, du pic des forces de réaction verticales du sol, et une augmentation significative de la durée de la phase d'appui par rapport au membre controlatéral sain, ce qui est indicatif de la mise en place d'un mécanisme protecteur pour réduire les stress mécaniques.

Les analyses électromyographiques de l'étude révèlent des changements significatifs entre le membre antérieur atteint d'ostéoarthrose médio-carpienne et le membre antérieur sain concernant l'activité du **muscle ulnaire latéral**, l'un des muscles responsables de la stabilisation et flexion du carpe. L'induction d'ostéoarthrose du carpe entraine, d'après les mesures prises avant le début des traitements, un **retard d'activation musculaire pour le membre atteint par rapport au membre thoracique sain, et donc une perte de la synchronicité d'activation musculaire**. Le contrôle neuromoteur du temps d'activation et de désactivation des muscles est essentiel pour assurer la coordination des mouvements et le maintien de la stabilité articulaire. La présence de douleur articulaire aiguë et d'inflammation, comme vu précédemment, est sûrement responsable d'une modification des signaux afférents issus des mécanorécepteurs articulaires et donc influence la capacité à coordonner l'activation musculaire.
Les résultats d'électromyographie après traitement rapportent que le retard d'activation du muscle ulnaire latéral du membre avec ostéoarthrose par rapport au membre antérieur sain persiste dans le groupe contrôle, alors que pour les chevaux réhabilités sur tapis immergé une symétrie d'activation du muscle entre les deux membres antérieurs est observée.
Les exercices aquatiques semblent donc avoir contribué à rétablir les délais (activation/désactivation) du contrôle neuromoteur entre les membres thoraciques, ce qui participe à la coordination de l'activité musculaire, la symétrie de mise en charge des membres, et la stabilité articulaire fonctionnelle. En revanche, le délai d'activation du muscle ulnaire latéral du membre avec fragment ostéochondral du groupe contrôle peut avoir contribué à un défaut de coordination des membres thoraciques et l'application d'un stress mécanique inégal sur l'articulation médio-carpienne.
Des études supplémentaires seraient intéressantes pour statuer sur la capacité effective des exercices sur tapis immergé à développer ou maintenir le contrôle neuromoteur.

Dans l'étude, l'amplitude du mouvement passif de l'articulation du carpe est significativement diminuée, et l'angle de flexion est significativement augmenté (donc moins de mouvement en flexion),

suite à la création du fragment ostéochondral et de la douleur et de l'inflammation associées, par rapport au membre thoracique sain (King *et al.* 2017).
Des exercices passifs de travail de l'amplitude du mouvement articulaire sont recommandés chez l'Homme après des chirurgies sous arthroscopie, comme vu au Chapitre 3. Les principaux objectifs de ces exercices sont de prévenir la fibrose des tissus périarticulaires, maintenir la mobilité tissulaire, améliorer la dynamique vasculaire, permettre la diffusion du fluide synovial, améliorer la cicatrisation du cartilage articulaire lésé, et diminuer la douleur. Le travail sur tapis immergé a été rapporté au Chapitre 3 et dans la partie II comme un moyen efficace pour augmenter l'amplitude du mouvement articulaire chez l'Homme et le cheval, selon le niveau d'immersion choisi.
Les résultats de l'étude montrent que l'exercice sur tapis immergé améliore effectivement l'amplitude du mouvement du carpe. Une amélioration significative de l'angle de flexion du carpe est observée à partir du 21^{e} jour, une semaine après début du traitement, et se poursuit jusqu'à la fin de l'étude. **Au 70^{e} jour, aucune différence significative dans l'amplitude du mouvement passif du carpe n'est observée entre le membre thoracique avec ostéoarthrose et le membre thoracique sain pour le groupe réhabilité sur tapis immergé, et les amplitudes du mouvement articulaire sont rapportées à la valeur initiale avant induction de l'ostéoarthrose** (King *et al.* 2017).

Remarque : Plusieurs études[128,129] avec différentes formes d'exercices de travail de l'amplitude du mouvement articulaire ont montré une amélioration de la cicatrisation du tissu articulaire quand les exercices sont commencés une semaine après chirurgie, par comparaison à des exercices commencés trois semaines après chirurgie. D'après ces conclusions, il serait donc conseillé de commencer la marche sur tapis immergé dès la première semaine après arthroscopie, sous réserve d'une cicatrisation adéquate de la plaie de chirurgie, pour obtenir une meilleure cicatrisation des tissus. Pour la prise en charge initiale d'ostéoarthrose, il parait plus approprié de commencer les exercices à un faible niveau d'immersion, afin de promouvoir une augmentation de l'amplitude du mouvement articulaire, sans l'augmentation de résistance aux mouvements associée à des niveaux d'eau supérieurs.

À retenir :
La démarche compensatrice mise en place lors d'une boiterie persiste souvent longtemps après résolution de celle-ci. Les exercices sur tapis immergés semblent avoir un meilleur potentiel dans la **rééducation à des schémas moteurs appropriés** par comparaison aux tapis à sec ou à la marche en main, suite à une boiterie.
En effet, lors d'ostéoarthrose induite du carpe, l'angle de flexion et l'amplitude du mouvement articulaire passif du carpe sont rétablis à l'issu du programme de réhabilitation sur tapis immergé. Les chevaux exercés dans l'eau présentent une distribution uniforme de la charge axiale des membres thoraciques et une symétrie dans le contrôle de l'activité du muscle ulnaire latéral entre les deux membres thoraciques, témoignant d'une amélioration du contrôle postural et d'une réduction des altérations biomécaniques compensatrices.

4.3. Modifications articulaires

Les modifications histologiques et radiographiques de l'articulation médio-carpienne suite à l'induction de l'ostéoarthrose et la mise en place du traitement sur tapis immergé ou tapis à sec ont également été étudiées par King *et al.* (2017).

[128] *Salter RB, Hamilton H, Wedge J, et al. Clinical application of basic research on continuous passive motion for disorders and injuries of synovial joints: a preliminary report of a feasibility study. J Orthop Res 1984;1:325–342.*
[129] *Salter S, Simmond D, Malcom B, et al. The biological effect of continuous passive motion of the healing of full-thickness defects in articular cartilage. J Bone Joint Surg 1980;62:1232– 1251.*

Les analyses radiographiques ont mis en évidence au 70e jour (fin des traitements) des changements articulaires significatifs, avec une **augmentation des processus lytiques au sein de l'os scaphoïde du carpe avec ostéoarthrose dans le groupe réhabilité sur tapis immergé** par rapport au groupe contrôle. La technique utilisée pour l'induction d'une ostéoarthrose, par création d'un fragment ostéochondral, se manifeste souvent par la visualisation de processus lytiques à la radiographie. L'augmentation de la lyse observée chez les chevaux exercés sur tapis immergé peut donc s'expliquer en partie par la technique d'ostéoarthrose, mais aussi par les exercices aquatiques. Le fragment ostéochondral créé chirurgicalement à partir de l'os scaphoïde du carpe reste attaché à l'aspect proximal de la capsule articulaire. **L'augmentation de l'amplitude du mouvement de l'articulation médio-carpienne et l'augmentation de la résistance aux mouvements dans le plan sagittal associées à la marche sur tapis immergé peuvent avoir augmenté les forces de traction sur la capsule articulaire et causé des micro mouvements du fragment ostéochondral**. Bien que la radiographie soit effective dans la caractérisation des changements structuraux au seins des articulations atteintes d'ostéoarthrose, il n'est pas possible dans cette étude de différencier les changements adaptatifs des changements pathologiques attribués à l'exercice sur tapis immergé.

Les examens histologiques menés ne révèlent pas de modifications significatives du cartilage articulaire, de la vascularisation de la membrane synoviale, et de la fibrose ou de l'infiltration cellulaire de la sous-intima, pour l'articulation médio-carpienne avec induction d'ostéoarthrose dans le groupe réhabilité sur tapis immergé. Cependant, une hyperplasie significativement plus marquée de l'intima de la membrane synoviale est rapportée dans cette articulation avec ostéoarthrose par rapport au membre antérieur sain. Concernant le membre antérieur sain, **l'hyperplasie de l'intima de la membrane synoviale est significativement moins marquée à l'issu des exercices sur tapis immergé par rapport au groupe contrôle**. **Le travail sur tapis immergé semble donc aider à réduire la réponse inflammatoire associée à la synovite, par réduction de l'infiltrat inflammatoire dans la membrane synoviale** (King *et al.* 2017).

À retenir :
Le travail sur tapis immergé est associé à des effets anti-inflammatoires sur la membrane synoviale et résulte en des améliorations cliniques significatives lors d'ostéoarthrose induite du carpe. Ces résultats sont très prometteurs chez l'athlète équin, puisque cela permettrait de réduire le besoin en anti-inflammatoires systémiques ou intra-articulaires dans la gestion sur le long-terme de l'ostéoarthrose chronique.

4.4. Intérêt préventif

La locomotion chez le cheval se manifeste par des impacts répétés des quatre membres sur le sol, qui sont atténués de façon active par contraction musculaire, et passive via les tendons, les os et les cartilages articulaires. **Une mise en charge excessive, rapide et répétée des membres peut être associée à des modifications osseuses et articulaires néfastes, menant au développement d'ostéoarthrose ou de fractures des os longs**. Des études in-vivo et in-vitro ont en effet montré que l'impact entre le sabot et le sol génère des vibrations de haute fréquence, dont un pourcentage important est atténué entre la paroi du sabot et la troisième phalange[130]. Des tentatives pour limiter ces effets négatifs ont été menées via différentes techniques de ferrage[131], ou des changements du type de surface[132,133] pour l'entrainement (Greco-Otto *et al.* 2019). **Réduire l'impact des membres lors**

[130] *Willemen MA, Jacobs MWH, Schamhardt HC. In vitro transmission and attenuation of impact vibrations in the distal forelimb. Equine Vet J Suppl. 1999;30:245–8.*
[131] *Benoit P, Barrey E, Regnault C, Brocket L. Comparison of the damping effect of dfferent shoeing by the measurement of hoof acceleration. Acta Anat (Basel). 1993;146(2–3):109–13.*
[132] *Barrey E, Landjerit B, Wolter R. Shock and vibration during the hoof impact on different track surfaces. Equine Exerc Physiol. 1991;3:97–106.*
[133] *Drevemo S, Hjerten G, Johnston C. Drop Hamer tests of Scandinavian harness racetracks. Equine Vet J Suppl. 1994;17:35–8.*

de la phase d'appui de la foulée, grâce à la flottabilité dans l'eau, pourrait limiter la survenue de ces lésions et prolonger la carrière sportive des athlètes équins (Saitua *et al.* 2020).

Les exercices sur tapis immergé à une hauteur d'eau suffisante peuvent de manière effective réduire l'accélération des segments osseux et augmenter l'atténuation des forces d'impact à travers les membres antérieurs (voir partie II.2.1) (Greco-Otto *et al.* 2019). Notamment, une réduction de 30 % du pic d'accélération du sabot lors de marche sur tapis immergé à hauteur du grasset par rapport au tapis à sec est rapportée. **Cela pourrait avoir un effet clinique significatif sur la prise en charge de boiteries chez le cheval de sport, fréquemment associées à de l'ostéoarthrose de type I de l'articulation métacarpo-phalangienne, sur laquelle les différentes techniques de ferrage ont un effet négligeable**.

À retenir :
L'ajout d'exercices aquatiques pourrait aider à réduire les sollicitations sur la partie lamellaire du sabot, les muscles, et les articulations du cheval, lors de l'atténuation active et passive des impacts, et donc participer à la prévention ou réhabilitation des lésions musculosquelettiques des membres.

5. Exemples de mise en pratique de la réhabilitation sur tapis immergé

5.1. Réhabilitation suite au retrait d'un fragment ostéochondral chez des chevaux de course (Potenza *et al.* 2020)

Le cartilage articulaire présente une capacité de cicatrisation limitée, et un exercice contrôlé suite au retrait d'un fragment ostéochondral par arthroscopie est recommandé pour favoriser une reconstruction normale du tissu.
Une étude rétrospective chez des pur-sang anglais de course traités chirurgicalement par arthroscopie pour le retrait d'un fragment ostéochondral entre janvier 2011 et juin 2016 est menée par Potenza *et al.* (2020). Les caractéristiques de l'étude et les résultats sont donnés dans les Tableaux XXXV et XXXVI.

Tableau XXXV : Caractéristiques de l'étude rétrospective menée par Potenza *et al.* (2020), *source : Delacharlerie Aurore.*

<table>
<tr><td colspan="5">Animaux
n = 174 chirurgies
Âge médian = 3 ans (Quartiles : 2-4)</td></tr>
<tr><td colspan="5">Protocole</td></tr>
<tr><td>Jour 0</td><td>Jours 1 à 14</td><td>Jours 14 à 30</td><td colspan="2">Jours 30 à la fin (4 à 8 semaines, selon la décision de l'entraineur pour le retour à l'entrainement)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Chirurgie d'arthroscopie pour le retrait d'un fragment ostéochondral au niveau de l'articulation métacarpo-phalangienne, ou métatarso-phalangienne ou du carpe (médio-carpienne et/ou antébrachio-carpienne).</td><td rowspan="2">Repos au box.</td><td rowspan="2">- 5 min de marche en main deux fois par jour.
- Augmentation du temps de marche de 5 min par semaine.</td><td>Groupe de réhabilitation conventionnelle
(104 chirurgies)</td><td>Poursuite de la marche contrôlée uniquement.</td></tr>
<tr><td>Groupe de réhabilitation mixte
(70 chirurgies)</td><td>Poursuite de la marche contrôlée
+
Tapis immergé :
- Hauteur de l'eau = 145 cm
- 7 jours/semaine, 8 min par jour, avec une augmentation de 2 à 3 min par semaine.</td></tr>
</table>

<u>Tableau XXXVI</u> : Résultats des performances post chirurgie de l'étude rétrospective menée par Potenza *et al.* (2020), *source : Delacharlerie Aurore.*

Résultats	Groupe de réhabilitation mixte	Groupe de réhabilitation conventionnelle
Retour aux courses après chirurgie	Médiane de 227 jours (Quartiles : 185 - 281)	Médiane de 239 jours (Quartiles : 205 – 303)
Nombre total de chevaux participant à une course après chirurgie	65/70 (93 %)	87/104 (84 %)
Nombre total de chevaux retournant en course après chirurgie	58/70 (83 %)	63/104 (61 %)
	Différence significative entre les deux groupes	
Biais	- Allocation dans l'un des deux groupes de réhabilitation selon le choix de l'entraineur ou du propriétaire. - Plus de chevaux n'ayant jamais couru dans le groupe conventionnel, et plus de chevaux ayant déjà couru et fait leur preuve, comme le montre le *Beyer Speed Figure* des trois dernières courses avant chirurgie, dans le groupe mixte (leur potentiel justifie de mettre davantage de moyens dans la réhabilitation).	

Les résultats de l'étude montrent que les chevaux réhabilités avec ajout d'un tapis immergé suite à une chirurgie d'arthroscopie présentent plus de chance de courir après la chirurgie que les chevaux ayant suivi une réhabilitation conventionnelle. Le temps de réhabilitation nécessaire avant le retour en course est rapporté inférieur de deux semaines, bien que non significatif, pour la réhabilitation mixte par rapport à la réhabilitation conventionnelle. Ce dernier paramètre est intéressant car l'augmentation du temps de convalescence a des répercussions directes sur les gains totaux et par départ du cheval sur sa carrière.

Les auteurs suggèrent que le conditionnement sur tapis immergé peut effectivement avoir un impact positif sur les performances des chevaux après chirurgie d'arthroscopie, mais une étude randomisée et plus contrôlée serait nécessaire pour appuyer les résultats. Cette étude présente l'intérêt de se rapporter à des cas cliniques réels, mais des biais en lien avec le budget disponible, l'entraineur, le propriétaire, les performances pré chirurgie ont influencé partiellement le choix du traitement, et donc en partie les résultats post chirurgie de l'étude.

5.2. <u>Réhabilitation suite à une fracture</u> (King, Johnson, Daglish 2022)

Après réparation d'une fracture (jour 0), les protocoles de réhabilitation visent à moduler la douleur, favoriser la cicatrisation osseuse, améliorer la proprioception, augmenter la flexibilité et rétablir la force musculaire, l'amplitude du mouvement articulaire et le contrôle neuromoteur. Le processus de réhabilitation peut être divisé en trois phases : les phases inflammatoire, de réparation, et de remodelage.

- Durant la **phase inflammatoire** (jours 1 à 7), l'objectif est de limiter la douleur, minimiser l'inflammation des tissus mous et l'œdème, diminuer les spasmes musculaires et assurer le maintien de l'amplitude du mouvement des articulations distale et proximale à la région immobilisée. Afin de favoriser l'initiation de la cicatrisation, la mise en charge de l'os lésé et des tissus mous avoisinants doit être limitée durant cette période.
- Durant la **phase de réparation** (jours 7 à 30), la stimulation de l'angiogenèse augmente la formation du tissu de granulation autour du site de fracture. Un contrôle approprié de la mise en charge cyclique du site aide à la formation du cal osseux et améliore la force mécanique de l'os. Les protocoles de réhabilitation mis en place doivent stimuler la réparation du tissu osseux selon les forces de traction appliquées, sans toutefois surcharger le site ou créer des micro-mouvements excessifs entre les fragments osseux ce qui altèrerait le processus de cicatrisation.

Les objectifs sont également de rétablir l'amplitude du mouvement articulaire, améliorer la proprioception, et initier des exercices de renforcement musculaire. Des contractures des capsules articulaires et des muscles locomoteurs sont souvent observées suite à une période d'immobilisation ; des exercices pour les limiter doivent être inités aussi tôt que possible.

- Durant la **phase de remodelage** (plus de 30 jours), la mise en charge des tissus lésés peut être augmentée progressivement. Les objectifs sont de rétablir la puissance, la force, l'agilité et l'endurance musculaire, la proprioception, l'amplitude du mouvement, et la condition cardiovasculaire.

La période d'immobilisation, associée à la prise en charge de la fracture, peut induire de l'ostéopénie de non utilisation et une atrophie musculaire. L'atrophie musculaire peut survenir dès 72 heures d'immobilisation, menant rapidement à une perte de fonction et une altération de la locomotion[134]. Le rétablissement de la masse, de la force et du contrôle musculaire prend souvent deux à quatre fois plus de temps que la durée d'immobilisation[135], menant à une période de convalescence prolongée malgré une cicatrisation adéquate de la fracture. Le contrôle de la charge mécanique durant l'exercice est également essentielle afin de promouvoir l'ostéogenèse. Le manque de mise en charge impacte négativement le métabolisme osseux et peut retarder la cicatrisation de la fracture[136] (voir Chapitre 2).

Chez la femme après la ménopause, il a été montré que la marche dans l'eau améliore la densité minérale osseuse, la force musculaire, l'amplitude du mouvement articulaire, le contrôle neuromoteur, l'équilibre et la proprioception[137]. De même, la marche dans une eau profonde (à hauteur du processus xiphoïde) peut être utilisée dans les premiers stades suivant la réparation d'une fracture chez l'Homme, quand les incisions ont cicatrisé, pour améliorer la mobilisation, le contrôle neuromoteur et corriger la démarche[138]. Les tapis antigravité sont également utilisés pour permettre l'introduction d'exercices de course de faible intensité tout en contrôlant la vitesse et le pourcentage de poids corporel appliqué de façon indépendante[139]. Des bénéfices similaires peuvent être extrapolés aux chevaux se rétablissant d'une fracture.

La marche sur tapis immergé peut fournir un moyen efficace de réhabilitation des chevaux après une fracture au niveau d'un membre. L'augmentation du niveau d'immersion permet de diminuer la mise en charge axiale des membres via la flottabilité, mais aussi d'augmenter l'amplitude du mouvement articulaire et le recrutement musculaire, de sorte que les contractions musculaires en elles-mêmes fournissent un stimulus ostéogénique efficace et permettent l'augmentation de la densité minérale osseuse[140]. Le tapis immergé répond ainsi à plusieurs objectifs de la réhabilitation : le travail de l'amplitude du mouvement articulaire, de la proprioception, et de l'équilibre, la mise en charge progressive du membre atteint et le renforcement musculaire. Au sein du programme de réhabilitation d'une fracture, les exercices sur tapis immergé interviennent en association avec d'autres techniques (thermothérapie, thérapie laser, thérapie par ultrasons, stimulation neuromusculaire électrique, barres au sol, mouvements articulaires passifs, stimulateurs tactiles, élastiques pour le travail en résistance…). Les considérations générales pour la réhabilitation sur tapis immergé d'une fracture au niveau d'un membre chez le cheval sont présentées dans le tableau XXXVII.

---

[134] Law, P.P. and Cheing, G.L. (2004). Optimal stimulation frequency of transcutaneous electrical nerve stimulation on people with knee osteoarthritis. J. Rehabil. Med. 36: 220–225.

[135] Yoshiko, A., Yamauchi, K., Kato, T. et al. (2018). Effects of post-fracture non-weight-bearing immobilization on muscle atrophy, intramuscular and intermuscular adipose tissues in the thigh and calf. Skeletal Radiol. 47: 1541–1549.

[136] Hente, R., Füchtmeier, B., Schlegel, U. et al. (2004). The influence of cyclic compression and distraction on the healing of experimental tibial fractures. J. Orthop. Res. 22(4): 709–715.

[137] Moreira, L.D.F., Oliveira, M.L., Lirani-Galvão, A.P. et al. (2014). Physical exercise and osteoporosis: effects of different types of exercises on bone and physical function of postmenopausal women. Arq. Bras. Endocrinol. Metabol. 58: 514–522.

[138] Nyland, J. and Kaya, D. (2019). Rehabilitation principles following minimally invasive fracture fixation. Intraarticular Fract 4 (22): 41–57.

[139] Kuhns, B.D., Weber, A.E., Batko, B. et al. (2017). A four phase physical therapy regimen for returning athletes to sport following hip arthroscopy for femoroacetabular impingement with routine capsular closure. Int. J. Sports Phys. Ther. 12: 683–696.

[140] Rueff-Barroso, C.R., Milagres, D., do Valle, J. et al. (2008). Bone healing in rats submitted to weight-bearing and non-weight-bearing exercises. Med. Sci. Monit. 14: BR231–BR236.

Les mesures pouvant être réalisées pour suivre l'évolution de la réhabilitation sont : l'amplitude du mouvement articulaire passif, les seuils nociceptifs mécaniques, et la circonférence des membres pour évaluer la masse musculaire et la diminution de l'œdème des membres ou de l'effusion articulaire.

<u>Tableau XXXVII</u> : Considérations générales pour la réhabilitation sur tapis immergé d'une fracture au niveau d'un membre, *d'après King, Johnson, et Daglish (2022).*

	Phase inflammatoire (jours 1 à 7)	**Phase de réparation (jours 7 à 30)**	**Phase de remodelage (plus de 30 jours)**
Prérequis	Non recommandé	À la radiographie, mise en évidence de la stabilité et cicatrisation du site de fracture.	/
Niveau d'eau		Au niveau de la pointe de l'épaule, ou au-dessus, permettant une diminution du poids de plus de 50 %.	Au niveau de la pointe de l'épaule, ou au dessus ; puis diminuer la profondeur de l'eau selon les améliorations de cicatrisation visibles à la radiographie.
Vitesse		0,7–1,2 m/s	- Augmentation graduelle une fois que la durée de 20 à 30 min par session a été atteinte. - Ne pas dépasser un pas rapide.
Durée		- Commencer à 5 min par session. - Augmentation de 5 min par semaine selon la progression individuelle du cheval. - Jusqu'à un maximum de 20 à 30 min.	20 à 30 min par session
Fréquence		3 à 4 fois par semaine	Jusqu'à 5 fois par semaine

5.3. <u>Réhabilitation suite à une lésion tendineuse légère à modérée</u>

En Annexe 5 est donné un exemple de programme de réhabilitation sur tapis immergé utilisé à l'Université du Tennessee en 2011 pour une lésion tendineuse légère à modérée (Adair 2011).

6. Contre-indications et précautions à la thérapie aquatique

Des contre-indications ou précautions liées aux différentes conditions musculosquelettiques ont été développées dans les parties correspondantes. Adair (2011) et King (2016) proposent une liste plus générale :

- **Atteinte respiratoire** : l'augmentation de la pression hydrostatique va impacter le volume pulmonaire et la ventilation (Becker 2009) ;
- **Atteinte cardiovasculaire** : l'augmentation de la pression hydrostatique entraine une augmentation du retour veineux, du volume d'éjection systolique, du débit cardiaque ; et la température peut moduler les résistances périphériques (Becker 2009) ;
- **Incision chirurgicale en cours de cicatrisation** ;
- **Plaies** ouvertes, infectées ou drainantes ;
- **Myosite aiguë** ;
- **Inflammation articulaire aiguë** ;
- Dans les **quatre jours suivant une injection intra-articulaire** (Nankervis *et al*. 2021) **;**
- **Affection cutanée** ;
- **Hyperthermie** ;
- **Animal craintif ou paniqué**.

Il est recommandé de vérifier l'absence de **coupures ou abrasions de la peau** avant une session sur le tapis immergé, car **l'eau peut véhiculer des bactéries** qui pourront générer une infection. Cela explique la contre-indication à l'exercice dans les jours suivant une injection intra-articulaire. Il est recommandé également d'examiner les membres pour rechercher des signes de gale de boue, qui serait exacerbée par l'immersion. L'immersion quotidienne dans l'eau peut également réduire l'intégrité de la peau et retarder la cicatrisation de plaie (Equine Hydrotherapy Working Group 2020).

VI. Mise en pratique : fonctionnement d'un centre de réhabilitation équine (Haras de la Belletière) – Cas clinique

1. Présentation générale

Créé en 2010 en Normandie par Thierry Neuzillet, le Haras de la Belletière compte vingt boxes et huit paddocks (sur 10 hectares). Les **installations** regroupent un rond de longe plat, des ronds de longe dans les coteaux (avec des dénivelés plus ou moins marqués), des équipements de saut d'obstacle, un accès à la rivière, des pistes de trotting, et plusieurs équipements de la marque Horse-Trainer® : un tapis à sec, un tapis immergé, un spa, un solarium, et un tapis vibrant.

La **patientèle** comprend un nombre important de chevaux de toutes disciplines, de tous niveaux, toutes races et tous âges : saut d'obstacle, course de plat (trot et galop), course de haies, complet, techniques de randonnée équestre de compétition, dressage, *horse-ball*, endurance, et attelage.

Trois types de cures sont proposées au sein du haras :

1- **Repos** (physique et mental) ;
2- **Post-traumatique** ;
3- **Préparation physique.**

Dans le cadre du programme de réhabilitation d'un athlète, la cure post-traumatique peut être suivie d'une cure de préparation physique.

Figure 47 : Photographie d'un cheval en immersion dans la rivière, *source : Delacharlerie Aurore.*

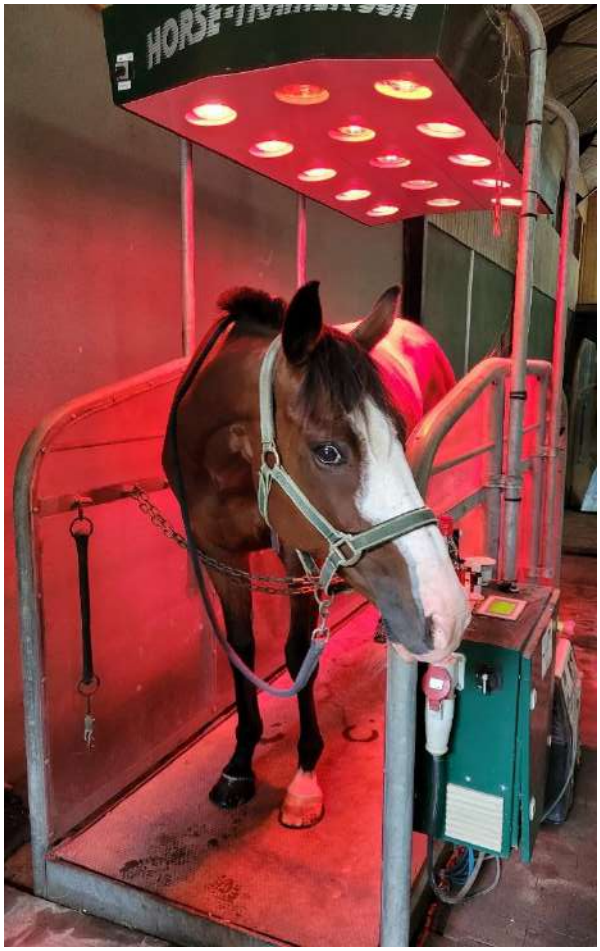


Figure 48 : Photographie d'un cheval sur le plateau vibrant avec solarium, *source : Delacharlerie Aurore.*

Figure 49 : Photographie d'un cheval sur tapis à sec, *source : Delacharlerie Aurore.*

Figure 50 : Photographie d'un cheval sur tapis à sec, *source : Delacharlerie Aurore.*

2. Réhabilitation physique d'un athlète

Plusieurs points sont importants à prendre en considération :

- Il est défini ici une philosophie de protocole de réhabilitation plutôt qu'un protocole fixe, car les différents paramètres de construction du protocole varient selon les capacités du cheval et son évolution au sein d'une séance et au cours des séances. Thierry Neuzillet propose « C'est le cheval qui décide ». Le programme de réhabilitation est à ajuster en fonction des réponses du cheval aux différents exercices.
- Il est nécessaire de dessiner un plan de progression avec des phases de contrôle.
- Dans certains cas, la lésion visible est secondaire à une autre affection sous-jacente. Il est important de la diagnostiquer, afin de la traiter simultanément et de réduire les risques de récidive.
- La réhabilitation résulte d'une coopération entre différents acteurs : vétérinaire, ostéopathe, masseur, maréchal-ferrant, physiothérapeute. Elle est pluridisciplinaire.
- Il est intéressant de noter que le succès du programme de réhabilitation dépend ensuite en partie du respect des conseils de remise à l'entrainement donnés au propriétaire.

Trois limites sont à respecter lors de l'élaboration d'un programme :

- La **limite médicale** : donnée par le dossier vétérinaire du patient. Elle dépend de l'affection du cheval, et des limites qui en résultent pour la cicatrisation et la préservation des tissus ;
- La **limite de douleur ;**
- La **limite physique** : elle dépend de ce que le cheval est intrinsèquement capable de produire comme effort. D'un point de vue pratique, la **limite de décontraction** est utilisée (limite au-dessus de laquelle le travail demandé excède la capacité physique du cheval).

2.1. En phase post-traumatique

En phase post-traumatique, plusieurs modalités pourront être associées : marche en main, cryothérapie, thermothérapie, mobilisation passive, rivière, spa, solarium, tapis à sec, tapis immergé, plateau vibrant, électrostimulation, masseur, ostéopathe, maréchal-ferrant…
Le choix des modalités et la chronologie d'utilisation dépendent de l'affection rencontrée.

Le plateau vibrant présente 3 programmes :

- Massage : utilisé après une grosse session d'exercice pour la récupération ou dans la cure de repos ;
- Drainage lymphatique : par exemple dans le cas de lymphangites ;
- Musculation, en supposant un mécanisme similaire aux plateformes vibrantes *(Power Plate®)* : mais le cheval n'effectuant pas d'exercices associés à une contraction musculaire sur le plateau, ce programme est peu convaincant.

Le solarium est utilisé pour :

- Sécher les chevaux après une session sur tapis immergé ou ayant généré de la transpiration ;
- Réchauffer les muscles du dos avant une session d'exercice chez les chevaux contracturés, ou avant une séance d'ostéopathie.

Le spa présente des remous et une température entre 2 et 4 °C. Il est possible d'utiliser une eau minérale (Sulfate de Magnésium et Chlorure de Sodium), mais Thierry Neuzillet trouve cela plus agressif pour les tissus cutanés, et donc privilégie l'eau douce.

L'immersion dans la **rivière** présente l'intérêt de la température de l'eau (froide), de la pression hydrostatique et du courant (générant en partie un effet massant), et de l'effet supposé calmant psychologiquement.

Le tapis immergé :

i. Caractéristiques générales du tapis immergé

Tableau XXXVIII : Caractéristiques du tapis immergé utilisé au Haras de la Belletière (Horse-Trainer®), *source : Delacharlerie Aurore.*

Volume de la cuve de stockage	5000 L
Température de l'eau	Ambiante
Système de filtration	Filtre en plastique pour les grosses particules puis filtre au sable. Les chevaux sont équipés de harnais pour la collection des crottins.
Gestion de l'eau	Possibilité de réutilisation. En pratique changée tous les 1 à 2 jours. Éliminée dans la rivière.
Hauteur d'eau maximale	1,2 mètres
Vitesse maximale	3,5 m/s
Entretien	Une fois par semaine lavage du tapis avec de l'eau vinaigrée et du liquide vaisselle, et graissage des composants.

Les **indications** d'utilisation du tapis immergé sont par exemple (liste non exhaustive) : réhabilitation suite à de l'ostéoarthrose, entorse, tendinite, maladie naviculaire, fracture distale d'un membre ou du bassin, en post-opératoire pour la reprise de condition physique, œdème, hématome, ankylose articulaire, arthroscopie, pour le renforcement musculaire ou le conditionnement cardiovasculaire.
Les **contre-indications** à l'utilisation du tapis immergé sont des douleurs de dos en région cervicale ou thoracique, des plaies, ou une entorse aiguë de l'épaule.

Figure 51 : Photographie d'un cheval sur tapis immergé, *source : Delacharlerie Aurore.*

<u>Figure 52</u> : Photographies de chevaux sur tapis immergé, *source : Delacharlerie Aurore.*

ii. Choix des paramètres d'exercice sur tapis immergé

Pour la construction d'un programme d'exercice sur tapis immergé, le choix des différents paramètres s'effectue comme suit :

- ***Hauteur de l'eau***

Le principe de détermination de la hauteur de l'eau appliqué au Haras de la Belletière est le suivant :

- Faire monter l'eau progressivement jusqu'à une hauteur maximale de 1 mètre ;
- À mesure de l'élévation du niveau de l'eau, chercher le dépassement de la limite de douleur ou de décontraction, tout en tenant compte des considérations suivantes :
    - L'articulation située au-dessus du niveau de l'eau travaille le plus ;
    - Afin d'augmenter l'amplitude du mouvement d'une articulation, le niveau d'eau doit être maintenu en dessous de cette articulation ;
    - Le niveau d'eau doit couvrir la zone inflammée ;
    - Attention aux problèmes de dos : plus le niveau est élevé plus le cheval a tendance à être en extension.

- ***Durée***

L'objectif est d'atteindre une durée de session d'une heure. Mais en pratique, le cheval marche jusqu'à ce qu'il soit fatigué. Donc la durée est à moduler selon la capacité du cheval.

- ***Vitesse***

La vitesse est augmentée progressivement, tant que le cheval présente une démarche normale et engage suffisamment ses postérieurs. Les vitesses utilisées varient entre 0,8 et 2,5 m/s.

iii. Méthode d'acclimatation des chevaux au tapis immergé

L'acclimatation se fait en plusieurs étapes successives :

- Passages successifs et arrêts sur le tapis à sec ;
- Arrêt sur tapis à sec, reculé pour sentir la barre de recul, mise en place des attaches au niveau de la tête ;
- Début de mise en mouvement du tapis à sec ;
- Lorsque le cheval est complètement habitué à l'exercice sur tapis à sec, début de travail sur tapis immergé. L'eau est alors introduite directement jusqu'à la hauteur ciblée, lorsque le cheval est en mouvement.

iv. Effets secondaires

Des problèmes de peau peuvent survenir suite aux immersions répétées des membres, avec l'apparition de croûtes. Cela est pris en charge assez efficacement par des savons à la povidone iodée sur les zones atteintes après chaque session sur tapis immergé.

Figure 53 : Photographie montrant l'apparition de croûtes en face palmaire du paturon suite à des immersions répétées, *source : Delacharlerie Aurore.*

Figure 54 : Photographie du harnais pour la collection des crottins lors du travail sur tapis immergé, *source : Delacharlerie Aurore.*

2.2. En phase de préparation physique

En phase de préparation physique, plusieurs modalités pourront être associées :

- Tapis à sec pour le renforcement de la ligne du dos et de l'arrière-main. Le trot peut parfois être utilisé (jusqu'à 2,7 à 4,2 m/s). Le sol dur associé au tapis est parfois utile en fin de réhabilitation pour la mise en tension des tendons.
- Tapis immergé pour le renforcement de la ligne du dos et de l'avant main, voire des abdominaux (le cheval les contracte au contact des gouttelettes d'eau).
- Longe (avec ou sans dénivelé) pour le renforcement de la ligne du dos et des abdominaux (dans les descentes et lors de galop rassemblé), et le travail de la fonction cardiorespiratoire (endurance).
- Longe avec saut pour le renforcement de la ligne du dos.
- Séances de trot en fractionné (trottings).
- Spa.
- Paddock.

Il est nécessaire au cours du travail de s'assurer de la bonne position du cheval, associant flexion thoraco-lombaire et engagement des postérieurs. Pour aider, un enrênement en col de cygne peut être mis en place (Figure 55).
En pratique, le cheval effectue une heure de tapis par jour, en alternant tapis à sec et tapis immergé. Lorsque l'échéance d'une compétition approche, il peut passer à deux fois une heure par jour. Tous les trois jours le cheval est également longé, avec des sessions de 40 minutes. Des sessions de saut longé peuvent être introduites. Le trotting pourra être proposé dans un second temps, en commençant par une à deux fois par semaine, aves des sessions de 20 à 30 minutes. Le nombre de sessions par semaine pourra ensuite être augmenté parallèlement à la diminution des séances sur tapis.

Lorsque le renforcement musculaire est adéquat, un retour doux sur le terrain ou en piste doit être effectué : cela correspond à la phase de pré-entrainement. Enfin seulement un retour à l'entrainement, puis aux compétitions pourra être envisagé.

L'association des différentes modalités de rééducation au sein du haras permettent essentiellement, d'après Thierry Neuzillet, un gain de temps sur la réathlétisation. Le cheval ne perd pas sa condition physique, ou recommence à la travailler plus rapidement au cours de sa réhabilitation, ce qui permet un retour à l'entrainement en meilleur condition physique.

Figure 55 : Enrênement en col de cygne – longe bleue qui passe des deux côtés du mors et au-dessus de la nuque, *source : Delacharlerie Aurore.*

3. Cas clinique – Exemple d'introduction d'une technique de thérapie aquatique dans le programme de réhabilitation d'un cheval avec une tendinite du tendon du muscle fléchisseur superficiel du doigt

Les éléments présentés ci-dessous sont issus des comptes-rendus d'examens cliniques et échographiques réalisés par le vétérinaire traitant, ainsi que des informations recueillies auprès du centre de réhabilitation du Haras de la Belletière.

3.1. Signalement et anamnèse

Pajaro est un hongre espagnol de huit ans, blessé lors d'une séance d'exercice en marcheur le 5 novembre 2023.

3.2. Évaluation initiale au 7 novembre 2023

Une déformation en relief en région palmaire moyenne du troisième métacarpe gauche, sensible à la palpation, avec augmentation de chaleur, est objectivée.
À l'examen dynamique, une boiterie antérieure gauche de grade 2/5 selon *l'American Association of Equine Practitioners (AAEP)* est rapportée.
A l'échographie, le vétérinaire rapporte sur la coupe transversale en région palmaire moyenne du troisième métacarpe une lésion hétérogène hypoéchogène focale de 0,5 x 1 cm intéressant la région péri-tendineuse superficielle médiale du tendon du muscle fléchisseur superficiel du doigt, et semblant s'infiltrer dans le tendon, avec un épaississement du tendon (Figure 56). Il conclut à une tendinite du tendon du muscle fléchisseur superficiel du doigt antérieur gauche, en phase inflammatoire, avec la lésion hypoéchogène pouvant correspondre à de l'œdème ou une hémorragie, associée possiblement à un hématome péri-tendineux.

Suite à une tendinite du tendon du muscle fléchisseur superficiel du doigt, traitée de manière conservative avec du repos, le taux de récidive est estimé entre 48 et 56 % (Baxter 2020).

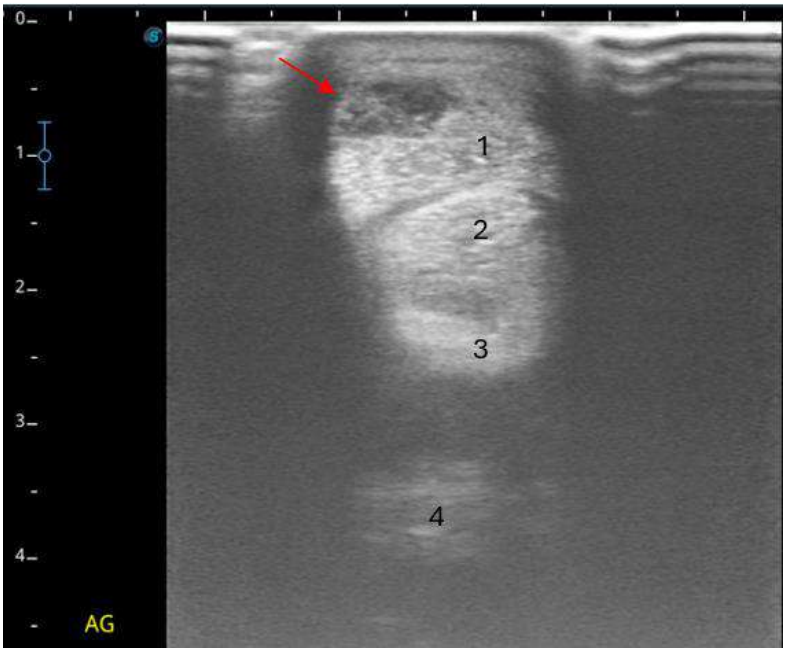


Figure 56 : Échographie en coupe transversale de la déformation en région palmaire moyenne du troisième métacarpe gauche à deux jours post-lésion, *d'après le Haras de la Belletière*.
Visualisation d'une lésion hétérogène hypoéchogène focale de 0,5 x 1 cm intéressant la région péri-tendineuse superficielle médiale du tendon du muscle fléchisseur superficiel du doigt, et semblant s'infiltrer dans le tendon (indiquée par la flèche rouge), avec un épaississement du tendon. 1 : SDFT, 2 : DDFT, 3 : bride carpienne, 4 : LSB.

Pajaro suit le programme de réhabilitation exposé dans le tableau ci-dessous.

<u>Tableau XXXIX</u> : Programme de réhabilitation mis en place suite à la tendinite de Pajaro au cours des semaines 1 à 10, *source : Delacharlerie Aurore.*

Semaines	Programme de réhabilitation
1-2	Repos au box Application de froid avec de la glace Argile Douches d'eau froide Marche en main 5 min une fois par jour
3-4	Repos au box Marche en main 5 min deux fois par jour
5-6	Repos au box Marche en main 10 min deux fois par jour
7-8	Repos au box Marche en main 30 min une fois par jour
9-10	Repos au box Marche en main 35 min une fois par jour

Les propriétaires se rendent en parallèle chez un « sorcier vésicatoire » pour réaliser une injection intra tendineuse intra lésionnelle d'iode, dans le but de « créer de l'inflammation ». Nous n'avons pas davantage d'information sur cette procédure.

3.3. Réévaluation au 15 janvier 2024

La déformation en relief en région palmaire moyenne du troisième métacarpe gauche est toujours présente, sensible à la palpation, sans augmentation de chaleur.
À l'examen dynamique, une boiterie antérieure gauche de grade 1/5 selon l'AAEP est rapportée.
À l'échographie, le vétérinaire rapporte sur la coupe transversale en région palmaire moyenne du troisième métacarpe une lésion hétérogène hypoéchogène focale de 0,25 x 0,75 cm sur la partie superficielle médiale du tendon du muscle fléchisseur superficiel du doigt, avec un épaississement du tendon (Figure 57). La tendinite du tendon du muscle fléchisseur superficiel du doigt évolue vers la phase de réparation, avec un comblement progressif de la lésion, une résorption de l'hématome péri-tendineux, mais la persistance de l'épaississement du tendon.

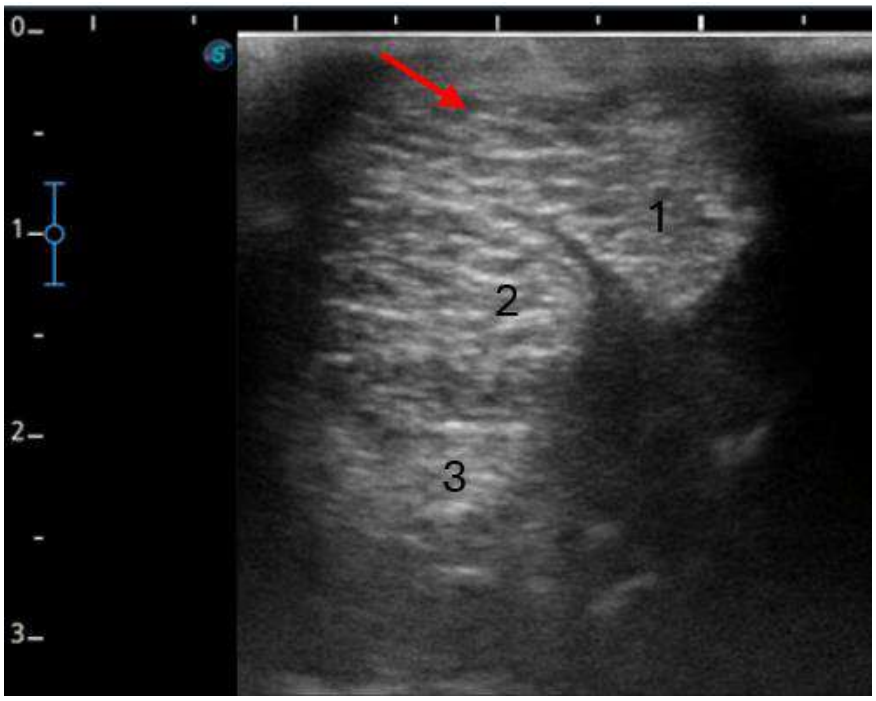


Figure 57 : Échographie en coupe transversale de la déformation en région palmaire moyenne du troisième métacarpe gauche à deux mois post-lésion*, d'après le Haras de la Belletière*.
Visualisation d'une lésion hétérogène hypoéchogène focale de 0,25 x 0,75 cm sur la partie superficielle médiale du tendon du muscle fléchisseur superficiel du doigt (indiquée par la flèche rouge), avec un épaississement du tendon. 1 : SDFT, 2 : DDFT, 3 : bride carpienne.

Pajaro poursuit son programme de réhabilitation, exposé dans le tableau ci-dessous.

Tableau XL : Programme de réhabilitation mis en place suite à la tendinite de Pajaro au cours des semaines 11 à 17, *source : Delacharlerie Aurore.*

Semaines	Programme de réhabilitation
11-12	Repos au box Marche en main 40 min une fois par jour
13-14	Repos au box Marche en main 45 min une fois par jour
15-16	Repos au box Marche en main 1h une fois par jour
17	Repos au box Marche en main 40 min une fois par jour et 5 min de trot

3.4. Réévaluation au 5 mars 2024

La déformation en relief en région palmaire moyenne du troisième métacarpe persiste, sans sensibilité à la palpation.
À l'échographie, le vétérinaire rapporte sur la coupe transversale en région palmaire moyenne du troisième métacarpe une lésion hétérogène hypoéchogène focale de 0,2 x 0,4 cm sur la partie superficielle médiale du tendon du muscle fléchisseur superficiel du doigt (Figure 58). Le tendon apparait bien recolonisé, avec une épaisseur d'aspect normal, en phase de réparation et remodelage.

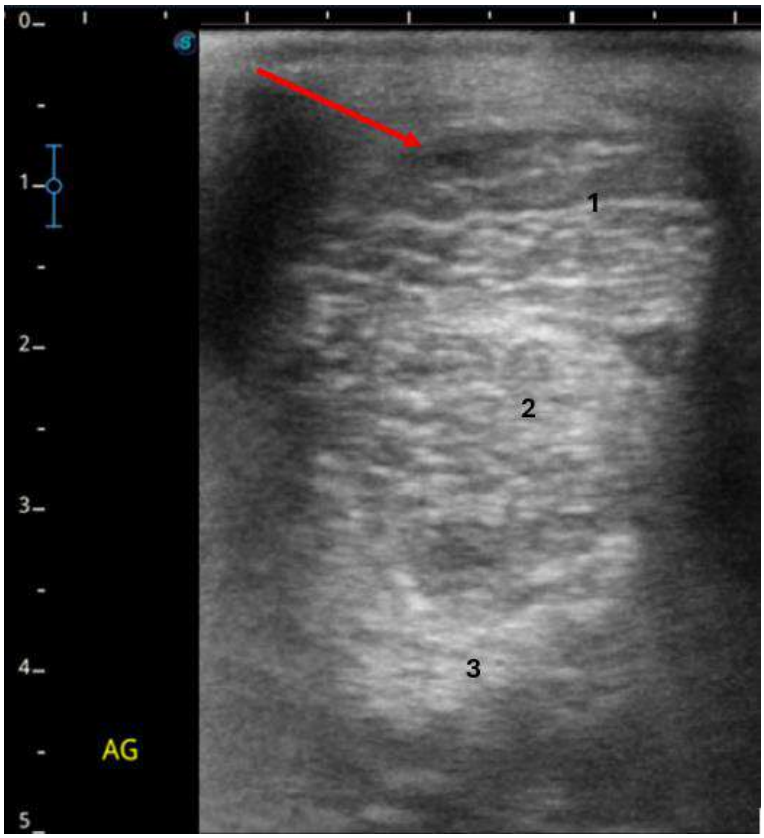


Figure 58 : Échographie en coupe transversale de la déformation en région palmaire moyenne du troisième métacarpe gauche à quatre mois post-lésion*, d'après le Haras de la Belletière*.
Visualisation d'une lésion hétérogène hypoéchogène focale de 0,2 x 0,4 cm sur la partie superficielle médiale du tendon du muscle fléchisseur superficiel du doigt (indiquée par la flèche rouge). 1 : SDFT, 2 : DDFT, 3 : bride carpienne.

La réhabilitation est poursuivie selon le programme exposé dans le tableau ci-dessous.

Tableau XLI : Programme de réhabilitation mis en place suite à la tendinite de Pajaro au cours des semaines 18 à 22, *source : Delacharlerie Aurore.*

Semaines	Programme de réhabilitation
18-19	Box et sortie en paddock Longe avec 35 min de pas et 10 min de trot une fois par jour
20-21	Box et sortie en paddock Longe avec 25 min de pas et 20 min de trot une fois par jour
22	Box et sortie en paddock 45 min d'exercice avec un petit galop un fois par jour

3.5. Réévaluation au 5 avril 2024

La déformation en relief en région palmaire moyenne du troisième métacarpe est toujours présente avec une sensibilité à la palpation et une augmentation de chaleur.
À l'examen dynamique, une boiterie antérieure gauche de grade 1/5 selon l'AAEP est rapportée.
À l'échographie, le vétérinaire rapporte sur la coupe transversale en région palmaire moyenne du troisième métacarpe une lésion étendue hypoéchogène hétérogène de 0,6 x 1,3 cm qui intéresse le péri tendon superficiel et médial, et semble s'infiltrer dans le tendon du muscle fléchisseur superficiel du doigt en région médiale moyenne (Figure 59). Le tendon apparait épaissi. La tendinite semble de nouveau en phase inflammatoire, avec un hématome péri-tendineux, possiblement du fait d'un programme de réhabilitation trop rapide et trop intense.

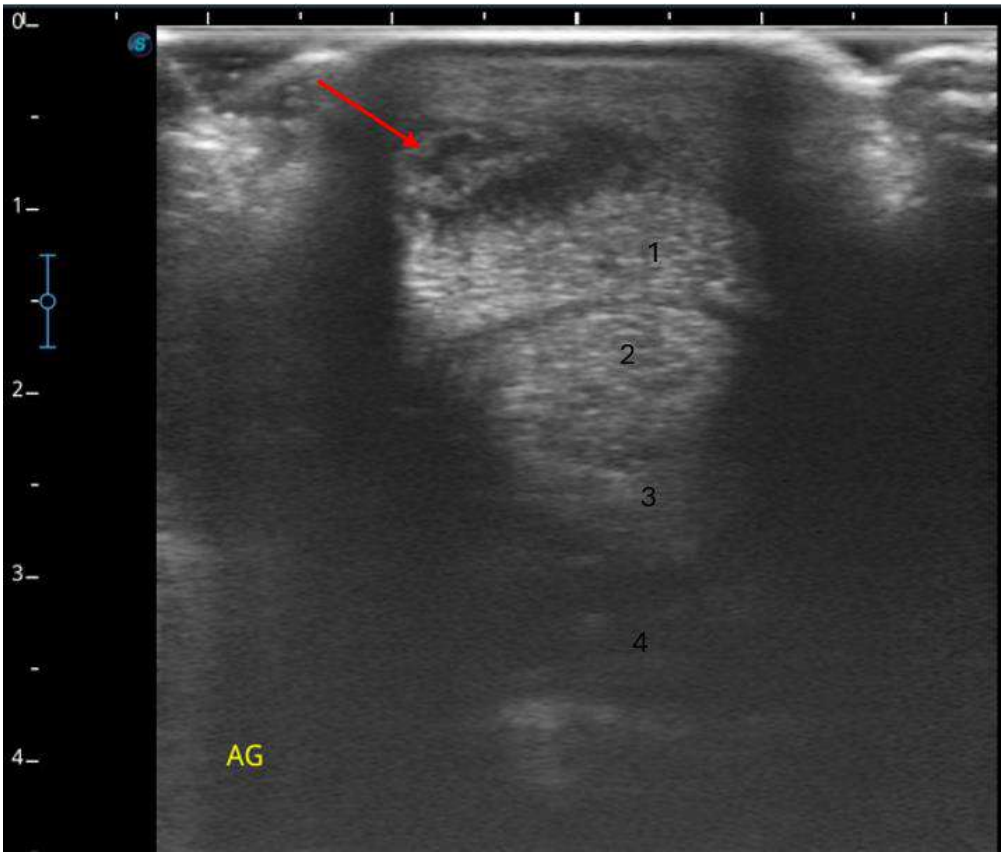


Figure 59 : Échographie en coupe transversale de la déformation en région palmaire moyenne du troisième métacarpe gauche à cinq mois post-lésion*, d'après le Haras de la Belletière*.
Visualisation d'une lésion étendue hypoéchogène hétérogène de 0,6 x 1,3 cm qui intéresse le péri tendon superficiel et médial, et semble s'infiltrer dans le tendon fléchisseur superficiel du doigt en région médiale moyenne (indiquée par la flèche rouge). 1 : SDFT, 2 : DDFT, 3 : bride carpienne, 4 : LSB.

Pajaro est remis au repos au box avec l'application de glace et de bandes compressives et 30 minutes de marche en main une fois par jour pendant une semaine.

3.6. Réévaluation au 16 avril 2024

La déformation en relief en région palmaire moyenne du troisième métacarpe persiste, mais sans augmentation de chaleur.
À l'échographie le vétérinaire rapporte, sur la coupe transversale en région palmaire moyenne du troisième métacarpe, une lésion étendue hypoéchogène hétérogène de 0,5 x 1,25 cm qui intéresse le péri tendon superficiel et médial, et semble s'infiltrer dans le tendon fléchisseur superficiel du doigt en région médiale moyenne (Figure 60). Le tendon apparait toujours épaissi. Une légère diminution de la taille de l'hématome péri tendineux, avec une échogénicité légèrement augmentée, est observée. L'évolution est faible, du fait de la courte durée par rapport au précédent contrôle.

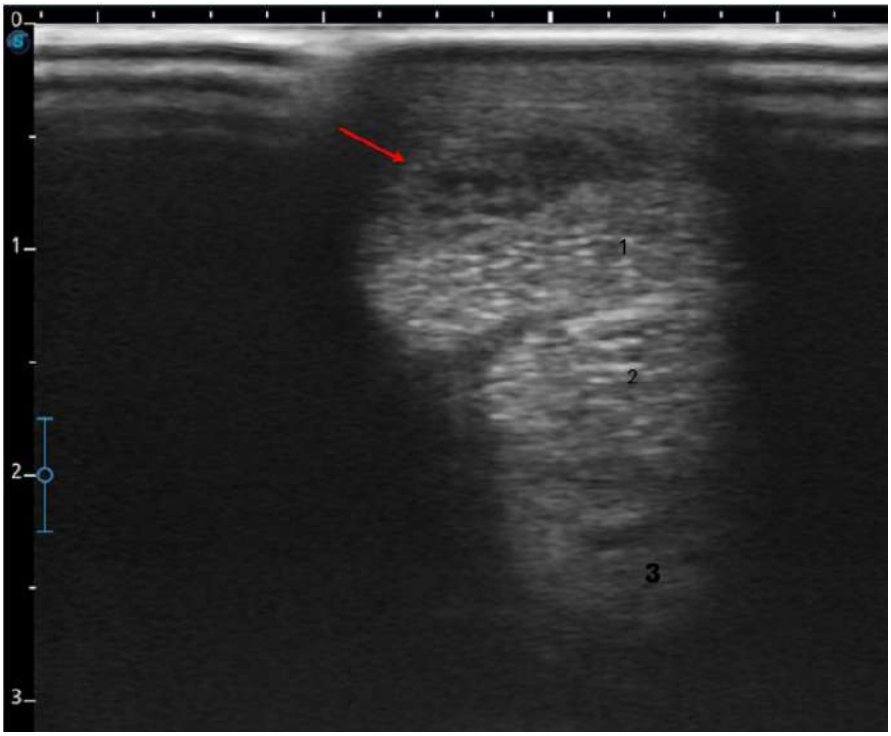


Figure 60 : Échographie en coupe transversale de la déformation en région palmaire moyenne du troisième métacarpe gauche à cinq mois et une semaine post-lésion*, d'après le Haras de la Belletière*.
Visualisation d'une lésion étendue hypoéchogène hétérogène de 0,5 x 1,25 cm qui intéresse le péri tendon superficiel et médial, et semble s'infiltrer dans le tendon fléchisseur superficiel du doigt en région médiale moyenne (indiquée par la flèche rouge). 1 : SDFT, 2 : DDFT, 3 : bride carpienne.

La marche en tapis immergé est alors introduite dans le programme de réhabilitation.

Tableau XLII : Programme de réhabilitation mis en place suite à la tendinite de Pajaro au cours des semaines 24 à 30, *source : Delacharlerie Aurore.*

Semaines	Programme de réhabilitation
24-25	Repos au box Marche en main 40 min une fois par jour
26-30	1 jour sur deux : - 1h de marche sur tapis immergé - 45 min de marche sur tapis à sec

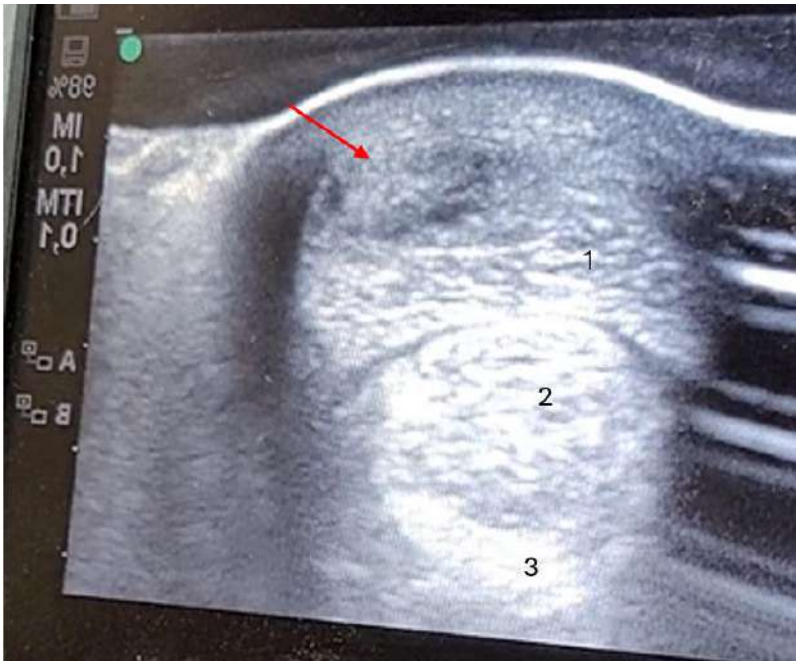
Sur le tapis immergé, la hauteur d'eau est fixée au-dessus du carpe, et la vitesse à 1 m/s. La vitesse du tapis à sec augmente progressivement sur la séance d'exercice de 1,6 m/s à 2 m/s, avant de revenir à la vitesse de départ.

Figure 61 : Photographie de Pajaro sur tapis immergé, *source : Delacharlerie Aurore.*

3.7. Réévaluation au 30 mai 2024

À la réévaluation après un mois de réhabilitation sur tapis immergé et à sec, la déformation en relief en région palmaire moyenne du troisième métacarpe est toujours présente, mais elle est non douloureuse et sans augmentation de chaleur (Figure 62).
À l'examen dynamique, aucune boiterie n'est objectivée.
À l'échographie le vétérinaire rapporte sur la coupe transversale en région palmaire moyenne du troisième métacarpe, une lésion hétérogène légèrement hypoéchogène focale de 0,5 x 1 cm concernant la région péri-tendineuse superficielle médiale et s'infiltrant dans le tendon du muscle fléchisseur superficiel du doigt, avec toujours un épaississement du tendon. L'échogénicité est plus homogène et légèrement augmentée, avec une légère réduction de la taille de la lésion (Figure 63). La tendinite est en phase de réparation et remodelage, avec une résorption parallèle progressive de l'hématome péri-tendineux.

<u>Figure 62</u> : Aspect visuel de la déformation en relief dans la région palmaire moyenne du canon antérieur gauche de Pajaro à six mois et demi post-lésion (indiquée par l'accolade), *source : Delacharlerie Aurore*.



<u>Figure 63</u> : Échographie en coupe transversale de la déformation en région palmaire moyenne du troisième métacarpe gauche à six mois et demi post-lésion*, d'après le Haras de la Belletière*.
Visualisation d'une lésion hétérogène légèrement hypoéchogène focale de 0,5 x 1 cm concernant la région péri-tendineuse superficielle médiale et s'infiltrant dans le tendon du muscle fléchisseur superficiel du doigt (indiquée par la flèche rouge), avec toujours un épaississement du tendon. 1 : SDFT, 2 : DDFT, 3 : bride carpienne.

3.8. Poursuite du programme de réhabilitation

Pour la suite, il est conseillé de maintenir le programme alternant un jour sur deux : une heure d'exercice sur tapis immergé et 45 min sur tapis à sec pendant encore cinq semaines. Après un contrôle échographique, le trot pourra être introduit progressivement en longe, en commençant par 5 minutes par jour, avec une augmentation de 5 minutes toutes les deux semaines jusqu'à 20 minutes. Une réévaluation échographique est conseillée à sept puis à huit mois, avant introduction progressive du galop lent puis rapide dans les séances d'exercice trois fois par semaine.

3.9. Commentaires

La rechute de la tendinite du tendon du muscle fléchisseur superficiel du doigt de Parajo après cinq mois de réhabilitation est potentiellement due à une transition trop rapide vers un exercice trop intense. Il n'est pas possible de conclure que l'introduction du tapis immergé a induit l'amélioration observée dans un second temps, mais cela ne semble pas avoir perturbé le processus de cicatrisation du tendon. La pertinence de l'introduction du tapis immergé au sein du programme de réhabilitation des différentes affections musculosquelettiques du cheval n'a pas encore été prouvée. Un important travail de fond et de recherche est encore nécessaire afin de définir quelles sont les méthodes de thérapie aquatique les plus indiquées, dans quelle fenêtre temporelle, pour quelle affection, et comment suivre objectivement leurs effets.

VII. Construction d'un protocole de réhabilitation

1. Quels protocoles sont aujourd'hui utilisés ?

En 2019, un groupe de travail international sur l'hydrothérapie équine, comprenant des vétérinaires spécialistes, des chercheurs et des utilisateurs expérimentés de tapis immergés, s'est réuni en Angleterre pour établir ce qui était alors considéré comme les meilleures pratiques d'utilisation de ces tapis immergés. Il a été discuté les potentiels bénéfices et les bonnes pratiques générales des exercices sur tapis immergé, les méthodes d'acclimatation aux exercices sur tapis, les facteurs influençant la vitesse, la profondeur de l'eau et la durée de l'exercice, le contrôle du mouvement sur le tapis et l'utilisation optimal de cet outil dans des programmes d'entrainement ou de réhabilitation (Nankervis *et al.* 2021). Les discussions ont mené à la publication du *« Water treadmill guidelines – a guide for users »* en 2020 (Equine Hydrotherapy Working Group 2020).

Les exercices sur tapis immergé ne doivent pas être utilisés seuls ou en premier lieu dans le programme de réhabilitation, **mais bien en association avec d'autres thérapies,** à moins que le cheval présente une affection qui l'exige, et alors sur une période de temps limitée seulement (Nankervis, Launder, Murray 2017 ; Equine Hydrotherapy Working Group 2020).

1.1. Préparation du cheval pour la session et l'après-session

1.1.1. Avant une session

1.1.1.1. Gestion de l'eau

La gestion de l'eau utilisée pour le tapis immergé est particulièrement importante. Les recommandations données par le constructeur du tapis sont à suivre.
Il est généralement conseillé, avant une session sur tapis immergé (Nankervis *et al.* 2021) :

- De brosser le cheval ;
- De curer les pieds ;
- De bander la queue ;
- De doucher le pelage et les sabots du cheval afin de finir de retirer les poussières superficielles.

Ces pratiques, tout en permettant de limiter la contamination de l'eau, permettent également de vérifier que le cheval ne présente pas de lésions, lacérations ou abrasions de la peau au niveau des zones qui seront immergées, ce qui constituerait alors une contre-indication.

1.1.1.2. Ferrure

Il n'est pas nécessaire de déferrer pour réaliser un exercice sur tapis immergé, mais il faut s'assurer que les fers sont correctement fixés, et éviter les fers modifiés, comme les extensions larges latérales qui pourront augmenter la force de trainée dans l'eau et altérer l'arc d'envol. Également, sont à proscrire les clous à tête trop proéminente ou les fers à crampons, qui endommageraient le tapis (Nankervis, Launder, Murray 2017 ; Nankervis *et al.* 2021).

1.1.1.3. Équipements de protection

Il n'est pas recommandé d'équiper le cheval de cloches ou guêtres lors d'exercice sur tapis immergé, à moins d'indications spécifiques, afin d'éviter d'effrayer le cheval si elles glissent ou se détachent dans l'eau (Nankervis *et al.* 2021).

1.1.1.4. Échauffement

Dans leur étude, Tranquille *et al.* (2018) rapportent que 45 % des centres utilisant un tapis immergé échauffent activement les chevaux avant l'exercice sur le tapis (dans un marcheur, par marche en main, longe, exercice monté, marche lente sur le tapis immergé ou un tapis à sec), et 20 % les échauffent passivement (solarium, tapis massant).

1.1.2. Après une session

Après une session sur tapis immergé, il est recommandé de doucher de nouveau le cheval, notamment si l'eau est traitée au chlore ou au brome, afin de retirer ces composés chimiques du pelage et de la peau du cheval, puis de le sécher (serviette, solarium). Il faut s'assurer que la peau et les sabots ont le temps de sécher complètement entre deux sessions (Tranquille *et al.* 2018 ; Nankervis *et al.* 2021). Des soins de routine des sabots entre les sessions sont recommandés.

1.2. Habituation du cheval

1.2.1. Contention

Les personnes manipulant les chevaux devraient porter des équipements de protection. Deux personnes sont conseillées pour tenir le cheval, le maintenir droit, et assurer la sécurité. Les chevaux peuvent être tenus avec un licol ou un filet, dans la mesure où cela permet un contrôle adéquat du cheval sans générer de restrictions aux mouvements naturels de la tête et de l'encolure. L'entrée et la sortie du cheval sur le tapis doivent être conduites de sorte que les personnes qui manipulent le cheval ne se retrouvent pas directement devant ou derrière l'animal. Idéalement, les chevaux doivent être entrainés à être menés de côté (Nankervis *et al.* 2021).

1.2.2. Introduction à l'exercice

Plusieurs études chez l'Homme[141,142,143] et le cheval[144,145,146,147] ont montré que la locomotion sur terre et sur tapis à sec sont différentes, de même que sur terre et tapis immergé (McCrae *et al.* 2021). Les chevaux ont besoin d'un certain temps d'habituation pour effectuer des exercices sur tapis immergé sans anxiété et avec une démarche stable. Une étude d'acclimatation à la marche sur tapis à sec[148] a montré qu'au moins trois sessions de cinq minutes sont nécessaires pour que la cinématique du trot se stabilise, et qu'au pas cela peut prendre jusqu'à dix sessions. Une fois le cheval habitué au tapis, il faut environ une minute pour stabiliser la démarche à chaque fois que le tapis démarre ou change de vitesse.

Les variables physiologiques (Nankervis, Williams 2006) et de la foulée (Scott *et al.* 2010) lors d'acclimatation au tapis immergé ont été étudiées chez le cheval au pas. Nankervis et Williams (2006) concluent qu'un minimum de deux sessions d'habituation de 15 minutes sont nécessaires pour obtenir une fréquence cardiaque stable chez des chevaux marchant sur tapis immergé. Scott *et al.* (2010) mesurent la fréquence de la foulée, et suggèrent un état stable à partir de la quatrième séance.

Il apparait donc que **la fréquence cardiaque atteint un état stable avant les variables biomécaniques lors d'acclimatation au tapis immergé**, et qu'ainsi **au moins trois sessions sont nécessaires à une stabilisation** de ces variables (Tranquille *et al.* 2017). Aucune étude ne décrit pour l'instant ces variables chez les chevaux trottant sur tapis immergé (Tranquille *et al*. 2018 ; Saitua *et al.* 2020).

---

[141] Frishberg BA. An analysis of overground and treadmill sprinting. Med Sci Sports Exerc 1983;15:478e85.

[142] Stolze H, Kuhtz-Buschbeck JP, Mondwurf C, Boczek-Funcke A, Johnk K, Deuschl G, et al. Gait analysis during treadmill and overground locomotion in children and adults. Electroencephalogr Clin Neurophysiol 1997;105:490e7.

[143] Riley PO, Dicharry J, Franz J, Della Croce U, Wilder RP, Kerrigan DC. A kinematics and kinematic comparison of overground and treadmill running. Med Sci Sports Exerc 2008;40:1093e100.

[144] Fredricson I, Drevemo S, Dalin G, Hjerten G, Bj orne K, Rynde R, et al. Treadmill € for equine locomotion analysis. Equine Vet J 1983;15:111e5.

[145] Barrey E, Galloux P, Valette JP, Auvinet B, Wolter R. Stride characteristics of over ground versus treadmill locomotion. Acta Anat 1993;146:90e4.

[146] Buchner HHF, Savelberg HHCM, Schamhardt HC, Merkens HW, Barneveld A. Kinematics of treadmill versus overground locomotion in horses. Vet Q 1994;16:87e90.

[147] Mendez-Angulo JL, Firshman AM, Groschen DM, Kieffer PJ, Trumble TN. Impact of walking surface on the range of motion of equine distal limb joints for rehabilitation purposes. Vet J 2014;199:413e8.

[148] Buchner HHF, Savelberg HHCM, Schamhardt HC, Merkens HW, Barneveld A. Habituation of horses to treadmill locomotion. Equine Vet J 1994;26:13e5.

Nankervis *et al.* (2021) statuent que les chevaux semblent s'habituer plus rapidement à l'exercice sur tapis immergé, évalué par une démarche détendue et rythmique, lorsque :

- Plusieurs courtes sessions d'acclimatation au tapis, de maximum 15 minutes, sont menées sur une courte période. Idéalement, **trois sessions de maximum 15 minutes sont menées sur trois jours consécutifs**. Dans tous les cas, il est recommandé d'effectuer les deux premières sessions dans la même semaine, et il est déconseillé d'entamer un processus d'acclimatation si l'exercice ne peut être répété dans les 14 jours.
- **Pour la première session, le consensus pour la hauteur de l'eau est donné au niveau des boulets. Le niveau d'eau est ensuite augmenté progressivement les sessions suivantes**. Il est important de garder en tête que le cheval prendra conscience de l'introduction d'eau lorsque le niveau dépasse la bande coronaire.

Suffisamment de temps doit être accordé à la première session, de sorte à présenter le tapis calmement au cheval, à procéder par étapes, et à ce que l'animal conserve une expérience positive.
Pour préparer le cheval à la mise en marche du tapis, il est possible de lui faire faire un pas vers l'arrière, puis vers l'avant, et de déclencher le tapis au moment où le cheval s'apprête à avancer son membre (Nankervis *et al.* 2021).

Dans leur enquête, Tranquille *et al.* (2018) ont montré que sept centres sur neuf réalisent entre deux et trois sessions d'acclimatation pour habituer le cheval à la vitesse et la profondeur d'eau requise pour l'exercice sur tapis immergé. Les sessions durent entre 10 et 30 minutes, avec une augmentation progressive de la hauteur d'eau jusqu'au jarret à la fin de la deuxième ou troisième session selon le centre. La vitesse moyenne rapportée est de 1,6 m/s (entre 0,7 et 2,8 m/s). Un centre trotte les chevaux lors de l'acclimatation avec une vitesse moyenne de 4,4 m/s (entre 3,9 et 4,9 m/s).
Par ailleurs, ils ont montré que 14 centres sur 41 (35 %) sédatent fréquemment légèrement les chevaux avant la première exposition au tapis. Dans le cas où une évaluation du risque justifie cette pratique, Nankervis *et al.* (2021) recommandent une consultation vétérinaire préalable.

À titre d'exemple, des protocoles d'acclimatation d'un cheval au tapis immergé sont donnés en Annexe 6 selon l'Université de Hartpury en Angleterre, et en Annexe 5 selon l'Université du Tennessee dans le cadre de la réhabilitation d'une lésion tendineuse légère à modérée (Adair 2011).

Il faut tenir compte du fait que la conception des tapis immergés varie selon les modèles (voir partie I et Annexe 3). De sorte que certaines machines sont au niveau du sol ou sous le niveau du sol avec une rampe d'accès, présentent une entrée à l'arrière et une sortie à l'avant ou une entrée et une sortie à l'arrière, avec ou non une barre au niveau du poitrail et des fesses. Les procédures d'acclimatation sont donc également à adapter au modèle (Nankervis *et al.* 2021).

1.3. Risques associés à l'utilisation des tapis immergés

Plusieurs risques sont potentiellement associés à l'exercice sur tapis immergé (Tranquille *et al.* 2018) :

- **Blessure** du cheval ou de la personne manipulant le cheval lors de la phase d'acclimatation au tapis immergé ;
- Le développement de **problèmes cutanés** (Mooij *et al.* 2013) ;
- L'activité musculaire intense peut potentiellement mener au **surdéveloppement ou au développement inégal de muscles spécifiques des membres antérieurs** (Tokuriki *et al.* 1999) ;
- **L'exacerbation potentielle de lésions préexistantes** par la surcharge de structures vulnérables (Nankervis, Launder, Murray 2017) ;
- Le développement d'une position inadaptée, tête levée, et donc une **extension thoracique** (Nankervis, Finney, Launder 2016).

En pratique, au travers de leur enquête, Tranquille *et al.* (2018) soulignent que 24 centres sur 41 ne rapportent aucun accident impliquant l'utilisation du tapis immergé, 15 sur 41 rapportent des blessures aux chevaux, et 3 sur 41 des blessures à la personne manipulant lors d'exercice sur tapis immergé. L'effet indésirable le plus fréquemment rapporté est une atteinte cutanée (14 %). Par ailleurs, sont mentionnés en lien avec le travail sur tapis immergé : une impression de développement ou de détérioration de diverses conditions orthopédiques sans qu'une association directe ne puisse être nécessairement établie, des chevaux raides, des infections fongiques, des éruptions cutanées, des lésions de la fourchette ou un ramollissement de la paroi du sabot, des modifications de la démarche, des boiteries, et des lésions ligamentaires ou tendineuses.

Un exemple de lésions cutanées est donné par Mooij *et al.* (2013) au cours de leur étude, avec le développement de croûtes et/ou d'œdème sur la partie ventrale du thorax et/ou des membres lors de la période intensive d'entrainement sur tapis immergé, bien que la peau ait été nettoyée et séchée après chaque session.

Les problèmes de pied seraient plus fréquents, d'après les discussions du groupe de travail, lorsque les sabots ne sont jamais complètement séchés entre les sessions, comme cela peut être le cas lorsque le cheval effectue deux sessions d'exercice par jour (Nankervis *et al.* 2021).

2. Pertinence de la construction d'un protocole fixe sur tapis immergé : problèmes de variations individuelles et souvent d'association de plusieurs affections musculosquelettiques

La réponse des chevaux à un exercice sur tapis immergé est influencée par leur schéma de mouvement individuel.
La réponse motrice du pelvis à l'augmentation de la hauteur de l'eau, par exemple, n'est pas la même chez treize chevaux sains étudiés (Nankervis, Finney, Launder 2016). Le **déplacement vertical maximum du pelvis n'est pas rapporté à la même hauteur d'eau** : pour six chevaux lors d'immersion au grasset, pour trois lors d'immersion au tarse, pour trois lors d'immersion au boulet et pour un lors d'immersion au sabot. Ces observations suggèrent donc que **les chevaux adoptent des stratégies différentes de mise en mouvement des membres postérieurs en réponse à la marche dans l'eau, possiblement du fait de différences dans la force des muscles des membres postérieurs, dans l'amplitude du mouvement des articulations, et de la présence éventuelle d'une boiterie de faible grade.**
De la même façon, Tranquille *et al.* (2022a) rapportent que le **degré de flexion maximale du carpe et du tarse atteint un plateau à partir d'une certaine hauteur d'eau**, juste en dessous ou juste au-dessus du tarse, **qui semble être spécifique au cheval**. La flexion maximale dépend de la capacité individuelle du cheval à lever son membre au-dessus de l'eau, ce qui est **influencé par la conformation du cheval, sa flexibilité, et la force musculaire disponible** pour permettre le mouvement dans l'eau. Il apparait que **l'amplitude du mouvement du pelvis peut être un indicateur que le cheval a atteint sa capacité maximale de flexion du tarse**.
Des combinaisons similaires de hauteur d'eau et de vitesse peuvent donc induire des schémas moteurs différents en fonction des chevaux. Il est important de contrôler la réponse du cheval à l'exercice sur tapis immergé au sein d'une session et dans le temps afin de s'assurer que le cheval évolue dans le sens des objectifs du programme de réhabilitation, ou d'entrainement (Nankervis, Finney, Launder 2016).

Le protocole de réhabilitation doit également être adapté lorsque les chevaux présentent **plusieurs affections musculosquelettiques simultanément**, notamment au niveau du dos et des membres. La construction du programme doit aider à la récupération de chacun des sites, et promouvoir une posture optimale évitant la réalisation de mouvements néfastes. Si le protocole se concentre sur une

seule condition, cela peut potentiellement compromettre la récupération de l'autre. Par exemple, Rachel Murray propose que la hauteur d'eau idéale pour un cheval présentant une desmopathie proximale du ligament suspenseur d'un boulet postérieur est au niveau du grasset, alors que pour un conflit des processus épineux la hauteur d'eau ne devrait pas être supérieure au tarse. Pour un cheval en réhabilitation de ces deux types de conditions, un compromis sur la hauteur d'eau devra être atteint, en fonction de la réponse individuelle du cheval. Cela pourra être d'utiliser plusieurs niveaux d'eau au cours de la même session pour favoriser la récupération des deux sites, ou bien l'utilisation d'une profondeur fixe qui ne sera néfaste pour aucun des deux sites lésionnels. Davantage d'études dans ce domaine sont encore nécessaires, et l'effet de la vitesse devra également être considéré (Nankervis, Launder, Murray 2017 ; Tranquille *et al.* 2022a).

À retenir :
En l'absence d'*« evidence-based protocols »* concernant l'intégration d'exercices sur tapis immergé au sein du programme de réhabilitation d'un cheval suite à une lésion spécifique, la meilleure pratique consiste à **suivre attentivement la réponse individuelle du cheval au cours d'une session et dans le temps**.
Il est important de **prendre en compte les variations individuelles des chevaux influençant leur réponse locomotrice et la présence d'affections concomitantes**, lors de l'application d'un protocole à un cas clinique spécifique (Tranquille *et al*. 2022a).

Les recommandations données dans le consensus (Nankervis *et al.* 2021) suggèrent **qu'un programme sur tapis immergé doit être construit spécifiquement pour un cheval, et que le cheval doit être contrôlé tout au long du programme pour des adaptations éventuelles**.

3. Paramètres de construction d'un protocole

3.1. État des lieux des différents paramètres de protocoles

Dans leur enquête internationale, Tranquille *et al*. (2018) rapportent les différentes valeurs en termes de durée, hauteur d'eau et vitesse, utilisées à ce jour dans les protocoles d'entrainement et de réhabilitation sur tapis immergé chez le cheval, parmi 41 centres dans le monde.

Il faut garder en tête qu'il s'agit d'un état des lieux d'une proportion des pratiques actuelles, mais que cela ne représente pas nécessairement les meilleures pratiques. Par exemple, *a priori* n'importe quel cheval sain devrait être capable de marcher dans de l'eau à hauteur du boulet à 0,7 m/s pendant 20 minutes. En revanche, une combinaison d'un niveau d'eau élevé et d'une vitesse importante (au pas ou au trot), même sur une courte durée, peut représenter un effort considérable pour un cheval déséquilibré, mal coordonné, ou mal préparé et/ou exacerber une lésion préexistante (Nankervis *et al.* 2021).

<u>Tableau XLIII</u> : État des lieux des valeurs utilisées lors de sessions d'entrainement ou de réhabilitation sur tapis immergé dans 41 centres, selon l'enquête menée par Tranquille *et al.* en 2018, *source : Delacharlerie Aurore.*

	Entrainement	**Réhabilitation**
Indications	Principalement chevaux de dressage (32 %), concours complet d'équitation (16 %), saut d'obstacle (8 %)	Lésions tendineuses ou du ligament suspenseur du boulet (41 %) (Voir Tableau XXXII, partie V.3.1)
Vitesse (en m/s) Moyenne (valeur limite inférieure-valeur limite supérieure)	Pas : 1,6 (0,7-3) Trot : 4,4 (3-5)	Pas : 1,75 (0,7-2,8) Trot : 4,3 (3,4-5)
Hauteur d'eau (en mètres)	- Jarret (24 %) - Au-dessus du boulet (15 %) - Mi-canon (14 %) - Boulet (12 %)	- Mi-canon (25 %) - Au-dessus du boulet (24 %) - Sous le carpe (13 %) - Jarret (11 %) - Carpe (10 %) - 75 % des cas de réhabilitation lors de lésion des tissus mous travaillent avec de l'eau au-dessus de la structure affectée. - 67% des cas de réhabilitation lors d'atteinte osseuse travaillent avec de l'eau au-dessus de l'articulation affectée.
Durée (en minutes) Moyenne (valeur limite inférieure-valeur limite supérieure)	Pas : 20,5 (5-50) Trot : 8,8 (1-24) Total : 23,5 (5-54)	Pas : 20,6 (5-40) Trot : 7 (2-18) Total : 22,5 (5-40)
Fréquence	La moyenne de séances rapportée est de sept par semaine (entre 0 et 14).	

À titre d'exemple des pratiques actuelles, **l'Université de Hartpury en Angleterre** propose un guide sur l'utilisation du tapis immergé pour les propriétaires, fourni par le concepteur de tapis *Aqua Equine Treadmill*. Les différents paramètres sont donnés en Annexe 6.

3.2. <u>Paramètres généraux</u>

Le développement d'un protocole de réhabilitation doit être réfléchi de sorte à répondre aux besoins individuels de chaque cheval, après une évaluation complète de l'animal et la compréhension des objectifs sur le long terme concernant les performances athlétiques.
Il est nécessaire de prendre en compte la nature de la lésion, la condition physique du cheval avant la lésion, au moment de débuter la réhabilitation, et l'objectif après récupération, la présence de faiblesse musculaire ou d'atrophie, la note d'état corporel, mais également le tempérament, la réponse comportementale à l'eau, des expositions passées éventuelles à la thérapie aquatique, afin de construire un plan thérapeutique individuel adapté (Adair 2011 ; King 2016).

Dans l'enquête menée par Tranquille *et al.* (2018), tous les centres (41) indiquent une influence du type de session (acclimatation, entrainement, réhabilitation), de la présence d'une affection, de la condition physique, d'une expérience passée, de l'âge et du poids, sur la durée de la session, la profondeur de l'eau et la vitesse utilisée pour chaque cheval.

Le développement et la progression du programme de réhabilitation sur tapis immergé comprend plusieurs paramètres (Adair 2011 ; King 2016 ; Nankervis *et al.* 2021) décrits dans le tableau XLIV.

<u>Tableau XLIV</u> : Paramètres à prendre en considération lors du développement et de la progression du programme de réhabilitation d'un cheval sur tapis immergé, *source : Delacharlerie Aurore.*

Période d'échauffement
Intensité *En principe, plus le programme d'exercice est intensif, plus rapide sera le retour à la fonction, dans la mesure où le site lésé n'est pas surchargé, a le temps de s'adapter à l'évolution des contraintes et de se renforcer (King 2016).*
Profondeur de l'eau
Le choix de la hauteur d'eau est davantage spécifique des objectifs de la réhabilitation (Nankervis *et al.* 2021) : o Degré de flottabilité et de support de poids par le membre désirés (Adair 2011) ; o Degré de flexion articulaire désiré (Adair 2011) ; o Degré de résistance au mouvement désiré.
Vitesse
- La vitesse de marche adaptée est spécifique du cheval concerné plutôt que des objectifs spécifiques de la réhabilitation (Nankervis *et al.* 2021). - Selon le consensus (Nankervis *et al.* 2021), la vitesse doit être diminuée lorsque la profondeur de l'eau augmente, du fait de l'augmentation simultanée de la force de trainée. Il est possible de trouver une vitesse de marche confortable pour le cheval lorsque le tapis est sec, puis d'augmenter progressivement le niveau de l'eau tout en se préparant à diminuer la vitesse. Une vitesse de marche inférieure à celle sur terre est recommandée, en général 50 % de la vitesse observée sur terre est jugée confortable dans l'eau, avec un cheval adoptant une position correcte. - Une vitesse de tapis adaptée permet au cheval de maintenir une position au centre de la chambre d'exercice, de sorte que la tête, l'encolure et les membres antérieurs ne sont pas obstrués dans leur mouvement vers l'avant, et que le cheval ne s'appuie pas sur la barre arrière, ce qui exprimerait de la fatigue ou un dépassement des capacités physiques (Nankervis *et al.* 2021). - Le trot n'est *a priori* pas recommandé. Au sein du groupe de travail (Nankervis *et al.* 2021), seul un membre sur dix rapporte l'utilisation fréquente du trot au sein de ses programmes, en lien probablement avec la forte proportion, au sein de son centre, de patients effectuant du complet et utilisant le tapis afin d'améliorer leur condition physique (fitness). Le trot dans l'eau peut inciter le cheval à l'extension de la région thoraco-lombaire, ce qui peut être déconseillé pour la réhabilitation de lésions du dos ou des postérieurs (Nankervis, Launder, Murray 2017). Il est noté par ailleurs, d'un point de vue pratique, que le trot génère davantage de forces d'impact sur le tapis, et nécessite donc des remplacements plus fréquents du matériel. Cela constitue une autre raison pour laquelle, en l'absence d'effet positif avéré du trot pour la réhabilitation des chevaux, cette allure n'est pas utilisée.
Présence de turbulences
Jets d'eau (allumés/éteints) (Adair 2011 ; King 2016)
Durée
- De chaque session, de chaque phase de la réhabilitation. - Selon King (2016), il est possible qu'au cours de la première semaine, les chevaux ne soient pas capables de réaliser plus de cinq minutes de travail sur le tapis immergé. L'objectif sera ensuite d'augmenter progressivement la durée de marche de cinq minutes par semaine jusqu'à atteindre 20 minutes. Adair (2011) propose des sessions de 5 à 30 minutes.
Fréquence
- Dictée par la réponse individuelle du cheval au programme. - La plupart des protocoles sur tapis immergé comptent une session par jour, cinq jours par semaine (King 2016).
Température de l'eau
Période de récupération

La meilleure combinaison de vitesse, profondeur d'eau et durée est influencée par les caractéristiques individuelles du cheval : sa taille, la longueur de sa foulée, sa capacité d'amplitude du mouvement articulaire ; et pourra varier avec la durée de la session, un exercice récent, la condition physique du cheval et le stade de réhabilitation. Cette combinaison doit donc être adaptée à la réponse individuelle du cheval en termes de qualité de la démarche et de la posture. Il est important de pouvoir reconnaitre lorsque la démarche et la posture ne sont pas favorables aux objectifs de la réhabilitation ou de l'entrainement, ou indiquent une boiterie ou de la fatigue musculaire (voir partie VII.4. suivante) (Nankervis *et al.* 2021).
De faibles ajustements de vitesse ou profondeur d'eau pourront avoir un effet significatif sur le mouvement du cheval. Il est important de surveiller l'animal au cours d'une séance, et de se préparer à effectuer des modifications en fonction de sa réponse (Nankervis *et al.* 2021).

Lors de la progression au sein d'un programme de réhabilitation, il est important qu'un seul paramètre soit changé à la fois, au risque sinon d'induire des changements trop rapides ou trop intenses (King 2016).
À titre de rappel, l'augmentation de la hauteur de l'eau a un plus fort impact sur la charge de travail associée aux exercices sur tapis immergé que l'augmentation de la vitesse de marche (Greco-Otto *et al.* 2017).

4. Méthodes d'évaluation d'un protocole sur tapis immergé

4.1. Mesure de la fréquence cardiaque et du temps de récupération cardiaque

La mesure du temps de récupération de la fréquence cardiaque permet d'évaluer lorsque le cheval peut progresser au sein du programme de réhabilitation. La fréquence cardiaque est mesurée avant, pendant, et immédiatement après l'exercice aquatique afin de quantifier le niveau d'intensité. La **fréquence cardiaque durant l'exercice ne doit pas dépasser 200 battements par minute**, et le **temps nécessaire pour que la fréquence cardiaque redescende à 60 battements par minute doit être inférieur à 10 minutes**. L'intensité du programme de réhabilitation ne doit pas être augmentée si ces deux critères ne sont pas respectés (King 2016).

4.2. Contrôle du mouvement sur le tapis immergé

L'évaluation de la posture est essentielle afin de déterminer la combinaison optimale de vitesse et hauteur d'eau sur tapis immergé pour chaque cheval (comme mentionné partie précédente VII.3.2). Bien que l'évaluation de la posture soit assez subjective, il est accepté que **l'alignement de la tête, de l'encolure, du dos et des membres postérieurs** durant le travail sur tapis immergé ne doit pas différer de ce qui est considéré comme **acceptable sur terre.** En pratique on considère le chanfrein proche de la verticale, une ventroflexion lombaire, et les membres postérieurs s'engageant suffisamment sous le corps (Nankervis *et al.* 2021).

Le groupe de travail (Nankervis *et al*. 2021) s'est intéressé aux caractéristiques de la démarche sur tapis immergé qui pourraient indiquer la qualité du mouvement, ou bien au contraire la nécessité de diminuer la hauteur de l'eau ou la vitesse, voire d'arrêter la session :

- Un **mouvement de qualité** est ainsi défini comme un mouvement qui supporte et complémente un programme d'entrainement monté chez le cheval de sport. La **rectitude du mouvement** et un **rythme régulier du bruit des pas** est ainsi jugé important. Le cheval doit marcher droit aligné sur le tapis et régulièrement, sans s'incliner d'un côté ou basculer d'un côté puis de l'autre. De même, les membres postérieurs doivent se placer dans l'axe des membres antérieurs, et non de plus en plus médialement ou latéralement avec l'augmentation de la hauteur de l'eau.

- L'erreur la plus fréquente est de combiner un niveau d'eau et une vitesse de marche élevés, alors que la plupart des bénéfices du tapis immergé peuvent être atteints à relativement faible vitesse (en dessous de la vitesse jugée confortable sur terre).
  La vitesse du tapis peut être considérée comme trop rapide, à n'importe quelle hauteur d'eau, si le cheval présente :
  - une **position en extension de la tête et de l'encolure** ou un **déplacement excessif de la tête et de l'encolure** (la tête doit rester majoritairement immobile, sans mouvements excessifs verticaux ou horizontaux, ou secouement de la tête), qui sont des indicateurs d'une augmentation de recrutement des muscles protracteurs des membres antérieurs.
  - une **position thoracique en extension**, une **augmentation de la rotation axiale du pelvis**, une **augmentation du mouvement de rétraction des membres postérieurs**, qui vont limiter le mouvement de flexion thoraco-lombo-sacrée.

  Une augmentation du déplacement dorso-ventral de la nuque avec l'augmentation de la vitesse et de la hauteur de l'eau est montrée par Nankervis *et al.* (2023) lors d'exercices sur tapis immergé. Les mesures sont arrêtées à 1,7 m/s pour l'immersion au carpe et même pour certains chevaux pour l'immersion au boulet du fait de mouvements de tête excessifs, une posture en extension, et une rétraction excessive des membres postérieurs. Ces résultats renforcent l'intérêt de l'utilisation des mouvements de la tête comme indicateur de la combinaison entre vitesse et hauteur d'eau, d'autant qu'ils peuvent témoigner également de la diminution de protraction des membres antérieurs et de l'augmentation de rétraction des membres postérieurs. Cela présente un intérêt pratique, car les personnes manipulant le cheval sur le tapis immergé sont généralement placées proche de l'avant main, ce qui rend la visualisation du mouvement des membres difficile. L'utilisation des mouvements excessifs de la tête comme indicateur du mouvement excessif de rétraction des postérieurs peut donc avoir une application pratique.

  L'observation de la **posture dynamique** est donc essentielle lors d'une session sur tapis immergé, afin de s'assurer que le cheval **pousse de manière adéquate avec l'arrière main**, plutôt que de tirer avec l'avant-main.
- Le cheval doit maintenir une **position au centre de la chambre d'exercice,** de manière à ne pas être restreint dans ses mouvements vers l'avant ou à ne pas s'appuyer ou tomber sur la barre arrière du tapis. La tête et l'encolure doivent pouvoir bouger librement vers l'avant et le bas.

Si la qualité du mouvement n'est pas atteinte ou diminue durant une session alors la vitesse et la hauteur d'eau doivent être réévaluées et/ou la durée de la session modifiée.

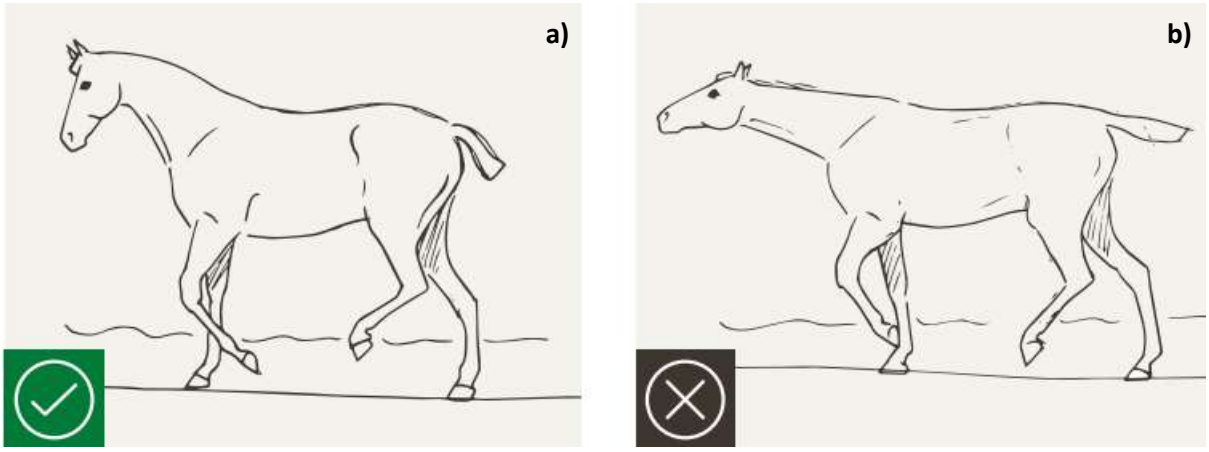


Figure 64 : Positions du cheval sur tapis immergé, *source : Equine Hydrotherapy Working Group (2020).*

a) *Figuré d'une position recherchée : chanfrein proche de la verticale, une ventroflexion lombaire, et les membres postérieurs s'engageant suffisamment sous le corps.*
b) *Figuré d'une mauvaise position : position en extension (dorsiflexion) de la colonne cervicale, thoracique et lombaire, avec le chanfrein approchant l'horizontal et les membres postérieurs qui trainent.*

Des mesures de la symétrie du mouvement, par accélérométrie, des capteurs d'inertie, ou des plateformes de force et de pression peuvent également être réalisées (Muñoz *et al.* 2019).

4.3. Activité plasmatique de la créatinine kinase

Les chevaux blessés sont souvent laissés au repos durant une période prolongée et leur condition physique est diminuée. Lors de la reprise du travail sur tapis immergé, Muñoz *et al.* (2019) proposent la mesure de l'activité plasmatique ou sérique de la créatinine kinase afin de détecter des atteintes musculaires. Dans une étude observationnelle non publiée, ils rapportent en effet une augmentation significative de l'activité de cette enzyme durant un programme d'entrainement chez des chevaux sédentaires, reflétant des dommages musculaires associés à un exercice trop intense.

4.4. Évaluation quantitative de la régression de la lésion

La capacité à évaluer quantitativement la régression de la lésion prise en charge est importante pour statuer de l'efficacité des interventions thérapeutiques, et donc des exercices sur le tapis immergé. Les *« evidence-based practices »* impliquent l'utilisation d'outils valides, fiables, et sensibles. L'algomètre de pression, le goniomètre, ou la mesure de la circonférence d'un membre sont des méthodes fiables et objectives pour déterminer la douleur, l'amplitude du mouvement articulaire, et l'évolution de l'œdème et de la masse musculaire. Si cela est jugé approprié, des contrôles échographiques peuvent être réalisés tous les mois afin d'évaluer la cicatrisation et ajuster le programme de réhabilitation (King 2016 ; Muñoz *et al.* 2019).

En pratique, les chevaux devraient au moins être évalués quotidiennement avant chaque séance aquatique pour rechercher par palpation des défauts musculosquelettiques sur le membre affecté ou une altération du degré de boiterie (King 2016).

À retenir :

Plusieurs critères d'évaluation d'un protocole de réhabilitation sur tapis immergé ont été définis :

- Mesure de la fréquence cardiaque :
  - Elle doit être inférieure à 200 battements par minute au cours de l'exercice sur tapis immergé ;
  - Le temps de récupération d'une fréquence cardiaque inférieure à 60 battements par minute doit être inférieur à 10 minutes après l'arrêt de l'exercice.
- Contrôle du mouvement sur le tapis immergé :
  - Rectitude du mouvement ;
  - Rythme régulier du pas ;
  - Absence de déplacements excessifs de la tête et de l'encolure ;
  - Position du chanfrein proche de la verticale ;
  - Ventroflexion lombaire ;
  - Membres postérieurs s'engageant suffisamment sous le corps ;
  - Position au centre de la chambre d'exercice.
- Évaluation quantitative de la régression de la lésion.

4.5. Exemple de critères de contrôle au sein d'un programme de réhabilitation sur tapis immergé pour une lésion tendineuse légère à modérée

En Annexe 5 est donné un exemple de programme de réhabilitation sur tapis immergé, et de ses critères de contrôle, utilisé à l'Université du Tennessee en 2011 pour une lésion tendineuse légère à modérée. Le programme n'est commencé qu'une fois qu'un contrôle échographique de la zone lésée a montré une cicatrisation suffisante, et que le cheval peut supporter des sessions de marche en main. Il est important que le cheval soit réévalué avant chaque session sur le tapis, afin de détecter toute augmentation de chaleur ou tout œdème du tendon affecté. Le degré de boiterie doit également être réévalué chaque semaine. Le contrôle échographique doit être renouvelé tous les mois, de sorte à ajuster le programme de réhabilitation ou à y mettre fin, si nécessaire (Adair 2011).

Conclusion partielle

La thérapie aquatique par exercice sur tapis immergés chez le cheval a fait l'objet de nombreuses études scientifiques ces dernières années, témoignant de l'intérêt croissant de cette modalité de réhabilitation et d'entrainement.

Les variations cinématiques et cinétiques du mouvement des membres et du dos dans l'eau au pas ont été largement décrites. En revanche, la réponse cardiorespiratoire, en termes de définition de l'intensité d'un exercice et d'amélioration de la condition physique, ainsi que la réponse musculaire, en termes d'activation et de renforcement des muscles, nécessitent des études supplémentaires pour une meilleure compréhension de l'exercice sur tapis immergé. La biomécanique du trot en milieu aquatique a également été peu étudiée.

La cinématique et la cinétique de la marche sur tapis immergé présentent de nombreuses caractéristiques recherchées lors de certaines disciplines équestres, telles qu'une fréquence de foulée réduite, une augmentation de la longueur de foulée et de l'amplitude du mouvement articulaire des membres. À ce jour cependant, des études supplémentaires sont nécessaires afin d'évaluer d'une part la persistance de ces modifications biomécaniques sur terre à court et long termes, et d'autre part la modification ou l'amélioration de la démarche terrestre en réponse à l'entrainement aquatique.

L'exercice sur tapis immergé promeut la symétrie et la rectitude du mouvement, le renforcement des muscles du tronc et des membres postérieurs, et encourage l'utilisation uniforme des quatre membres, ce qui est intéressant pour les chevaux ayant tendance à soulager un membre lors de la locomotion terrestre.

Les principaux paramètres de variation d'un exercice sur tapis immergé sont la hauteur de l'eau, la vitesse, et la durée. L'ajout de jets d'eau ou l'inclinaison du tapis semblent des facteurs peu indiqués pour ce type d'exercice.

Finalement, la construction d'un programme de réhabilitation sur tapis immergé répond moins à une affection spécifique, qu'aux variations individuelles du cheval lui-même. Tout protocole de réhabilitation doit être construit sur mesure et spécifiquement pour un cheval donné, et adapté entre les séances, voire même au sein d'une séance.

Il est important de garder en mémoire que la réhabilitation d'une affection est multimodale, et que le tapis immergé ne peut donc être appréhendé comme une méthode de réhabilitation isolée. Plusieurs thérapies complémentaires doivent être utilisées simultanément ou successivement selon le stade de la réhabilitation, et concourent au rétablissement. La complémentarité entre le tapis immergé et d'autres méthodes de réhabilitation pourrait être l'objet d'études.

Conclusion

Le cheval est considéré comme un athlète à part entière. Il est entrainé puis impliqué dans différentes épreuves sportives comme les courses d'endurance, de trot, de galop ou encore de saut d'obstacles, dont les exigences physiologiques et mécaniques sont équivalentes à celles des athlètes humains. Les affections de l'appareil locomoteurs sont donc également fréquentes et en lien avec des chutes, des coups, une mauvaise préparation physique ou un surentrainement.

À la suite d'une lésion, l'enjeu majeur de l'athlète humain, et par extension de l'athlète équin, est de retrouver le niveau d'exercice et de compétition qu'il avait avant sa blessure, voire un niveau supérieur, et cela en un temps minimum tout en respectant les contraintes de la cicatrisation. Ce principe explique l'intérêt croissant pour la thérapie aquatique au sein des programmes de réhabilitation.

Les propriétés physiques de l'eau – flottabilité, pression hydrostatique, viscosité, capacité à modifier la température et l'osmolarité – peuvent en effet être appliquées sous différentes combinaisons et jouer un rôle dans la rééducation musculosquelettique individualisée du cheval. La thérapie aquatique est une modalité de traitement polyvalente considérée comme efficace pour traiter les troubles sensoriels et moteurs associés aux lésions musculosquelettiques, afin de permettre une restauration fonctionnelle complète des performances athlétiques.

Les grands principes de réhabilitation de l'athlète et la place que peut y trouver le tapis immergé ont été longuement décrits en médecine humaine. Il est intéressant de souligner que la réhabilitation de l'athlète équin répond à ces mêmes principes. Le tapis immergé est d'autant plus indiqué chez le cheval qu'il ne peut pas réaliser d'exercices spontanés de renforcement, de mobilisation articulaire ou d'équilibre dans l'eau, contrairement à l'athlète humain.

Les publications sur l'utilisation des tapis immergés pour la réhabilitation chez le cheval soulignent son intérêt pour le maintien voire l'amélioration de la capacité aérobie et de la force musculaire, tout en minimisant les accélérations segmentaires des membres et les forces d'impact. Les contraintes sur les structures anatomiques des membres sont réduites, respectant ainsi la cicatrisation des tissus, tout en limitant le déconditionnement cardiorespiratoire et musculaire associé normalement à la convalescence. Une augmentation de l'amplitude du mouvement des articulations des membres et du dos est observée lors de marche dans l'eau, notamment en flexion, ce qui est particulièrement intéressant lors de la réhabilitation d'une affection articulaire. Ces propriétés de l'exercice sur tapis immergé pourraient permettre un retour plus précoce à la compétition des athlètes équins, bien qu'aucune publication actuellement n'ait permis de le prouver. En complément, la marche sur tapis immergé semble associée à l'amélioration du contrôle postural, des schémas moteurs et de l'inflammation articulaire des membres atteints d'ostéoarthrose.

La réhabilitation est un processus multimodal. L'exercice sur tapis immergé, avec un choix raisonné de la vitesse et de la hauteur d'immersion, peut être intégré à une grande variété de programmes de réhabilitation d'affections musculosquelettiques de l'athlète équin, dans la mesure où l'exercice génère des adaptations physiologiques et de la démarche conformes aux objectifs spécifiques de la réhabilitation. Un programme de réhabilitation sur tapis immergé doit être établit spécifiquement pour chaque individu, et adapté tout au long du processus de remise en forme.

La variabilité des paramètres des différentes études sur la réponse des chevaux aux tapis immergés, en termes de hauteurs d'eau, vitesses, races, et types de discipline pratiquée, ne permet pas nécessairement d'établir de conclusions générales. Des études supplémentaires sont nécessaires pour valider des protocoles de réhabilitation efficaces en fonction des différentes affections locomotrices rencontrées chez les équidés. Il reste encore à apprendre sur l'utilisation optimale de cette modalité

thérapeutique pour répondre au mieux aux objectifs spécifiques et individuels de la réhabilitation des athlètes équins.

Bibliographie

ADAIR, Henri S., 2011. Aquatic therapy for conditioning and treatment of tendon and ligament injuries. In : *Proceedings of the 57th Annual Convention of the American Association of Equine Practitioners, San Antonio, Texas, USA, 18-22 November 2011* [en ligne]. 18 novembre 2011. [Consulté le 9 mars 2024]. Disponible à l'adresse : https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20123295085.

AINSWORTH, Dorothy M., 2008. Chapter 3.2 - Lower airway function : responses to exercise and training. In : HINCHCLIFF, Kenneth W., GEOR, Raymond J. et KANEPS, Andris J. (éd.), *Equine Exercise Physiology* [en ligne]. Edinburgh : W.B. Saunders. pp. 193-209. [Consulté le 18 mars 2024]. ISBN 978-0-7020-2857-1. Disponible à l'adresse : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780702028571500111.

ALBERTON, Cristine L., PINTO, Stephanie S., ANTUNES, Amanda H., CADORE, Eduardo L., FINATTO, Paula, TARTARUGA, Marcus P. et KRUEL, Luiz F. M., 2014. Maximal and ventilatory thresholds cardiorespiratory responses to three water aerobic exercises compared with treadmill on land. *Journal of Strength and Conditioning Research*. Juin 2014. Vol. 28, n° 6, pp. 1679-1687. DOI 10.1519/JSC.0000000000000304.

ALBERTON, Cristine Lima, ANTUNES, Amanda Haberland, PINTO, Stephanie Santana, TARTARUGA, Marcus Peikriszwili, SILVA, Eduardo Marczwski, CADORE, Eduardo Lusa et MARTINS KRUEL, Luiz Fernado, 2011. Correlation between rating of perceived exertion and physiological variables during the execution of stationary running in water at different cadences. *Journal of Strength and Conditioning Research*. Janvier 2011. Vol. 25, n° 1, pp. 155-162. DOI 10.1519/JSC.0b013e3181bde2b5.

ALEXANDER, R. McNeill, 2003. Principles of animal locomotion. *Princeton University Press*, 396 p. ISBN 978-0-691-08678-1.

ALMEIDA, Adriano Marques de, SANTOS SILVA, Paulo Roberto, PEDRINELLI, André et HERNANDEZ, Arnaldo J., 2018. Aerobic fitness in professional soccer players after anterior cruciate ligament reconstruction. *PloS One*. 2018. Vol. 13, n° 3, pp. e0194432. DOI 10.1371/journal.pone.0194432.

AMERICAN COLLEGE OF SPORTS MEDICINE et LIGUORI, G., 2021. ACSM's guidelines for exercise testing and prescription [en ligne]. 541 p. [Consulté le 12 juin 2024]. ISBN 978-1-975150-18-1. Disponible à l'adresse : https://shop.lww.com/ACSM-s-Guidelines-for-Exercise-Testing-and-Prescription/p/9781975150181.

ANDRADE, Luana S., BOTTON, Cíntia E., DAVID, Gabriela B., PINTO, Stephanie S., HÄFELE, Mariana S. et ALBERTON, Cristine L., 2022. Cardiorespiratory parameters comparison between incremental protocols performed in aquatic and land environments by healthy individuals : a systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*. Septembre 2022. Vol. 52, n° 9, pp. 2247-2270. DOI 10.1007/s40279-022-01687-y.

ANDRADE, Luana Siqueira, KANITZ, Ana Carolina, HÄFELE, Mariana Silva, SCHAUN, Gustavo Zaccaria, PINTO, Stephanie Santana et ALBERTON, Cristine Lima, 2020. Relationship between oxygen uptake, heart rate, and perceived effort in an aquatic incremental test in older women. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 11 novembre 2020. Vol. 17, n° 22, pp. 8324. DOI 10.3390/ijerph17228324.

ART, T. et LEKEUX, P., 1993. Training-induced modifications in cardiorespiratory and ventilatory measurements in thoroughbred horses. *Equine Veterinary Journal*. Novembre 1993. Vol. 25, n° 6, pp. 532-536. DOI 10.1111/j.2042-3306.1993.tb03008.x.

ASIMENIA, Gioftsidou, PARASKEVI, Malliou, POLINA, Sofokleous, ANASTASIA, Beneka, KYRIAKOS, Tsapralis et GEORGIOS, Godolias, 2013. Aquatic training for ankle instability. *Foot & Ankle Specialist*. Octobre 2013. Vol. 6, n° 5, pp. 346-351. DOI 10.1177/1938640013493461.

BAENA-BEATO, Pedro Ángel, ARTERO, Enrique G., ARROYO-MORALES, Manuel, ROBLES-FUENTES, Alejandro, GATTO-CARDIA, María Claudia et DELGADO-FERNÁNDEZ, Manuel, 2014. Aquatic therapy improves pain, disability, quality of life, body composition and fitness in sedentary adults with chronic low back pain. A controlled clinical trial. *Clinical Rehabilitation*. Avril 2014. Vol. 28, n° 4, pp. 350-360. DOI 10.1177/0269215513504943.

BARREY, Eric, 2014. Biomechanics of locomotion in the athletic horse. In : HINCHCLIFF, K. W., KANEPS, A. J. et GEOR, R. J., *Equine Sports Medicine and Surgery - Basic and Clinical Sciences of the Equine Athlete*. 2nd Edition. pp. 189-211.

BARTELS, Else Marie, JUHL, Carsten B., CHRISTENSEN, Robin, HAGEN, Kåre Birger, DANNESKIOLD-SAMSØE, Bente, DAGFINRUD, Hanne et LUND, Hans, 2016. Aquatic exercise for the treatment of knee and hip osteoarthritis. *The Cochrane Database of Systematic Reviews*. 23 mars 2016. Vol. 3, n° 3, pp. CD005523. DOI 10.1002/14651858.CD005523.pub3.

BAXTER, Gary M., 2020. Chapter 4 : Lameness of the distal limb. In : *Adams and Stashak's Lameness in Horses* [en ligne]. Hoboken, NJ : Wiley-Blackwell. pp. pp 585-590. [Consulté le 10 juillet 2024]. ISBN 978-1-119-27668-5. Disponible à l'adresse : https://login.ezproxy.vetagro-sup.fr/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=2465990&lang=fr&site=ehost-live&scope=site.

BECKER, Bruce, 2009. Aquatic therapy : scientific foundations and clinical rehabilitation applications. *PM & R: the journal of injury, function, and rehabilitation*. Septembre 2009. Vol. 1, n° 9, pp. 859-872. DOI 10.1016/j.pmrj.2009.05.017.

BECKER, Bruce, HILDENBRAND, Kasee, WHITCOMB, Rebekah et SANDERS, James, 2009. Biophysiologic effects of warm water immersion. *International Journal of Aquatic Research and Education*. 1 février 2009. Vol. 3, pp. 24-37. DOI 10.25035/ijare.03.01.04.

BERG, L. C., RØGEN, B., NØRREGAARD, S. et HARRISON, A. P., 2022. Effect of water treadmill training on equine muscle activity measured by acoustic myography. 2022. *Proceedings of the 11th International Conference on Equine Exercise Physiology Comparative Exercise Physiology, Uppsala, Sweden, 88*.

BIANCHI, Ana-Maria, FAUTRELLE, Yves et ETAY, Jacqueline, 2004. Transferts thermiques. *PPUR presses polytechniques*, 575 p. ISBN 978-2-88074-496-0.

BLEAKLEY, C. M., GLASGOW, P. et MACAULEY, D. C., 2012. PRICE needs updating, should we call the POLICE ? *British Journal of Sports Medicine*. Mars 2012. Vol. 46, n° 4, pp. 220-221. DOI 10.1136/bjsports-2011-090297.

BLISS, Megan, TERRY, Jade et DE GODOY, Roberta Ferro, 2022. Limbs kinematics of dogs exercising at different water levels on the underwater treadmill. *Veterinary Medicine and Science*. Novembre 2022. Vol. 8, n° 6, pp. 2374-2381. DOI 10.1002/vms3.947.

BORGIA, L. A., VALBERG, S. J. et ESSEN-GUSTAVSSON, B., 2010. Differences in the metabolic properties of gluteus medius and superficial digital flexor muscles and the effect of water treadmill training in the horse. *Equine Veterinary Journal*. 2010. Vol. 42, n° s38, pp. 665-670. DOI 10.1111/j.2042-3306.2010.00229.x.

BOSCH, G., LAMERIS, M. C., VAN DEN BELT, A. J. M., BARNEVELD, A. et VAN WEEREN, P. R., 2010. The propagation of induced tendon lesions in the equine superficial digital flexor tendon : an ex vivo study. *Equine Veterinary Journal*. Juillet 2010. Vol. 42, n° 5, pp. 407-411. DOI 10.1111/j.2042-3306.2010.00099.x.

BRESSEL, Eadric, WING, Jessica E., MILLER, Andrew I. et DOLNY, Dennis G., 2014. High-intensity interval training on an aquatic treadmill in adults with osteoarthritis : effect on pain, balance, function, and mobility. *Journal of Strength and Conditioning Research*. Août 2014. Vol. 28, n° 8, pp. 2088-2096. DOI 10.1519/JSC.0000000000000258.

BRUBAKER, Peter, OZEMEK, Cemal, GONZALEZ, Alimer, WILEY, Stephen et COLLINS, Gregory, 2011. Cardiorespiratory responses during underwater and land treadmill exercise in college athletes. *Journal of Sport Rehabilitation*. Août 2011. Vol. 20, n° 3, pp. 345-354. DOI 10.1123/jsr.20.3.345.

BUCHNEFP, H. H. F., SAVELBERG, H. H. C. M., SCHAMHARDT, H. C. et BARNEVELD, A., 1995. Temporal stride patterns in horses with experimentally induced fore- or hindlimb lameness. *Equine Veterinary Journal*. 1995. Vol. 27, n° S18, pp. 161-165. DOI 10.1111/j.2042-3306.1995.tb04911.x.

BUCKTHORPE, Matthew, GOKELER, Alli, HERRINGTON, Lee, HUGHES, Mick, GRASSI, Alberto, WADEY, Ross, PATTERSON, Stephen, COMPAGNIN, Alessandro, LA ROSA, Giovanni et DELLA VILLA, Francesco, 2024. Optimising the early-stage rehabilitation process post-ACL reconstruction. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*. Janvier 2024. Vol. 54, n° 1, pp. 49-72. DOI 10.1007/s40279-023-01934-w.

BUCKTHORPE, Matthew, PIROTTI, Elisa et VILLA, Francesco Della, 2019. Benefits and use of aquatic therapy during rehabilitation after ACL reconstruction - a clinical commentary. *International Journal of Sports Physical Therapy*. Décembre 2019. Vol. 14, n° 6, pp. 978-993.

BUNÆS-NÆSS, Heidi, KVÆL, Linda Aimée Hartford, NILSSON, Birgitta Blakstad, HEYWOOD, Sophie et HEIBERG, Kristi Elisabeth, 2023. Aquatic high-intensity interval training (HIIT) may be similarly effective to land-based HIIT in improving exercise capacity in people with chronic conditions : a systematic review and meta-analysis. *BMJ open sport & exercise medicine*. 2023. Vol. 9, n° 4, pp. e001639. DOI 10.1136/bmjsem-2023-001639.

CARON, John P., 2011. Chapter 61 - Osteoarthritis. In : ROSS, Mike W. et DYSON, Sue J. (éd.), *Diagnosis and Management of Lameness in the Horse (Second Edition)* [en ligne]. Saint Louis : W.B. Saunders. pp. 655-668. [Consulté le 24 mars 2024]. ISBN 978-1-4160-6069-7. Disponible à l'adresse : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781416060697000614.

CHELESCHI, Sara, GALLO, Ines et TENTI, Sara, 2020. A comprehensive analysis to understand the mechanism of action of balneotherapy : why, how, and where they can be used ? Evidence from in vitro studies performed on human and animal samples. *International Journal of Biometeorology*. 2020. Vol. 64, n° 7, pp. 1247-1261. DOI 10.1007/s00484-020-01890-4.

CLAYTON, Hilary M., 2016. Core training and rehabilitation in horses. *Veterinary Clinics of North America : Equine Practice*. 1 avril 2016. Vol. 32, n° 1, pp. 49-71. DOI 10.1016/j.cveq.2015.12.009.

COMMISSION OCÉANOGRAPHIQUE INTERGOUVERNEMENTALE, COMITÉ SCIENTIFIQUE DE LA RECHERCHE OCÉANIQUE, et ASSOCIATION INTERNATIONALE DES SCIENCES PHYSIQUES DE L'OCÉAN, 2010. The International thermodynamic equation of seawater - 2010 : calculation and use of thermodynamic properties [en ligne]. 2010. [Consulté le 16 septembre 2024]. Disponible à l'adresse : https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000188170.

DAUTY, Marc, MENU, Pierre, MESLAND, Olivier et FOUASSON-CHAILLOUX, Alban, 2022. Arthrogenic muscle inhibition and return to sport after arthrofibrosis complicating anterior cruciate ligament

surgery. *European Journal of Sport Science*. Avril 2022. Vol. 22, n° 4, pp. 627-635. DOI 10.1080/17461391.2021.1881620.

DAVID, F., CADBY, J., BOSCH, G., BRAMA, P., VAN WEEREN, R. et VAN SCHIE, H., 2012. Short-term cast immobilisation is effective in reducing lesion propagation in a surgical model of equine superficial digital flexor tendon injury. *Equine Veterinary Journal*. Septembre 2012. Vol. 44, n° 5, pp. 570-575. DOI 10.1111/j.2042-3306.2011.00513.x.

DAVIDSON, Elizabeth J., 2019. Chapter 105 - Postoperative Physiotherapy for the Orthopedic Patient. In : AUER, Jörg A., STICK, John A., KÜMMERLE, Jan M. et PRANGE, Timo (éd.), *Equine Surgery (Fifth Edition)* [en ligne]. W.B. Saunders. pp. 1830-1835. [Consulté le 1 juillet 2024]. ISBN 978-0-323-48420-6.
Disponible à l'adresse : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323484206001058.

DAVIES, George, RIEMANN, Bryan L. et MANSKE, Robert, 2015. Current concepts of plyometric exercise. *International Journal of Sports Physical Therapy*. Novembre 2015. Vol. 10, n° 6, pp. 760.

DE GEER, H. C., SERRA BRAGANÇA, F. M., TE MOLLER, N. C. R., SPOORMAKERS, T. J. P. et PASMAN, Z. C., 2022. The effects of water and speed on limb kinematics in horses walking on a water treadmill. 2022. *Proceedings of the 11th International Conference on Equine Exercise Physiology Comparative Exercise Physiology, Uppsala, Sweden, 88.*

DELGUSTE, C., AMORY, H., DOUCET, M., PICCOT-CRÉZOLLET, C., THIBAUD, D., GARNERO, P., DETILLEUX, J. et LEPAGE, O. M., 2007. Pharmacological effects of tiludronate in horses after long-term immobilization. *Bone*. Septembre 2007. Vol. 41, n° 3, pp. 414-421. DOI 10.1016/j.bone.2007.05.005.

DEMARIE, Sabrina, CHIRICO, Emanuele, BRATTA, Cecilia et CORTIS, Cristina, 2022. Energy Consumption of Water Running and Cycling at Four Exercise Intensities. *Sports*. 8 juin 2022. Vol. 10, n° 6, pp. 90. DOI 10.3390/sports10060090.

DENOIX, Jean-Marie, 2014. Biomechanics and Physical Training of the Horse [en ligne]. Milton, UNITED KINGDOM : Taylor & Francis Group, 192 p. [Consulté le 5 avril 2024]. ISBN 978-1-84076-656-1. Disponible à l'adresse : http://ebookcentral.proquest.com/lib/umontreal-ebooks/detail.action?docID=1407679.

DIAS, João Marcos, CISNEROS, Lígia, DIAS, Rosângela, FRITSCH, Carolina, GOMES, Wellington, PEREIRA, Leani, SANTOS, Mary Luci et FERREIRA, Paulo Henrique, 2017. Hydrotherapy improves pain and function in older women with knee osteoarthritis : a randomized controlled trial. *Brazilian Journal of Physical Therapy*. 2017. Vol. 21, n° 6, pp. 449-456. DOI 10.1016/j.bjpt.2017.06.012.

DIMITRAKOPOULOU, Alexandra, ENGLISH, Bryan, KARTSONAKI, Christiana, GLEDHILL, Adam et SCHILDERS, Ernest, 2023. The effectiveness of hydrotherapy on return to play in sports following hip arthroscopic surgery : a comparative study. *Hip International : The Journal of Clinical and Experimental Research on Hip Pathology and Therapy*. 10 avril 2023. pp. 115-121. DOI 10.1177/11207000231167349.

DRAOVITCH, Pete, PATEL, Snehal, MARRONE, William, GRUNDSTEIN, M. Jake, GRANT, Reg, VIRGILE, Adam, MYSLINSKI, Tom, BEDI, Asheesh, BRADLEY, James P., WILLIAMS, Riley J., KELLY, Bryan et JONES, Kristofer, 2022. The Return-to-Sport Clearance Continuum Is a Novel Approach Toward Return to Sport and Performance for the Professional Athlete. *Arthroscopy, Sports Medicine, and Rehabilitation*. Janvier 2022. Vol. 4, n° 1, pp. e93-e101. DOI 10.1016/j.asmr.2021.10.026.

DRILLER, Matthew et LEABEATER, Alana, 2023. Fundamentals or Icing on Top of the Cake ? A Narrative Review of Recovery Strategies and Devices for Athletes. *Sports*. Novembre 2023. Vol. 11, n° 11, pp. 213. DOI 10.3390/sports11110213.

DUAN, Xiaodong, WEI, Wei, ZHOU, Ping, LIU, Xi, YU, Jihua, XU, Yang, HUANG, Liheng et YANG, Shibin, 2022. Effectiveness of aquatic exercise in lower limb osteoarthritis : a meta-analysis of randomized controlled trials. *International Journal of Rehabilitation Research. Internationale Zeitschrift Fur Rehabilitationsforschung. Revue Internationale De Recherches De Readaptation*. 1 juin 2022. Vol. 45, n° 2, pp. 126-136. DOI 10.1097/MRR.0000000000000527.

DUNDAR, Umit, SOLAK, Ozlem, YIGIT, Ilknur, EVCIK, Deniz et KAVUNCU, Vural, 2009. Clinical effectiveness of aquatic exercise to treat chronic low back pain : a randomized controlled trial. *Spine*. 15 juin 2009. Vol. 34, n° 14, pp. 1436-1440. DOI 10.1097/BRS.0b013e3181a79618.

DYSON, S., TRANQUILLE, C. A., WALKER, V., GUIRE, R., FISHER, M. et MURRAY, R., 2018. A subjective descriptive study of the warm-up and turn to a fence, approach, take-off, suspension, landing and move-off in 10 showjumpers. *Equine Veterinary Education*. 2018. Vol. 30, n° 1, pp. 41-52. DOI 10.1111/eve.12699.

EQUINE HYDROTHERAPY WORKING GROUP, 2020. Equine Water Treadmill Exercises : A guide for users [en ligne]. 22 juin 2020. Disponible à l'adresse : https://pure.hartpury.ac.uk/en/publications/equine-water-treadmill-exercises-a-guide-for-users.

ESSÉN-GUSTAVSSON, B., MCMIKEN, D., KARLSTRÖM, K., LINDHOLM, A., PERSSON, S. et THORNTON, J., 1989. Muscular adaptation of horses during intensive training and detraining. *Equine Veterinary Journal*. Janvier 1989. Vol. 21, n° 1, pp. 27-33. DOI 10.1111/j.2042-3306.1989.tb02085.x.

EVANS, D. L., 2007. Physiology of equine performance and associated tests of function. *Equine veterinary journal*. Juillet 2007. Vol. 39, n° 4, pp. 373-383. DOI 10.2746/042516407X206418.

FAIR, Natalie, BLAKE, Scott et BLAKE, Roberta, 2023. Four Weeks of Incline Water Treadmill Exercise Can Contribute to Increase Epaxial Muscle Profile in Horses. *Veterinary medicine international*. 7 novembre 2023. Vol. 2023, pp. 9090406. DOI 10.1155/2023/9090406.

FARBER, M., SCHAMHARDT, H., VAN WEEREN, R. et BARNEVELD, A., 2001. Methodology and validity of assessing kinematics of the thoracolumbar vertebral column in horses on the basis of skin-fixated markers. *American Journal of Veterinary Research*. Mars 2001. Vol. 62, n° 3, pp. 301-306. DOI 10.2460/ajvr.2001.62.301.

FAUCHER, Marc, POIRAUDEAU, Serge, LEFEVRE-COLAU, Marie Martine, RANNOU, François, FERMANIAN, Jacques et REVEL, Michel, 2003. Assessment of the test-retest reliability and construct validity of a modified Lequesne index in knee osteoarthritis. *Joint Bone Spine*. 1 décembre 2003. Vol. 70, n° 6, pp. 520-525. DOI 10.1016/S1297-319X(03)00070-8.

FIRSHMAN, Anna M., BORGIA, Lisa A. et VALBERG, Stephanie J., 2015. Effects of training at a walk on conventional and underwater treadmills on fiber properties and metabolic responses of superficial digital flexor and gluteal muscles to high-speed exercise in horses. *American Journal of Veterinary Research*. Décembre 2015. Vol. 76, n° 12, pp. 1058-1065. DOI 10.2460/ajvr.76.12.1058.

FRASCHETTO, Claudia, HATRISSE, Chloé, MOIROUD, Claire, BEAUMONT, Audrey, AUDIGIÉ, Fabrice, CHATEAU, Henry, DENOIX, Jean-Marie et JACQUET, Sandrine, 2024. Water depth and speed may have an opposite effect on the trunk vertical displacement in horses trotting on a water treadmill. *American Journal of Veterinary Research*. 1 février 2024. Vol. 85, n° 2, pp. ajvr.23.10.0236. DOI 10.2460/ajvr.23.10.0236.

FRIZZIERO, Antonio, SALAMANNA, Francesca, DELLA BELLA, Elena, VITTADINI, Filippo, GASPARRE, Giuseppe, NICOLI ALDINI, Nicolò, MASIERO, Stefano et FINI, Milena, 2016. The role of detraining in tendon mechanobiology. *Frontiers in Aging Neuroscience*. 2016. Vol. 8, pp. 43. DOI 10.3389/fnagi.2016.00043.

GARCIA, Carol, KARRI, Jay, ZACHARIAS, Nicholas A. et ABD-ELSAYED, Alaa, 2021. Use of cryotherapy for managing chronic pain : an evidence-based narrative. *Pain and Therapy*. 1 juin 2021. Vol. 10, n° 1, pp. 81-100. DOI 10.1007/s40122-020-00225-w.

GASTALDO, Marco, GOKELER, Alli et VILLA, Francesco Della, 2022. High quality rehabilitation to optimize return to sport following lateral meniscus surgery in football players. *Annals of Joint*. 15 octobre 2022. Vol. 7, n° 4, pp. 21-32. DOI 10.21037/aoj-21-32.

GIRARDI, Michele, CASOLO, Andrea, NUCCIO, Stefano, GATTONI, Chiara et CAPELLI, Carlo, 2020. Detraining effects prevention : a new rising challenge for athletes. *Frontiers in Physiology*. 15 octobre 2020. Vol. 11, pp. 588784. DOI 10.3389/fphys.2020.588784.

GŁYK, Wojciech, HOŁUB, Maciej, KARPIŃSKI, Jakub, REJDYCH, Wojciech, SADOWSKI, Wojciech, TRYBUS, Alina, BARON, Jakub, RYDZIK, Łukasz, AMBROŻY, Tadeusz et STANULA, Arkadiusz, 2022. Effects of a 12-week detraining period on physical capacity, power and speed in elite swimmers. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 11 avril 2022. Vol. 19, n° 8, pp. 4594. DOI 10.3390/ijerph19084594.

GOKELER, Alli, BISSCHOP, Marsha, BENJAMINSE, Anne, MYER, Greg D., EPPINGA, Peter et OTTEN, Egbert, 2014. Quadriceps function following ACL reconstruction and rehabilitation : implications for optimisation of current practices. *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy : official journal of the ESSKA*. Mai 2014. Vol. 22, n° 5, pp. 1163-1174. DOI 10.1007/s00167-013-2577-x.

GOODSHIP, Allen E. et SMITH, Roger K. W., 2008. Chapter 2.2 - Skeletal physiology : responses to exercise and training. In : HINCHCLIFF, Kenneth W., GEOR, Raymond J. et KANEPS, Andris J. (éd.), *Equine Exercise Physiology* [en ligne]. Edinburgh : W.B. Saunders. pp. 81-105. [Consulté le 22 juin 2024]. ISBN 978-0-7020-2857-1.
Disponible à l'adresse : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780702028571500068.

GOUTTEBARGE, Vincent, INKLAAR, Han, BACKX, Frank et KERKHOFFS, Gino, 2015. Prevalence of osteoarthritis in former elite athletes : a systematic overview of the recent literature. *Rheumatology international*. Mars 2015. Vol. 35, n° 3, pp. 405-418. DOI 10.1007/s00296-014-3093-0.

GRECO-OTTO, Persephone, BAGGALEY, Michael, EDWARDS, W. B. et LÉGUILLETTE, Renaud, 2019. Water treadmill exercise reduces equine limb segmental accelerations and increases shock attenuation. *BMC veterinary research*. 13 septembre 2019. Vol. 15, n° 1, pp. 329. DOI 10.1186/s12917-019-2075-6.

GRECO-OTTO, Persephone, BOND, Stephanie, SIDES, Raymond, BAYLY, Warwick et LEGUILLETTE, Renaud, 2020. Conditioning equine athletes on water treadmills significantly improves peak oxygen consumption. *The Veterinary Record*. 29 février 2020. Vol. 186, n° 8, pp. 250. DOI 10.1136/vr.104684.

GRECO-OTTO, Persephone, BOND, Stephanie, SIDES, Raymond, KWONG, Grace P. S., BAYLY, Warwick et LÉGUILLETTE, Renaud, 2017. Workload of horses on a water treadmill : effect of speed and water height on oxygen consumption and cardiorespiratory parameters. *BMC Veterinary Research*. Décembre 2017. Vol. 13, n° 1, pp. 1-9. DOI 10.1186/s12917-017-1290-2.

GREENE, Nicholas P., GREENE, Elizabeth S., CARBUHN, Aaron F., GREEN, John S. et CROUSE, Stephen F., 2011. VO2 prediction and cardiorespiratory responses during underwater treadmill exercise. *Research*

Quarterly for Exercise and Sport. Juin 2011. Vol. 82, n° 2, pp. 264-273. DOI 10.1080/02701367.2011.10599754.

GUPTA, Arjun, SINGH, Priya K., XU, Amy L., BRONHEIM, Rachel S., MCDANIEL, Claire M. et AIYER, Amiethab A., 2023. Turf toe injuries in the athlete : an updated review of treatment options, rehabilitation protocols, and return-to-play outcomes. *Current Reviews in Musculoskeletal Medicine*. Novembre 2023. Vol. 16, n° 11, pp. 563-574. DOI 10.1007/s12178-023-09870-y.

H. DHILLON, S. DHILLON, et M S. DHILLON, 2017. Current concepts in sports injury rehabilitation. *Indian Journal of Orthopaedics*. 2017. Vol. 51, n° 5, pp. 529-536. DOI 10.4103/ortho.IJOrtho_226_17.

HAJOUJ, Elie, HADIAN, Mohammad Reza, MIR, Seyed Mohsen, TALEBIAN, Saeed et GHAZI, Salah, 2021. Effects of innovative aquatic proprioceptive training on knee proprioception in athletes with anterior cruciate ligament reconstruction : a randomized controlled trial. *Archives of Bone and Joint Surgery*. Septembre 2021. Vol. 9, n° 5, pp. 519-526. DOI 10.22038/abjs.2020.50106.2485.

HARRISON, Ronald et BULSTRODE, Sarah, 1987. Percentage weight-bearing during partial immersion in the hydrotherapy pool. *Physiotherapy Practice*. 1 janvier 1987. pp. 60-63. DOI 10.3109/09593988709087741.

HARRISON, Simon M., WHITTON, R. Chris, KAWCAK, Chris E., STOVER, Susan M. et PANDY, Marcus G., 2010. Relationship between muscle forces, joint loading and utilization of elastic strain energy in equine locomotion. *Journal of Experimental Biology*. 1 décembre 2010. Vol. 213, n° 23, pp. 3998-4009. DOI 10.1242/jeb.044545.

HART, Joseph M., PIETROSIMONE, Brian, HERTEL, Jay et INGERSOLL, Christopher D., 2010. Quadriceps activation following knee injuries : a systematic review. *Journal of Athletic Training*. 2010. Vol. 45, n° 1, pp. 87-97. DOI 10.4085/1062-6050-45.1.87.

HART, Nicolas H., NEWTON, Robert U., TAN, Jocelyn, RANTALAINEN, Timo, CHIVERS, Paola, SIAFARIKAS, Aris et NIMPHIUS, Sophia, 2020. Biological basis of bone strength : anatomy, physiology and measurement. *Journal of Musculoskeletal & Neuronal Interactions*. 2020. Vol. 20, n° 3, pp. 347-371.

HAUPENTHAL, Alessandro, FONTANA, Heiliane de Brito, RUSCHEL, Caroline, DOS SANTOS, Daniela Pacheco et ROESLER, Helio, 2013. Ground reaction forces in shallow water running are affected by immersion level, running speed and gender. *Journal of Science and Medicine in Sport*. 1 juillet 2013. Vol. 16, n° 4, pp. 348-352. DOI 10.1016/j.jsams.2012.08.006.

HAUSSLER, Kevin K. et KING, Melissa R., 2016. 18 - Physical Rehabilitation. In : MCILWRAITH, C. Wayne, FRISBIE, David D., KAWCAK, Christopher E. et VAN WEEREN, P. René (éd.), *Joint Disease in the Horse (Second Edition)* [en ligne]. Edinburgh : W.B. Saunders. pp. 243-269. [Consulté le 9 décembre 2023]. ISBN 978-1-4557-5969-9.
Disponible à l'adresse : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781455759699000188.

HEIDARI, Fatemeh, MOHAMMAD RAHIMI, Nasser et AMINZADEH, Reza, 2023. Aquatic exercise impact on pain intensity, disability and quality of life in adults with low back pain : a systematic review and meta-analysis. *Biological Research for Nursing*. Octobre 2023. Vol. 25, n° 4, pp. 527-541. DOI 10.1177/10998004231162327.

HEIJNE, Annette et WERNER, Suzanne, 2010. A 2-year follow-up of rehabilitation after ACL reconstruction using patellar tendon or hamstring tendon grafts : a prospective randomised outcome study. *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy : official journal of the ESSKA*. Juin 2010. Vol. 18, n° 6, pp. 805-813. DOI 10.1007/s00167-009-0961-3.

HEYWOOD, Sophie E., MENTIPLAY, Benjamin F., RAHMANN, Ann E., MCCLELLAND, Jodie A., GEIGLE, Paula R., BOWER, Kelly J. et CLARK, Ross A., 2022. The effectiveness of aquatic plyometric training in improving strength, jumping, and sprinting : a systematic review. *Journal of Sport Rehabilitation*. 1 janvier 2022. Vol. 31, n° 1, pp. 85-98. DOI 10.1123/jsr.2020-0432.

HEYWOOD, Sophie, MCCLELLAND, Jodie, MENTIPLAY, Benjamin, GEIGLE, Paula, RAHMANN, Ann et CLARK, Ross, 2017. Effectiveness of aquatic exercise in improving lower limb strength in musculoskeletal conditions : a systematic review and meta-analysis. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. Janvier 2017. Vol. 98, n° 1, pp. 173-186. DOI 10.1016/j.apmr.2016.08.472.

HINCHCLIFF, Kenneth W. et GEOR, Raymond J., 2008. Chapter 1.1 - The horse as an athlete : a physiological overview. In : HINCHCLIFF, Kenneth W., GEOR, Raymond J. et KANEPS, Andris J. (éd.), *Equine Exercise Physiology* [en ligne]. Edinburgh : W.B. Saunders. pp. 2-11. [Consulté le 8 décembre 2023]. ISBN 978-0-7020-2857-1. Disponible à l'adresse : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780702028571500032.

HOLMBERG, Patrick M., GORMAN, Adam D., JENKINS, David G. et KELLY, Vincent G., 2021. Lower-body aquatic training prescription for athletes. *Journal of Strength and Conditioning Research*. 1 mars 2021. Vol. 35, n° 3, pp. 859-869. DOI 10.1519/JSC.0000000000003925.

HUNT, E. R., 2001. Response of twenty-seven horses with lower leg injuries to cold spa bath hydrotherapy. *Journal of Equine Veterinary Science*. 1 avril 2001. Vol. 21, n° 4, pp. 188-193. DOI 10.1016/S0737-0806(01)70121-9.

KANEGUCHI, Akinori, OZAWA, Junya, MINAMIMOTO, Kengo et YAMAOKA, Kaoru, 2020. Morphological and biomechanical adaptations of skeletal muscle in the recovery phase after immobilization in a rat. *Clinical Biomechanics*. 1 mai 2020. Vol. 75, pp. 104992. DOI 10.1016/j.clinbiomech.2020.104992.

KANEGUCHI, Akinori, OZAWA, Junya et YAMAOKA, Kaoru, 2023. The effects of immobilization duration on joint contracture formation after anterior cruciate ligament reconstruction in rats. *Clinical Biomechanics*. 1 mars 2023. Vol. 103, pp. 105926. DOI 10.1016/j.clinbiomech.2023.105926.

KANG, Hyungsuk, ZSOLDOS, Rebeka R., SOLE-GUITART, Albert, NARAYAN, Edward, CAWDELL-SMITH, A. Judith et GAUGHAN, John B., 2023. Heat stress in horses : a literature review. *International Journal of Biometeorology*. 2023. Vol. 67, n° 6, pp. 957-973. DOI 10.1007/s00484-023-02467-7.

KANNUS, P., JÓZSA, L., NATRI, A. et JÄRVINEN, M., 1997. Effects of training, immobilization and remobilization on tendons. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*. Avril 1997. Vol. 7, n° 2, pp. 67-71. DOI 10.1111/j.1600-0838.1997.tb00121.x.

KESTIN, Joseph, SOKOLOV, Mordechai et WAKEHAM, William A., 1978. Viscosity of liquid water in the range −8 °C to 150 °C. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. 1 juillet 1978. Vol. 7, n° 3, pp. 941-948. DOI 10.1063/1.555581.

KIM, Eunkuk, KIM, Taegyu, KANG, Hyunyong, LEE, Jongha et CHILDERS, Martin K., 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*. Août 2010. Vol. 2, n° 8, pp. 703-712. DOI 10.1016/j.pmrj.2010.03.012.

KING, M. R., HAUSSLER, K. K., KAWCAK, C. E., MCILWRAITH, C. W. et REISER, R. F., 2013a. Mechanisms of aquatic therapy and its potential use in managing equine osteoarthritis. *Equine Veterinary Education*. 2013a. Vol. 25, n° 4, pp. 204-209. DOI 10.1111/j.2042-3292.2012.00389.x.

KING, M. R., HAUSSLER, K. K., KAWCAK, C. E., MCILWRAITH, C. W. et REISER, R. F., 2013b. Effect of underwater treadmill exercise on postural sway in horses with experimentally induced carpal joint

osteoarthritis. *American journal of veterinary research*. 2013b. Vol. 74, n° 7, pp. 971-982. DOI 10.2460/ajvr.74.7.971.

KING, M. R., JOHNSON, S. A. et DAGLISH, J., 2022. Convalescence and rehabilitation. In : *Fractures in the Horse* [en ligne]. John Wiley & Sons, Ltd. pp. 311-329. [Consulté le 7 avril 2024]. ISBN 978-1-119-43174-9.
Disponible à l'adresse : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781119431749.ch15.

KING, Melissa R., 2016. Principles and application of hydrotherapy for equine athletes. *The Veterinary Clinics of North America. Equine Practice*. Avril 2016. Vol. 32, n° 1, pp. 115-126. DOI 10.1016/j.cveq.2015.12.008.

KING, Melissa R., HAUSSLER, Kevin K., KAWCAK, Chris E., MCILWRAITH, C. Wayne, REISER, Raoul F., FRISBIE, David D. et WERPY, Natasha M., 2017. Biomechanical and histologic evaluation of the effects of underwater treadmill exercise on horses with experimentally induced osteoarthritis of the middle carpal joint. *American journal of veterinary research*. Mai 2017. Vol. 78, n° 5, pp. 558-569. DOI 10.2460/ajvr.78.5.558.

KLEIN, D.j., ANTHONY, T.g. et MCKEEVER, K.h., 2020. Changes in maximal aerobic capacity, body composition, and running capacity with prolonged training and detraining in Standardbred horses. *Comparative Exercise Physiology*. 23 mars 2020. Vol. 16, n° 3, pp. 187-195. DOI 10.3920/CEP190046.

KOCH, Drew W., GOODRICH, Laurie R., SMANIK, Lauren E., STEWARD, Sara K.T., ERNST, Nicolas S., TRUMBLE, Troy N., PARKS, Andrew H., HAUSSLER, Kevin K., KING, Melissa, ELLIS, Katherine et STUBBS, Narelle C., 2020. Principles of therapy for lameness. In : *Adams and Stashak's Lameness in Horses* [en ligne]. John Wiley & Sons, Ltd. pp. 875-947. [Consulté le 25 juin 2024]. ISBN 978-1-119-27671-5. Disponible à l'adresse : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781119276715.ch8.

KWOK, Manny M. Y., NG, Shamay S. M., MAN, S. S. et SO, Billy C. L., 2022. The effect of aquatic high intensity interval training on cardiometabolic and physical health markers in women : a systematic review and meta-analysis. *Journal of Exercise Science and Fitness*. Avril 2022. Vol. 20, n° 2, pp. 113-127. DOI 10.1016/j.jesf.2022.02.001.

KWOK, Manny M. Y., POON, Eric T. C., NG, Shamay S. M., LAI, Matthew C. Y. et SO, Billy C. L., 2022. Effects of aquatic versus land high-intensity interval training on acute cardiometabolic and perceptive responses in healthy young women. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 14 décembre 2022. Vol. 19, n° 24, pp. 16761. DOI 10.3390/ijerph192416761.

LAMPROS, Rachel E., WIATER, Ashley L. et TANAKA, Miho J., 2022. Rehabilitation and return to sport after medial patellofemoral complex reconstruction. *Arthroscopy, Sports Medicine, and Rehabilitation*. 28 janvier 2022. Vol. 4, n° 1, pp. e133-e140. DOI 10.1016/j.asmr.2021.09.030.

LAVADO, Ronaldo Avella, LEWIS, Jazlynn et MONTGOMERY, Julia B., 2023. Continuous digital hypothermia for prevention and treatment of equine acute laminitis : a practical review. *The Veterinary Journal*. 1 octobre 2023. Vol. 300-302, pp. 106016. DOI 10.1016/j.tvjl.2023.106016.

LEGUILLETTE, R., DAVID, F., MCCRAE, P., MASSIE, S., ARROYO FILHO, R., SIDES, R. et BAYLY, W., 2022. Workload associated with untethered swimming in horses. 2022. *Proceedings of the 11th International Conference on Equine Exercise Physiology Comparative Exercise Physiology, Uppsala, Sweden, 88.*

LEPAGE, OM, PERRON-LEPAGE, MF et FRANÇOIS, RJ, 1996. Description histologique de l'os normal chez le poney Shetland. *Prat Vet Eq*. 1996. Vol. 28, pp. 270-279.

LEPAGE, OM, PERRON-LEPAGE, MF et FRANÇOIS, RJ, 1997. Modelage et remaniement osseux. Observations sur les os métacarpiens du poney Shetland. *Prat Vet Eq*. 1997. Vol. 29, pp. 45-57.

LEVINE, David, MARCELLIN-LITTLE, Denis J., MILLIS, Darryl L., TRAGAUER, Verena et OSBORNE, Jason A., 2010. Effects of partial immersion in water on vertical ground reaction forces and weight distribution in dogs. *American Journal of Veterinary Research*. Décembre 2010. Vol. 71, n° 12, pp. 1413-1416. DOI 10.2460/ajvr.71.12.1413.

LEVINE, David, MILLIS, Darryl L., FLOCKER, Jeffrey et MACGUIRE, Lauren, 2014. 31 - Aquatic Therapy. In : MILLIS, Darryl et LEVINE, David (éd.), *Canine Rehabilitation and Physical Therapy (Second Edition)* [en ligne]. St. Louis : W.B. Saunders. pp. 526-542. [Consulté le 24 février 2024]. ISBN 978-1-4377-0309-2.
Disponible à l'adresse : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781437703092000314.

LI, Desheng, ZHANG, Qi, LIU, Xuguang, CHEN, Chen, LU, Jiani, YE, Dongmei, LI, Yangjun, WANG, Wei et SHEN, Mei, 2022. Effect of water-based walking exercise on rehabilitation of patients following ACL reconstruction : a prospective, randomised, single-blind clinical trial. *Physiotherapy*. Juin 2022. Vol. 115, pp. 18-26. DOI 10.1016/j.physio.2021.11.003.

LI, Ming, 2018. Analysis on rehabilitation status of sports injuries. In : *2018 4th International Conference on Humanities and Social Science Research (ICHSSR 2018)* [en ligne]. Atlantis Press. Mai 2018. pp. 137-140. [Consulté le 17 décembre 2023]. ISBN 978-94-6252-509-2. Disponible à l'adresse : https : //www.atlantis-press.com/proceedings/ichssr-18/25895819.

LIEM, Brian C., TRUSWELL, Hallie J. et HARRAST, Mark A., 2013. Rehabilitation and return to running after lower limb stress fractures. *Current Sports Medicine Reports*. 2013. Vol. 12, n° 3, pp. 200-207. DOI 10.1249/JSR.0b013e3182913cbe.

LINDNER, A., WÄSCHLE, S. et SASSE, H. H. L., 2012. Physiological and blood biochemical variables in horses exercising on a treadmill submerged in water. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. Août 2012. Vol. 96, n° 4, pp. 563-569. DOI 10.1111/j.1439-0396.2011.01179.x.

LISCHER, C. et MÄHLMANN, K., 2022. Post-operative Complications. In : *Fractures in the Horse* [en ligne]. John Wiley & Sons, Ltd. pp. 283-309. [Consulté le 7 avril 2024]. ISBN 978-1-119-43174-9. Disponible à l'adresse : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781119431749.ch14.

LÓPEZ-SANROMÁN, F. J., HOLMBAK-PETERSEN, R., SANTIAGO, I., GÓMEZ DE SEGURA, I. A. et BARREY, E., 2012. Gait analysis using 3D accelerometry in horses sedated with xylazine. *The Veterinary Journal*. 1 juillet 2012. Vol. 193, n° 1, pp. 212-216. DOI 10.1016/j.tvjl.2011.10.012.

MA, Ji, CHEN, Xiaoyu, XIN, Juan, NIU, Xin, LIU, Zhifang et ZHAO, Qian, 2022. Overall treatment effects of aquatic physical therapy in knee osteoarthritis : a systematic review and meta-analysis. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*. 28 mars 2022. Vol. 17, n° 1, pp. 190. DOI 10.1186/s13018-022-03069-6.

MA, Tianwen, SONG, Xiaopeng, MA, Yuanqiang, HU, Hailong, BAI, Hui, LI, Yue et GAO, Li, 2021. The effect of thermal mineral waters on pain relief, physical function and quality of life in patients with osteoarthritis : a systematic review and meta-analysis. *Medicine*. 29 janvier 2021. Vol. 100, n° 4, pp. e24488. DOI 10.1097/MD.0000000000024488.

MACDERMID, Paul W., FINK, Philip W. et STANNARD, Stephen R., 2017. Shock attenuation, spatio-temporal and physiological parameter comparisons between land treadmill and water treadmill running. *Journal of Sport and Health Science*. 1 décembre 2017. Vol. 6, n° 4, pp. 482-488. DOI 10.1016/j.jshs.2015.12.006.

MANCINI, Flavia, NASH, Thomas, IANNETTI, Gian Domenico et HAGGARD, Patrick, 2014. Pain relief by touch : A quantitative approach. *Pain*. Mars 2014. Vol. 155, n° 3, pp. 635-642. DOI 10.1016/j.pain.2013.12.024.

MARUSZEWSKA, Agnieszka, PANASIUK, Lech, BUCZAJ, Agnieszka et PECYNA, Anna, 2020. Effect of therapy using aquatic treadmill on the functional status of patients with knee arthrosis. *Acta Balneologica*. 1 janvier 2020. Vol. 62, pp. 27-32. DOI 10.36740/ABal202001105.

MAUREL, Delphine B., JÄHN, Katharina et LARA-CASTILLO, Nuria, 2017. Muscle-bone crosstalk : emerging opportunities for novel therapeutic approaches to treat musculoskeletal pathologies. *Biomedicines*. 24 octobre 2017. Vol. 5, n° 4, pp. 62. DOI 10.3390/biomedicines5040062.

MCCLINTOCK, S. A., HUTCHINS, D. R. et BROWNLOW, M. A., 1986a. Equine flotation tank design and technique. *Equine Veterinary Journal*. 1986. Vol. 18, n° 1, pp. 65-67. DOI 10.1111/j.2042-3306.1986.tb03540.x.

MCCLINTOCK, S. A., HUTCHINS, D. R. et BROWNLOW, M. A., 1986b. Studies on the optimal temperature of flotation tanks in the management of skeletal injuries in the horse. *Equine Veterinary Journal*. 1986. Vol. 18, n° 6, pp. 458-461. DOI 10.1111/j.2042-3306.1986.tb03688.x.

MCCLINTOCK, S. A., HUTCHINS, D. R. et BROWNLOW, M. A., 1987. Determination of weight reduction in horses in flotation tanks. *Equine Veterinary Journal*. 1987. Vol. 19, n° 1, pp. 70-71. DOI 10.1111/j.2042-3306.1987.tb02586.x.

MCCRAE, P., BRADLEY, M., ROLIAN, C. et LÉGUILLETTE, R., 2021. Water height modifies forelimb kinematics of horses during water treadmill exercise. *Comparative Exercise Physiology*. 11 janvier 2021. Vol. 17, n° 1, pp. 91-98. DOI 10.3920/CEP200013.

MCCRAE, Persephone, 2019. Exercising horses on water treadmills: Understanding the workload, mechanics, and conditioning effects of water treadmill exercise. Calgary.

MCCUTCHEON, L. Jill et GEOR, Raymond J., 2008. Chapter 6.3 - Thermoregulation and exercise-associated heat stress. In : HINCHCLIFF, Kenneth W., GEOR, Raymond J. et KANEPS, Andris J. (éd.), *Equine Exercise Physiology* [en ligne]. Edinburgh : W.B. Saunders. pp. 382-396. [Consulté le 12 décembre 2023]. ISBN 978-0-7020-2857-1. Disponible à l'adresse : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780702028571500184.

MCGOWAN, C. M., GOLLAND, L. C., EVANS, D. L., HODGSON, D. R. et ROSE, R. J., 2002. Effects of prolonged training, overtraining and detraining on skeletal muscle metabolites and enzymes. *Equine Veterinary Journal. Supplement*. Septembre 2002. N° 34, pp. 257-263. DOI 10.1111/j.2042-3306.2002.tb05429.x.

MCGOWAN, Catherine M. et COTTRIALL, Suzanne, 2016. Introduction to equine physical therapy and rehabilitation. *Veterinary Clinics of North America : Equine Practice*. 1 avril 2016. Vol. 32, n° 1, pp. 1-12. DOI 10.1016/j.cveq.2015.12.006.

MCILWRAITH, C. Wayne, 2016. 3 - Traumatic arthritis and posttraumatic osteoarthritis in the horse. In : MCILWRAITH, C. Wayne, FRISBIE, David D., KAWCAK, Christopher E. et VAN WEEREN, P. René (éd.), *Joint Disease in the Horse (Second Edition)* [en ligne]. Edinburgh : W.B. Saunders. pp. 33-48. [Consulté le 24 mars 2024]. ISBN 978-1-4557-5969-9. Disponible à l'adresse : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781455759699000036.

MEADOWS, Barry, BOWERS, Roy et OWEN, Elaine, 2019. 18 - Biomechanics of the hip, knee, and ankle. In : WEBSTER, Joseph B. et MURPHY, Douglas P. (éd.), *Atlas of Orthoses and Assistive Devices (Fifth*

Edition) [en ligne]. Philadelphia : Elsevier. pp. 207-215.e1. [Consulté le 8 décembre 2023]. ISBN 978-0-323-48323-0.
Disponible à l'adresse : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323483230000184.

MENDEZ-ANGULO, Jose L., FIRSHMAN, Anna M., GROSCHEN, Donna M., KIEFFER, Philip J. et TRUMBLE, Troy N., 2013. Effect of water depth on amount of flexion and extension of joints of the distal aspects of the limbs in healthy horses walking on an underwater treadmill. *American Journal of Veterinary Research*. Avril 2013. Vol. 74, n° 4, pp. 557-566. DOI 10.2460/ajvr.74.4.557.

MERGUI, Sophie, 2023. Transferts thermiques. 2023. Université Pierre-et-Marie-Currie, Licence de mécanique 2e année, 8 p.

MICHISHITA, Ryoma, HIDE, Taijiro, KAWAKAMI, Shotaro, KANEGAWA, Yuta, TAKAYANAGI, Kohei, INUI, Masahiro, UEHARA, Yoshinari et HIGAKI, Yasuki, 2023. Effects of aquatic exercise training on physical performance and mood states in male collegiate Soccer Players. *Translational Journal of the American College of Sports Medicine*. Winter 2023. Vol. 8, n° 1, pp. e000218. DOI 10.1249/TJX.0000000000000218.

MIGLIORINI, Filippo, MARSILIO, Emanuela, TORSIELLO, Ernesto, PINTORE, Andrea, OLIVA, Francesco et MAFFULLI, Nicola, 2022. Osteoarthritis in athletes versus nonathletes : a systematic review. *Sports medicine and arthroscopy review*. Juin 2022. Vol. 30, n° 2, pp. 78-86. DOI 10.1097/JSA.0000000000000339.

MONK, Michelle, 2016. Aquatic therapy. In : MCGOWAN, Catherine et GOFF, Lesley, *Animal physiotherapy - Assessment, treatment and rehabilitation of animals - 2nd edition* [en ligne]. pp. 384. [Consulté le 7 décembre 2023]. Disponible à l'adresse : https://www.wiley.com/en-us/Animal+Physiotherapy%3A+Assessment%2C+Treatment+and+Rehabilitation+of+Animals%2C+2nd+Edition-p-9781118852316.

MOOIJ, M. J. W., JANS, W., DEN HEIJER, G. J. L., DE PATER, M. et BACK, W., 2013. Biomechanical responses of the back of riding horses to water treadmill exercise. *Veterinary Journal (London, England: 1997)*. Décembre 2013. Vol. 198 Suppl 1, pp. e120-123. DOI 10.1016/j.tvjl.2013.09.045.

MOOVENTHAN, A et NIVETHITHA, L, 2014. Scientific evidence-based effects of hydrotherapy on various systems of the body. *North American Journal of Medical Sciences*. Mai 2014. Vol. 6, n° 5, pp. 199-209. DOI 10.4103/1947-2714.132935.

MORGAN, Jessica, STEFANOVSKI, Darko, LENFEST, Margret, CHATTERJEE, Sraboni et ORSINI, James, 2018. Novel dry cryotherapy system for cooling the equine digit. *Veterinary Record Open*. 2018. Vol. 5, n° 1, pp. e000244. DOI 10.1136/vetreco-2017-000244.

MUKAI, K., OHMURA, H., HIRAGA, A., ETO, D., TAKAHASHI, T., ASAI, Y. et JONES, J. H., 2006. Effect of detraining on cardiorespiratory variables in young Thoroughbred horses. *Equine Veterinary Journal. Supplement*. Août 2006. N° 36, pp. 210-213. DOI 10.1111/j.2042-3306.2006.tb05541.x.

MUKAI, Kazutaka, HIRAGA, Atsushi, TAKAHASHI, Toshiyuki, MATSUI, Akira, OHMURA, Hajime, AIDA, Hiroko et JONES, James H., 2017. Effects of maintaining different exercise intensities during detraining on aerobic capacity in Thoroughbreds. *American Journal of Veterinary Research*. Février 2017. Vol. 78, n° 2, pp. 215-222. DOI 10.2460/ajvr.78.2.215.

MUÑOZ, Ana, SAITUA, Aritz, BECERO, Mireya, RIBER, Cristina, SATUÉ, Katy, DE MEDINA, Antonia Sánchez, ARGÜELLES, David et CASTEJÓN-RIBER, Cristina, 2019. The use of the water treadmill for the rehabilitation of musculoskeletal injuries in the sport horse. *Journal of Veterinary Research*. 13 septembre 2019. Vol. 63, n° 3, pp. 439-445. DOI 10.2478/jvetres-2019-0050.

MURRAY, R. C., HOPKINS, E., TACEY, J. B., NANKERVIS, K. J., DECKERS, I., MACKECHNIE-GUIRE, R. et TRANQUILLE, C. A., 2020. Change in muscle development of horses undergoing 20 weeks of water treadmill exercise compared with control horses. *Equine Veterinary Journal*. 2020. Vol. 52, n° S54, pp. 9-9. DOI 10.1111/evj.09_13365.

NANKERVIS, K. J., FINNEY, P. et LAUNDER, L., 2016. Water depth modifies back kinematics of horses during water treadmill exercise. *Equine Veterinary Journal*. Novembre 2016. Vol. 48, n° 6, pp. 732-736. DOI 10.1111/evj.12519.

NANKERVIS, K. J., TRANQUILLE, C. A., CHOJNACKA, K., TACEY, J. B., DECKERS, I., NEWTON, J. R. et MURRAY, R. C., 2023. Effect of speed and water depth on limb and back kinematics in Thoroughbred horses walking on a water treadmill. *Veterinary Journal (London, England: 1997)*. 2023. Vol. 300-302, pp. 106033. DOI 10.1016/j.tvjl.2023.106033.

NANKERVIS, K. J. et WILLIAMS, R. J., 2006. Heart rate responses during acclimation of horses to water treadmill exercise. *Equine Veterinary Journal. Supplement*. Août 2006. N° 36, pp. 110-112. DOI 10.1111/j.2042-3306.2006.tb05524.x.

NANKERVIS, Kathryn J., LAUNDER, Elizabeth J. et MURRAY, Rachel C., 2017. The use of treadmills within the rehabilitation of horses. *Journal of Equine Veterinary Science*. 1 juin 2017. Vol. 53, pp. 108-115. DOI 10.1016/j.jevs.2017.01.010.

NANKERVIS, Kathryn J. et LEFRANCOIS, Kathryn, 2018. A comparison of protraction-retraction of the distal limb during treadmill and water treadmill walking in horses. *Journal of Equine Veterinary Science*. 1 novembre 2018. Vol. 70, pp. 57-62. DOI 10.1016/j.jevs.2018.08.005.

NANKERVIS, Kathryn, THOMAS, S et MARLIN, David, 2008. Effect of water temperature on heart rate of horses during water treadmill exercise. *Comparative Exercise Physiology*. 1 novembre 2008. Vol. 5, pp. 127-131. DOI 10.1017/S1478061509342358.

NANKERVIS, Kathryn, TRANQUILLE, Carolyne, MCCRAE, Persephone, YORK, Jessica, LASHLEY, Morgan, BAUMANN, Matthias, KING, Melissa, SYKES, Erin, LAMBOURN, Jessica, MISKIMMIN, Kerry-Anne, ALLEN, Donna, VAN MOL, Evelyne, BROOKS, Shelley, WILLINGHAM, Tonya, LACEY, Sam, HARDY, Vanessa, ELLIS, Julie et MURRAY, Rachel, 2021. Consensus for the general use of equine water treadmills for healthy horses. *Animals : an open access journal from MDPI*. 26 janvier 2021. Vol. 11, n° 2, pp. 305. DOI 10.3390/ani11020305.

NAVAS DE SOLIS, Cristobal, 2019. Cardiovascular response to exercise and training, exercise testing in horses. *The Veterinary Clinics of North America. Equine Practice*. Avril 2019. Vol. 35, n° 1, pp. 159-173. DOI 10.1016/j.cveq.2018.11.003.

NTOUMANI, Maria, DUGUÉ, Benoit, RIVAS, Eric et GONGAKI, Konstantina, 2023. Thermoregulation and thermal sensation during whole-body water immersion at different water temperatures in healthy individuals : A scoping review. *Journal of Thermal Biology*. Février 2023. Vol. 112, pp. 103430. DOI 10.1016/j.jtherbio.2022.103430.

NUALON, Poonyanat, PIRIYAPRASARTH, Pagamas et YUKTANANDANA, Pongsak, 2013. The role of 6-week hydrotherapy and land-based therapy plus ankle taping in a preseason rehabilitation program for athletes with chronic ankle instability. *Asian biomedicine*. 1 août 2013. Vol. 7, pp. 553-559. DOI 10.5372/1905-7415.0704.211.

O'CONOR, Christopher J., CASE, Natasha et GUILAK, Farshid, 2013. Mechanical regulation of chondrogenesis. *Stem Cell Research & Therapy*. 2013. Vol. 4, n° 4, pp. 61. DOI 10.1186/scrt211.

OGONOWSKA-SLODOWNIK, Anna, RICHLEY GEIGLE, Paula et MORGULEC-ADAMOWICZ, Natalia, 2020. Head-out water-based protocols to assess cardiorespiratory fitness - Systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2 octobre 2020. Vol. 17, n° 19, pp. 7215. DOI 10.3390/ijerph17197215.

OIKAWA, Sara Y., HOLLOWAY, Tanya M. et PHILLIPS, Stuart M., 2019. The impact of step reduction on muscle health in aging : protein and exercise as countermeasures. *Frontiers in Nutrition* [en ligne]. 24 mai 2019. Vol. 6. [Consulté le 22 juin 2024]. DOI 10.3389/fnut.2019.00075. Disponible à l'adresse : https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnut.2019.00075.

ORTVED, Kyla F. et RICHARDSON, Dean W., 2021. Chapter 46 - Complications of equine orthopedic surgery. In : Rubio-Martinez, L.M., et Hendrickson, D.A. (éd.), *Complications in Equine Surgery*. Hoboken : Wiley-Blackwell. pp. 629-666. [Consulté le 14 décembre 2023]. ISBN 978-1-1191-9033-2. Disponible à l'adresse : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781119190332.ch46.

PALLUBINSKY, H., SCHELLEN, L. et VAN MARKEN LICHTENBELT, W. D., 2019. Exploring the human thermoneutral zone - A dynamic approach. *Journal of Thermal Biology*. Janvier 2019. Vol. 79, pp. 199-208. DOI 10.1016/j.jtherbio.2018.12.014.

PARFITT, Rhodri, HENSMAN, Marianne Y. et LUCAS, Samuel J. E., 2017. Cerebral blood flow responses to aquatic treadmill exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. Juillet 2017. Vol. 49, n° 7, pp. 1305. DOI 10.1249/MSS.0000000000001230.

PARKINSON, S., WILLS, A.P., TABOR, G. et WILLIAMS, J.M., 2018. Effect of water depth on muscle activity of dogs when walking on a water treadmill. *Comparative Exercise Physiology*. 6 juin 2018. Vol. 14, n° 2, pp. 79-89. DOI 10.3920/CEP170031.

PASMAN, Z. C., TE MOLLER, N. C. R., DE GEER, H. C., SERRA BRAGANÇA, F. M. et SPOORMAKERS, T. J. P., 2022. Water and speed affect upper body kinematics and limb timing in horses walking on a water treadmill. 2022. *Proceedings of the 11th International Conference on Equine Exercise Physiology Comparative Exercise Physiology, Uppsala, Sweden, 88.*

PENG, Meng-Si, WANG, Rui, WANG, Yi-Zu, CHEN, Chang-Cheng, WANG, Juan, LIU, Xiao-Chen, SONG, Ge, GUO, Jia-Bao, CHEN, Pei-Jie et WANG, Xue-Qiang, 2022. Efficacy of therapeutic aquatic exercise vs physical therapy modalities for patients with chronic low back pain : a randomized clinical trial. *JAMA network open*. 4 janvier 2022. Vol. 5, n° 1, pp. e2142069. DOI 10.1001/jamanetworkopen.2021.42069.

PETEK, Bradley J., GROEZINGER, Erich Y., PEDLAR, Charles R. et BAGGISH, Aaron L., 2022. Cardiac effects of detraining in athletes : a narrative review. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*. Juin 2022. Vol. 65, n° 4, pp. 101581. DOI 10.1016/j.rehab.2021.101581.

PEULTIER-CELLI, Laetitia, MAINARD, Didier, WEIN, Frank, PARIS, Nicolas, BOISSEAU, Patrick, FERRY, Alexandre, GUEGUEN, René, CHARY-VALCKENAERE, Isabelle, PAYSANT, Jean et PERRIN, Philippe, 2017. Comparison of an innovative rehabilitation, combining reduced conventional rehabilitation with balneotherapy, and a conventional rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction in athletes. *Frontiers in Surgery*. 7 novembre 2017. Vol. 4, pp. 61. DOI 10.3389/fsurg.2017.00061.

PIPINO, Gennaro, TOMASI, Elena, MARDONES, Rodrigo, TEDESCO, Andrea, VACCARISI, Davide Corrado, VIA, Alessio Giai et BORGHI, Raffaele, 2023. Rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction : dry land vs aquatic rehabilitation. Septembre 2023. Vol. 13, n° 3, pp. 421-429.

POOLE, David C. et ERICKSON, Howard H., 2008. Chapter 4.1 - Cardiovascular function and oxygen transport : responses to exercise and training. In : HINCHCLIFF, Kenneth W., GEOR, Raymond J. et KANEPS, Andris J. (éd.), *Equine Exercise Physiology* [en ligne]. Edinburgh : W.B. Saunders. pp. 212-245.

[Consulté le 8 décembre 2023]. ISBN 978-0-7020-2857-1. Disponible à l'adresse : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780702028571500123.

PÖSÖ, A. Reeta, HYYPPÄ, Seppo et GEOR, Raymond J., 2008. Chapter 5.1 - Metabolic responses to exercise and training. In : HINCHCLIFF, Kenneth W., GEOR, Raymond J. et KANEPS, Andris J. (éd.), *Equine Exercise Physiology* [en ligne]. Edinburgh : W.B. Saunders. pp. 248-273. [Consulté le 31 mars 2024]. ISBN 978-0-7020-2857-1.
Disponible à l'adresse : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780702028571500135.

POTENZA, Korin N., HUGGONS, Nick A., JONES, Andrew R. E., ROSANOWSKI, Sarah M. et MCILWRAITH, C. Wayne, 2020. Comparing racing performance following arthroscopic surgery of metacarpophalangeal/metatarsophalangeal and carpal joints in Thoroughbred racehorses rehabilitated using conventional and underwater treadmill therapies. *Veterinary record* [en ligne]. 31 octobre 2020. Vol. 187, n° 9. [Consulté le 30 mars 2024]. DOI 10.1136/vr.105745. Disponible à l'adresse : https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000608475200044.

PRINS, J. et CUTNER, D., 1999. Aquatic therapy in the rehabilitation of athletic injuries. *Clinics in Sports Medicine*. Avril 1999. Vol. 18, n° 2, pp. 447-461, ix. DOI 10.1016/s0278-5919(05)70158-7.

PROCTOR-BROWN, Lauren, HICKS, Rebecca, COLMER, Sarah, GUILFOYLE, Danielle, DALLAP-SCHAER, Barbara, JOHNSON, Amy L. et TOMLINSON, Joy, 2018. Distal limb pathologic conditions in horses treated with sleeve-style digital cryotherapy (285 cases). *Research in Veterinary Science*. 1 décembre 2018. Vol. 121, pp. 12-17. DOI 10.1016/j.rvsc.2018.09.008.

PSYCHARAKIS, Stelios G., COLEMAN, Simon G. S., LINTON, Linda et VALENTIN, Stephanie, 2022. The WATER study : Which AquaTic ExeRcises increase muscle activity and limit pain for people with low back pain ? *Physiotherapy*. 1 septembre 2022. Vol. 116, pp. 108-118. DOI 10.1016/j.physio.2022.03.003.

PTASINSKI, Anna M, DUNLEAVY, Mark, ADEBAYO, Temitope et GALLO, Robert A., 2022. Returning athletes to sports following anterior cruciate ligament tears. *Current Reviews in Musculoskeletal Medicine*. 26 juillet 2022. Vol. 15, n° 6, pp. 616-628. DOI 10.1007/s12178-022-09782-3.

PW, Macdermid, J, Wharton, C, Schill et PW, Fink, 2017. Water depth effects on impact loading, kinematic and physiological variables during water treadmill running. *Gait & posture*. Juillet 2017. Vol. 56. DOI 10.1016/j.gaitpost.2017.05.013.

QUAM, Vivian, YARDLEY, Jonathan, QUAM, Mikkel, PAZ, Cahuê et BELKNAP, James, 2021. Cryotherapy provides transient analgesia in an induced lameness model in horses. *The Canadian Veterinary Journal*. Août 2021. Vol. 62, n° 8, pp. 834-838.

RAINGER, J. E., WARDIUS, S., MEDINA-TORRES, C. E., DEMPSEY, S. M., PERKINS, N. et VAN EPS, A. W., 2021. The effect of regional hypothermia on mechanical nociceptive thresholds in the equine distal forelimb. *The Veterinary Journal*. 1 mars 2021. Vol. 269, pp. 105607. DOI 10.1016/j.tvjl.2021.105607.

RANJBARAN, Samira Moghaddam, SHAMEKHI, Sina et EFTEKHARSADAT, Bina, 2024. A novel balance index for preliminary assessment of proprioception based on a balance-cognitive study. *Biomedical Signal Processing and Control*. 1 septembre 2024. Vol. 95, pp. 106393. DOI 10.1016/j.bspc.2024.106393.

REENALDA, Jasper, MAARTENS, Erik, BUURKE, Jaap H. et GRUBER, Allison H., 2019. Kinematics and shock attenuation during a prolonged run on the athletic track as measured with inertial magnetic measurement units. *Gait & Posture*. 1 février 2019. Vol. 68, pp. 155-160. DOI 10.1016/j.gaitpost.2018.11.020.

REIMAN, Michael P. et LORENZ, Daniel S., 2011. Integration of strength and conditioning principles into a rehabilitation program. *International Journal of Sports Physical Therapy*. Septembre 2011. Vol. 6, n° 3, pp. 241-253.

RELPH, N., HERRINGTON, L. et TYSON, S., 2014. The effects of ACL injury on knee proprioception : a meta-analysis. *Physiotherapy*. Septembre 2014. Vol. 100, n° 3, pp. 187-195. DOI 10.1016/j.physio.2013.11.002.

REMAUD, A., GUÉVEL, A. et CORNU, C., 2007. Coactivation et inhibition musculaire : influences sur la régulation du couple de force développé et les adaptations induites par un entraînement en force. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*. 1 janvier 2007. Vol. 37, n° 1, pp. 1-14. DOI 10.1016/j.neucli.2007.01.002.

RIBEIRO, Fernando et OLIVEIRA, José, 2007. Aging effects on joint proprioception : the role of physical activity in proprioception preservation. *European Review of Aging and Physical Activity*. Octobre 2007. Vol. 4, n° 2, pp. 71-76. DOI 10.1007/s11556-007-0026-x.

RICE, David Andrew et MCNAIR, Peter John, 2010. Quadriceps arthrogenic muscle inhibition : neural mechanisms and treatment perspectives. *Seminars in Arthritis and Rheumatism*. Décembre 2010. Vol. 40, n° 3, pp. 250-266. DOI 10.1016/j.semarthrit.2009.10.001.

RICHARDSON, D. W. et CLARK, C. C., 1993. Effects of short-term cast immobilization on equine articular cartilage. *American Journal of Veterinary Research*. Mars 1993. Vol. 54, n° 3, pp. 449-453.

RIVERO, José-Luis L. et PIERCY, Richard J., 2008. Chapter 2.1 - Muscle physiology : responses to exercise and training. In : HINCHCLIFF, Kenneth W., GEOR, Raymond J. et KANEPS, Andris J. (éd.), *Equine Exercise Physiology* [en ligne]. Edinburgh : W.B. Saunders. pp. 30-80. [Consulté le 21 juin 2024]. ISBN 978-0-7020-2857-1.
Disponible à l'adresse : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780702028571500056.

ROLVIEN, Tim et AMLING, Michael, 2022. Disuse osteoporosis : clinical and mechanistic insights. *Calcified Tissue International*. Mai 2022. Vol. 110, n° 5, pp. 592-604. DOI 10.1007/s00223-021-00836-1.

SAITUA, Aritz, BECERO, Mireya, ARGÜELLES, David, CASTEJÓN-RIBER, Cristina, SÁNCHEZ DE MEDINA, Antonia, SATUÉ, Katy et MUÑOZ, Ana, 2020. Combined effects of water depth and velocity on the accelerometric parameters measured in horses exercised on a water treadmill. *Animals : an Open Access Journal from MDPI*. 3 février 2020. Vol. 10, n° 2, pp. 236. DOI 10.3390/ani10020236.

SAITUA, Aritz, CASTEJÓN-RIBER, Cristina, REQUENA, Francisco, ARGÜELLES, David, CALLE-GONZÁLEZ, Natalie, DE MEDINA, Antonia Sánchez et MUÑOZ, Ana, 2022. Previous exercise on a water treadmill at different depths affects the accelerometric pattern recorded on a track in horses. *Animals*. Janvier 2022. Vol. 12, n° 22, pp. 3086. DOI 10.3390/ani12223086.

SANTOSUOSSO, Emma, LEGUILLETTE, Renaud, VINARDELL, Tatiana, FILHO, Silvio, MASSIE, Shannon, MCCRAE, Persephone, JOHNSON, Sarah, ROLIAN, Campbell et DAVID, Florent, 2021. Kinematic analysis during straight line free swimming in horses : Part 1 - Forelimbs. *Frontiers in Veterinary Science*. 14 octobre 2021. Vol. 8. DOI 10.3389/fvets.2021.752375.

SANTOSUOSSO, Emma, LEGUILLETTE, Renaud, VINARDELL, Tatiana, FILHO, Silvio, MASSIE, Shannon, MCCRAE, Persephone, JOHNSON, Sarah, ROLIAN, Campbell et DAVID, Florent, 2022. Kinematic analysis during straight line free swimming in horses : Part 2 - Hindlimbs. *Frontiers in Veterinary Science*. 31 janvier 2022. Vol. 8. DOI 10.3389/fvets.2021.761500.

SCOTT, R., NANKERVIS, K., STRINGER, C., WESTCOTT, K. et MARLIN, D., 2010. The effect of water height on stride frequency, stride length and heart rate during water treadmill exercise. *Equine Veterinary Journal*. 2010. Vol. 42, n° s38, pp. 662-664. DOI 10.1111/j.2042-3306.2010.00194.x.

SERRANO, A. L., QUIROZ-ROTHE, E. et RIVERO, J. L., 2000. Early and long-term changes of equine skeletal muscle in response to endurance training and detraining. *Pflugers Archiv : European Journal of Physiology*. Décembre 2000. Vol. 441, n° 2-3, pp. 263-274. DOI 10.1007/s004240000408.

SHAD, Brandon J., THOMPSON, Janice L., HOLWERDA, Andrew M., STOCKS, Ben, ELHASSAN, Yasir S., PHILP, Andrew, VAN LOON, Luc J. C. et WALLIS, Gareth A., 2019. One week of step reduction lowers myofibrillar protein synthesis rates in young men. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. Octobre 2019. Vol. 51, n° 10, pp. 2125. DOI 10.1249/MSS.0000000000002034.

SHIMO, Kazuhiro, OGAWA, Sho, NIWA, Yuto, TOKIWA, Yuji, DOKITA, Ayaka, KATO, Sho, HATTORI, Takafumi et MATSUBARA, Takako, 2022. Inhibition of current perception thresholds in A-delta and C fibers through somatosensory stimulation of the body surface. *Scientific Reports*. 12 août 2022. Vol. 12, pp. 13705. DOI 10.1038/s41598-022-18016-y.

SILVA, Mariana Felipe, DIAS, Josilainne Marcelino, DELA BELA, Laís Faganello, PELEGRINELLI, Alexandre Roberto Marcondes, LIMA, Tarcísio Brandão, CARVALHO, Rodrigo Gustavo da Silva, TAGLIETTI, Marcelo, BATISTA JÚNIOR, João Pedro, FACCI, Ligia Maria, MCVEIGH, Joseph Gerard et CARDOSO, Jefferson Rosa, 2020. A review on muscle activation behaviour during gait in shallow water and deep-water running and surface electromyography procedures. *Journal of Bodywork and Movement Therapies*. Octobre 2020. Vol. 24, n° 4, pp. 432-441. DOI 10.1016/j.jbmt.2020.06.005.

SILVERS, Brittany L, LEATHERWOOD, Jessica L, ARNOLD, Carolyn E, NIELSEN, Brian D, HUSEMAN, Chelsie J, DOMINGUEZ, Brandon J, GLASS, Kati G, MARTINEZ, Rafael E, MUCH, Mattea L et BRADBERY, Amanda N, 2020. Effects of aquatic conditioning on cartilage and bone metabolism in young horses. *Journal of Animal Science*. 27 juillet 2020. Vol. 98, n° 8, pp. 1-10. DOI 10.1093/jas/skaa239.

SILVERS, W. Matthew, RUTLEDGE, Erin R. et DOLNY, Dennis G., 2007. Peak cardiorespiratory responses during aquatic and land treadmill exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. Juin 2007. Vol. 39, n° 6, pp. 969-975. DOI 10.1097/mss.0b013e31803bb4ea.

SINGH, Som P., BORTHWICK, Kiera G. et QURESHI, Fahad M., 2021. Commentary : Comparison of an innovative rehabilitation, combining reduced conventional rehabilitation with balneotherapy, and a conventional rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction in athletes. *Frontiers in Surgery* [en ligne]. 2021. Vol. 8. [Consulté le 17 décembre 2023]. Disponible à l'adresse : https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fsurg.2021.665748.

SMITH, Roger K. W. et GOODSHIP, Allen E., 2008. Chapter 2.3 - Tendon and ligament physiology : responses to exercise and training. In : HINCHCLIFF, Kenneth W., GEOR, Raymond J. et KANEPS, Andris J. (éd.), *Equine Exercise Physiology* [en ligne]. Edinburgh : W.B. Saunders. pp. 106-131. [Consulté le 10 juin 2024]. ISBN 978-0-7020-2857-1. Disponible à l'adresse : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978070202857150007X.

SO, Billy Chun-Lung, KWOK, Man-Ying, CHAN, Yin-Leuk, LAM, Hing-Fung Kevin, CHANG, Hei-Tung Hilda, CHAN, Tsz-Kit, LEUNG, Chi-Yin Ken et TSE, Hon-Ting, 2022. Lower-limb muscle activity during aquatic treadmill running in individuals with anterior cruciate ligament reconstruction. *Journal of Sport Rehabilitation*. 1 septembre 2022. Vol. 31, n° 7, pp. 894-903. DOI 10.1123/jsr.2021-0431.

STEINKE, S. L., CARMALT, J. L. et MONTGOMERY, J. B., 2021. Weight reduction and possible implications for the rehabilitation of horses with ambulatory difficulties. *Equine Veterinary Education*. 2021. Vol. 33, n° 3, pp. 152-158. DOI 10.1111/eve.13210.

STEWART, Holly L., WERPY, Natasha M., MCILWRAITH, C. Wayne et KAWCAK, Christopher E., 2020. Physiologic effects of long-term immobilization of the equine distal limb. *Veterinary surgery : VS*. Juillet 2020. Vol. 49, n° 5, pp. 840-851. DOI 10.1111/vsu.13441.

THEIN, J. M. et BRODY, L. T., 1998. Aquatic-based rehabilitation and training for the elite athlete. *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*. Janvier 1998. Vol. 27, n° 1, pp. 32-41. DOI 10.2519/jospt.1998.27.1.32.

Thermodynamic Equation of SeaWater 2010 (TEOS-10), 2010. [en ligne]. [Consulté le 16 septembre 2024]. Disponible à l'adresse : https://www.teos-10.org/.

THOMAS, D. P., FREGIN, F., GERBER, N. H. et AILES, N. B., 1980. Cardiorespiratory adjustments to tethered-swimming in the horse. *Pflügers Archiv*. 1 mai 1980. Vol. 385, n° 1, pp. 65-70. DOI 10.1007/BF00583916.

TOKURIKI, M., OHTSUKI, R., KAI, M., HIRAGA, A., OKI, H., MIYAHARA, Y. et AOKI, O., 1999. EMG activity of the muscles of the neck and forelimbs during different forms of locomotion. *Equine Veterinary Journal. Supplement*. Juillet 1999. N° 30, pp. 231-234. DOI 10.1111/j.2042-3306.1999.tb05224.x.

TOVIN, B. J., WOLF, S. L., GREENFIELD, B. H., CROUSE, J. et WOODFIN, B. A., 1994. Comparison of the effects of exercise in water and on land on the rehabilitation of patients with intra-articular anterior cruciate ligament reconstructions. *Physical Therapy*. Août 1994. Vol. 74, n° 8, pp. 710-719. DOI 10.1093/ptj/74.8.710.

TRANQUILLE, C. A., NANKERVIS, K. J., WALKER, V. A., TACEY, J. B. et MURRAY, R. C., 2017. Current knowledge of equine water treadmill exercise : what can we learn from human and canine studies ? *Journal of Equine Veterinary Science*. 1 mars 2017. Vol. 50, pp. 76-83. DOI 10.1016/j.jevs.2016.10.011.

TRANQUILLE, C. A., TACEY, J. B., WALKER, V. A., MACKECHNIE-GUIRE, R., ELLIS, J., NANKERVIS, K. J., NEWTON, R. et MURRAY, R., 2022a. Effect of water depth on limb and back kinematics in horses walking on a water treadmill. *Journal of Equine Veterinary Science*. 2022a. Vol. 115, pp. 104025. DOI 10.1016/j.jevs.2022.104025.

TRANQUILLE, C. A., TACEY, J. B., WALKER, V. A., MACKECHNIE-GUIRE, R., ELLIS, J., NANKERVIS, K.j., NEWTON, R. et MURRAY, R.c., 2022b. The immediate effect of water treadmill walking exercise on overground in-hand walking locomotion in the horse. *Comparative Exercise Physiology*. 2022b. Vol. 18, n° 5, pp. 413-418. DOI 10.3920/CEP220027.

TRANQUILLE, C. A., TACEY, J. B., WALKER, V. A., NANKERVIS, K. J. et MURRAY, R. C., 2018. International survey of equine water treadmills - Why, when, and how ? *Journal of Equine Veterinary Science*. 1 octobre 2018. Vol. 69, pp. 34-42. DOI 10.1016/j.jevs.2018.05.220.

TYGANOV, Sergey A., BELOVA, Svetlana P., TURTIKOVA, Olga V., VIKHLYANTSEV, Ivan M., NEMIROVSKAYA, Tatiana L. et SHENKMAN, Boris S., 2023. Changes in the mechanical properties of fast and slow skeletal muscle after 7 and 21 days of restricted activity in rats. *International Journal of Molecular Sciences*. 18 février 2023. Vol. 24, n° 4, pp. 4141. DOI 10.3390/ijms24044141.

TYLER, C. M., GOLLAND, L. C., EVANS, D. L., HODGSON, D. R. et ROSE, R. J., 1996. Changes in maximum oxygen uptake during prolonged training, overtraining, and detraining in horses. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*. Novembre 1996. Vol. 81, n° 5, pp. 2244-2249. DOI 10.1152/jappl.1996.81.5.2244.

TYLER, C. M., GOLLAND, L. C., EVANS, D. L., HODGSON, D. R. et ROSE, R. J., 1998. Skeletal muscle adaptations to prolonged training, overtraining and detraining in horses. *Pflugers Archiv : European Journal of Physiology*. Août 1998. Vol. 436, n° 3, pp. 391-397. DOI 10.1007/s004240050648.

VALDES, Kristin, MANALANG, Katie Capistran et LEACH, Christen, 2024. Proprioception : an evidence-based review. *Journal of Hand Therapy*. 1 avril 2024. Vol. 37, n° 2, pp. 269-272. DOI 10.1016/j.jht.2023.09.015.

VAN EPS, A. W. et ORSINI, J. A., 2016. A comparison of seven methods for continuous therapeutic cooling of the equine digit. *Equine Veterinary Journal*. 2016. Vol. 48, n° 1, pp. 120-124. DOI 10.1111/evj.12384.

VAN EPS, A. W. et POLLITT, C. C., 2009. Equine laminitis model : cryotherapy reduces the severity of lesions evaluated seven days after induction with oligofructose. *Equine Veterinary Journal*. 2009. Vol. 41, n° 8, pp. 741-746. DOI 10.2746/042516409X434116.

VAN HARREVELD, Philip D., LILLICH, James D., KAWCAK, Christopher E., GAUGHAN, Earl M., MCLAUGHLIN, Ronald M. et DEBOWES, Richard M., 2002a. Clinical evaluation of the effects of immobilization followed by remobilization and exercise on the metacarpophalangeal joint in horses. *American Journal of Veterinary Research*. 2002a. Vol. 63, n° 2, pp. 282-288. DOI 10.2460/ajvr.2002.63.282.

VAN HARREVELD, Philip D., LILLICH, James D., KAWCAK, Christopher E., TURNER, A. Simon et NORRDIN, Robert W., 2002b. Effects of immobilization followed by remobilization on mineral density, histomorphometric features, and formation of the bones of the metacarpophalangeal joint in horses. *American Journal of Veterinary Research*. 2002b. Vol. 63, n° 2, pp. 276-281. DOI 10.2460/ajvr.2002.63.276.

VAN WEEREN, P. René, 2016. 1 - General anatomy and physiology of joints. In : MCILWRAITH, C. Wayne, FRISBIE, David D., KAWCAK, Christopher E. et VAN WEEREN, P. René (éd.), *Joint Disease in the Horse (Second Edition)* [en ligne]. Edinburgh : W.B. Saunders. pp. 1-24. [Consulté le 9 décembre 2023]. ISBN 978-1-4557-5969-9.
Disponible à l'adresse : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781455759699000012.

VAN WEEREN, Rene, 2018. Kinematics. In : *Equine Neck and Back Pathology* [en ligne]. John Wiley & Sons, Ltd. pp. 49-72. [Consulté le 18 février 2024]. ISBN 978-1-118-97452-0. Disponible à l'adresse : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781118974520.ch4.

VINCZE, Anikó, SZABÓ, Csaba, SZABÓ, Viola, VERES, Sándor, ÜTŐ, Dániel et HEVESI, Ákos, 2013. The effect of deep water aqua treadmill training on the plasma biochemical parameters of show jumpers. *Agriculturae Conspectus Scientificus*. 1 septembre 2013. Vol. 78, n° 3, pp. 289-293.

VITGER, Anne Désiré, BRUHN-RASMUSSEN, Tanja, OPPENLÆNDER PEDERSEN, Eja, FUGLSANG-DAMGAARD, Lene Høeg et HARRISON, Adrian Paul, 2021. The impact of water depth and speed on muscle fiber activation of healthy dogs walking in a water treadmill. *Acta Veterinaria Scandinavica*. 24 novembre 2021. Vol. 63, n° 46. DOI 10.1186/s13028-021-00612-z.

VOSS, B., MOHR, E. et KRZYWANEK, H., 2002. Effects of aqua-treadmill exercise on selected blood parameters and on heart-rate variability of horses. *Journal of Veterinary Medicine. A, Physiology, Pathology, Clinical Medicine*. Avril 2002. Vol. 49, n° 3, pp. 137-143. DOI 10.1046/j.1439-0442.2002.00420.x.

WEISHAUPT, Michael A., 2008. Adaptation strategies of horses with lameness. *Veterinary Clinics of North America : Equine Practice*. 1 avril 2008. Vol. 24, n° 1, pp. 79-100. DOI 10.1016/j.cveq.2007.11.010.

WU, Jocelyn, KATOR, Jamie L., ZARRO, Michael et LEONG, Natalie L., 2022. Rehabilitation principles to consider for anterior cruciate ligament repair. *Sports Health*. 2022. Vol. 14, n° 3, pp. 424-432. DOI 10.1177/19417381211032949.

XU, Xiaojiang, RIOUX, Timothy P. et CASTELLANI, Michael P., 2023. The specific heat of the human body is lower than previously believed : The journal Temperature toolbox. *Temperature*. 3 avril 2023. Vol. 10, n° 2, pp. 235-239. DOI 10.1080/23328940.2022.2088034.

YARNELL, Kelly, FLEMING, Jennifer, STRATTON, Tim D. et BRASSINGTON, Rebecca, 2014. Monitoring changes in skin temperature associated with exercise in horses on a water treadmill by use of infrared thermography. *Journal of Thermal Biology*. Octobre 2014. Vol. 45, pp. 110-116. DOI 10.1016/j.jtherbio.2014.08.003.

ZAMARIOLI, Ariane, PEZOLATO, Adriano, MIELI, Evandro et SHIMANO, Antonio, 2008. The significance of water rehabilitation in patients with anterior cruciate ligament reconstruction. *Physiotherapy*. Avril 2008. Vol. 16, n° 2, pp. 3-6.

ZHANG, Jie, LI, Yang, LI, Guangyue, MA, Xiufeng, WANG, Huiping, GOSWAMI, Nandu, HINGHOFER-SZALKAY, Helmut, CHANG, Hui et GAO, Yunfang, 2017. Identification of the optimal dose and calpain system regulation of tetramethylpyrazine on the prevention of skeletal muscle atrophy in hindlimb unloading rats. *Biomedicine & Pharmacotherapy = Biomedecine & Pharmacotherapie*. Décembre 2017. Vol. 96, pp. 513-523. DOI 10.1016/j.biopha.2017.10.012.

ZHENG, Jie, PAN, Tian, JIANG, Yankang et SHEN, Yupeng, 2022. Effects of short- and long-term detraining on maximal oxygen uptake in athletes : a systematic review and meta-analysis. *BioMed Research International*. 2022. Vol. 2022, pp. 2130993. DOI 10.1155/2022/2130993.

ZHOU, Chen-Xu, WANG, Feng, ZHOU, Yun, FANG, Qiao-Zhou et ZHANG, Quan-Bing, 2023. Formation process of extension knee joint contracture following external immobilization in rats. *World Journal of Orthopedics*. 18 septembre 2023. Vol. 14, n° 9, pp. 669-681. DOI 10.5312/wjo.v14.i9.669.

Annexes

<u>Annexe 1</u> : Objectifs de l'entrainement et types d'exercices aquatiques associés pour l'athlète humain, d'après Thein et Brody (1998).

Objectifs de l'exercice	Types d'exercices aquatiques
<u>Conditionnement cardio-vasculaire</u> À travers les exercices aquatiques, l'athlète peut maintenir ou améliorer sa condition cardiovasculaire tout en préservant sa lésion. Cela est particulièrement utile pour les athlètes présentant des restrictions en termes de support de poids ou d'impact. L'entrainement cardiovasculaire devrait être au centre du programme de réhabilitation. Recommandations : 25 minutes, cinq fois par semaine ou plus, comme minimum, alors que les athlètes d'élite auront besoin de plus longues sessions, fonction de la saison et de leur sport.	Marche et course en eau profonde ou peu profonde, vélo, exercices de callisthénie, exercices mimant les mouvements associés au sport, ski de randonnée nordique, battements de pied à la vertical (avec ou sans palmes), ondulations, etc. Afin de rendre les exercices plus compliqués, il est possible de rajouter des flotteurs au niveau des chevilles, des plaquettes de natation, des palmes afin d'augmenter la résistance, ou d'augmenter la vitesse des mouvements.
<u>Renforcement des muscles des membres inférieurs</u>	Une variété d'exercices en chaîne cinétique ouverte ou fermée existe : - Battements de jambes verticaux, natation, battements de jambes effectués allongé dos ou ventre vers le fond de la piscine : permettent le travail de l'endurance musculaire. - Exercices de flexion et extension du genou tout en étant assis sur une planche avec ou sans palmes : renforcement des muscles quadriceps et ischio-jambier. - Fentes, squats : renforcement des muscles quadriceps et fessiers. - Squats en poussant sur une planche flottante : coordination et contrôle excentrique. - Sauts sur deux jambes, puis une jambe, puis en tournant : effort explosif. Les palmes en augmentant la surface, et les flotteurs au niveau des chevilles en augmentant la flottabilité, sont des moyens efficaces pour augmenter la résistance lors d'exercices en chaîne cinétique ouverte. Du fait de la flottabilité, le travail excentrique du quadriceps est diminué par rapport au travail sur terre.
<u>Renforcement des muscles du tronc</u>	- Levés des jambes droites (muscle droit de l'abdomen) ou de chaque côté (muscles obliques de l'abdomen) en s'appuyant sur un côté de la piscine. - Travail excentrique des muscles abdominaux en coinçant un ballon au niveau du ventre et réalisation de flexions et extensions du tronc, autorisant doucement la balle à retourner à la surface de l'eau. - Marche ou course dans l'eau en tenant une planche (intérêt pour le football américain). La plupart des exercices dans l'eau pour les membres inférieurs impliquent une stabilisation par le tronc et donc participent également à son renforcement.

Equilibre et proprioception	- Circumduction et flexion/extension de la hanche en s'appuyant sur le membre lésé, avec de l'eau à hauteur de la taille, puis en diminuant progressivement le niveau d'eau. - Maintien de l'équilibre sur la jambe lésée tout en réalisant des exercices perturbant le centre de gravité avec les membres supérieurs. - Réalisation d'exercices les yeux fermés de sorte à solliciter davantage le contrôle neuromusculaire que les informations visuelles. - Sauts.
Retour au sport La plus grosse erreur commise par les athlètes est de retourner trop précocement à des exercices trop intenses, ne laissant pas suffisamment de temps à une récupération adéquate.	En effectuant un programme d'exercices intenses dans l'eau, les athlètes d'élite pourront bénéficier de davantage de temps pour récupérer tout en continuant leur entrainement et conditionnement. Un retour graduel au sport et aux exercices avec impact est crucial pour prévenir une récidive de la lésion. Avant d'effectuer des activités avec impact sur terre, les athlètes avec lésions des membres inférieurs ou de la colonne vertébrale doivent réaliser des tests spécifiques de leur sport dans l'eau peu profonde. Ils doivent pouvoir effectuer les tests sans augmentation de la douleur, douleur musculaire, ou gonflement des tissus. Si l'athlète supporte le test, il pourra recommencer des exercices avec impact sur terre, et continuer avec un programme dans l'eau en jours alternés.
Étirements	Réalisation possible de tous les étirements de routine dans l'eau. Une eau neutre (32 à 35 °C) fournira un environnement relaxant, qui permet une augmentation de l'extensibilité des tissus mous.

<u>Annexe 2</u> : Exemple de programme de réhabilitation de l'athlète après une chirurgie de reconstruction du ligament croisé antérieur du genou intégrant la thérapie aquatique – Exercices spécifiques, critères d'entrée pour chaque stade, d'après Buckthorpe, Pirotti, et Villa (2019).

Le programme intègre quatre stades en alignement avec le statut de récupération fonctionnelle de l'athlète après ACLR. Le programme décrit l'approche typique pour le retour d'un athlète professionnel à l'entrainement six mois après ACLR. Les délais dépendent de la lésion (notamment la présence de lésions concomitantes : atteinte du cartilage, ligament collatéral médial), et des capacités de cicatrisation et de progression individuelles. Les critères d'entrée, et non la durée, doivent être utilisés pour le passage au stade suivant de réhabilitation. L'alignement des activités dans la piscine et sur terre est important.

	Stade 1 – Piscine post-opératoire	**Stade 2 – Entrainement aux mouvements et conditionnement aérobie**	**Stade 3 – Conditionnement intense et préparation au terrain**	**Stade 4 – Récupération post-effort et entre les sessions**
Durée typique	Semaines 2 à 4 après la chirurgie	Semaines 5 à 12 après la chirurgie	Semaines 13 à 18 après la chirurgie	Semaines 19+ après la chirurgie
Critères d'entrée	- Autorisation médicale à commencer l'hydrothérapie - Plaie de chirurgie : absence de signes d'inflammation (douleur, rougeur, augmentation de la température, enflure) - Plaie de chirurgie : retrait des points de suture par une équipe médicale	- Douleur minimale (selon une échelle de gradation de la douleur) - Enflure minimale (absence ou traces) - Extension du genou jusqu'à 0° - Flexion du genou supérieure à 120° - Normalisation suffisante de la démarche en dehors de l'eau sans aide (c'est-à-dire sans béquilles) - Absence d'évidence de dysfonction du muscle quadriceps	- Absence de douleur et enflure - Amplitude du mouvement articulaire symétrique et complète - Indice de symétrie du membre inférieur pour la flexion et extension du genou supérieur à 80 % - Qualité du mouvement sur des exercices de base jugée subjectivement bonne (squats unilatéraux et bilatéraux, montée et descente de marches, fentes) - Capacité à courir sur tapis à sec à 8 km/h pendant 10 minutes avec une biomécanique correcte	- Être engagé dans le retour à l'entrainement sportif
Objectifs généraux du stade	- Support à la résolution de l'enflure - Récupération de l'amplitude du mouvement articulaire - Support au rétablissement du cycle de marche normal - Récupération précoce de la flexibilité	- Restauration des schémas moteurs de base - Introduction et utilisation de la course en eau profonde pour l'entrainement moteur et le conditionnement cardiovasculaire - Récupération tardive de la flexibilité - Récupération de l'amplitude du mouvement articulaire - Introduction progressive des atterrissages et sauts bilatéraux et unilatéraux pour le	- Exercices pliométriques de haute intensité - Mouvements techniques spécifiques du sport - Conditionnement physique	- Accélérer la récupération entre les sessions d'entrainement sur le terrain et en salle - Permettre de réduire le taux de mise en charge des structures anatomiques lors de l'entrainement, avec des exercices pliométriques et de conditionnement cardiovasculaire à charge réduite

		développement du contrôle fonctionnel excentrique (à 10 semaines et plus) - Exercices spécifiques du sport pour la neuroplasticité (coup de tête, lancer, attraper)		
Exercices aquatiques	Marche, vélo, étirements, schémas moteurs de base (par exemple : exercices de marche sur place)	- Semaines 5 à 8 : course en eau profonde, montée et descente de marches, exercices d'équilibre debout et de contrôle neuromusculaire, exercices de renforcement fonctionnel - Semaines 9 à 12 : Introduction des exercices d'atterrissage et saut pour le contrôle neuromusculaire	- Course dans l'eau pour le conditionnement à faible charge - Exercices pliométriques - Exercices de coordination pour la préparation au terrain	- Course en eau profonde - Exercices pliométriques - Étirements statiques et dynamiques
Activités en dehors de la piscine	<u>En salle :</u> - Exercices de renforcement isométrique sur le lit - Exercices de travail de l'amplitude du mouvement articulaire - Massages, application de glace, compression, élévation, neurostimulation électrique transcutanée	<u>En salle :</u> *Semaines 5 à 8 : - Exercices d'entrainement en résistance avec de faibles charges pour le travail de l'endurance musculaire (10 à 20 répétitions maximum) - Travail des muscles du tronc - Exercices de contrôle moteur (squats bilatéraux, marche sur tapis à sec) - Conditionnement cardiovasculaire (vélo, rameur) *Semaines 9 à 12 : - Progression vers des exercices fonctionnels sur terre (squats sur une jambe, montée et descente de marches, fentes statiques, *hip hinge*) - Exercices de renforcement lombo-pelvien (*standing clam*, déplacements latéraux avec un élastique au niveau des cuisses) - Entrainement en résistance à charge modérée avec exercices en chaîne cinétique ouverte et fermée pour le développement de la force (8 à 12 répétitions maximum) - Rééducation à la course avec un tapis de course antigravité, un trampoline ou un tapis à sec	<u>En salle :</u> - Exercices isolés de renforcement du bas du corps à forte charge (3 à 6 répétitions maximum) - Exercices de renforcement fonctionnel du bas du corps (8 à 12 répétitions maximum) - Exercices d'atterrissage et de saut - Travail de la force et stabilité du tronc - Exercices de pliométrie bilatérale <u>Sur le terrain :</u> - Course en ligne vers l'avant et sur le côté - Exercices de saut et atterrissage - Accélérations et décélérations linéaires - Exercices de course dans toutes les directions	<u>En salle :</u> - Exercices isolés de renforcement du bas du corps à forte charge - Exercices de renforcement fonctionnel du bas du corps - Exercices d'atterrissage et de saut - Travail de la force et stabilité du tronc - Renforcement du haut du corps et travail de la capacité aérobie sur les jours de récupération <u>Sur le terrain :</u> - Exercices d'agilité multidirectionnels - Entrainement spécifique au sport - Exercices pliométriques

<u>Annexe 3</u> : Caractéristiques des principaux tapis immergés présents sur le marché au niveau européen et international, source : Delacharlerie Aurore.

<table>
<tr><th colspan="4">Tapis immergés</th></tr>
<tr><td rowspan="6">AquaPacer
by Hudson/Ferno</td><td rowspan="4">Caractéristiques</td><td colspan="2"><u>Température</u> : depuis la température ambiante jusqu'à 40 °C</td></tr>
<tr><td colspan="2"><u>Hauteur d'eau</u> : Jusqu'à 1,2 m, soit ~ 3 000 L d'eau</td></tr>
<tr><td colspan="2"><u>Vitesse</u> : 1,6 à 8 km/h</td></tr>
<tr><td colspan="2"><u>Inclinaison</u> : 0</td></tr>
<tr><td colspan="4"><u>Dimensions</u> :
Pour l'ensemble de la machine :
- Longueur avec les rampes d'accès = 5,5 m
- Largeur avec les plateformes pour l'entraineur = 2 m
- Hauteur depuis le sol = 1,6 m
- Hauteur depuis le tapis = 1,35 m

Chambre d'exercice :
- Longueur = 3,7 m
- Largeur = 65 cm au fond et 90 cm au sommet
- Hauteur = 1,35 m

Tapis de course = 61 x 325 cm</td></tr>
<tr><td colspan="4">- Tapis hors sol.
- En acier inoxydable.
- Ecran tactile de contrôle.
- Fenêtres transparentes pour l'observation du cheval à l'avant, à l'arrière et sur 1 côté pour AquaPacer (vision à 180°), sur 2 côtés pour AquaPacer Plus (vision à 360°).
- Système d'eau froide salée optionnel pour AquaPacer Plus, avec des jets d'air créant des turbulences (augmente la concentration d'oxygène dissous dans l'eau favorisant le processus de cicatrisation, et effet massage qui augmente la pénétration du froid).
- Mécanisme d'urgence : évacuation de l'eau en 23 secondes.</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Gestion de l'eau</td><td colspan="2" rowspan="2">Deux systèmes de stockage de l'eau, choisis en fonction de l'espace disponible.
La cuve est installée à côté du tapis sur le sol ou éventuellement dans une pièce séparée pour l'AquaPacer Plus.</td><td>Cuve de 3 800 L verticale : espace disponible limité.
Dimensions = 234 x 102 x 229 cm
Poids = 195 kg vide, 4 000 kg pleine</td></tr>
<tr><td>Cuve de 3 900 L horizontale : espace occupé supérieur, mais permet la bascule de la cuve pour un drainage par gravité par le fond, rendant le nettoyage plus facile.
Dimensions = 363 x 165 x 152 cm
Poids = 240 kg vide, 4 020 kg pleine</td></tr>
<tr><td colspan="3">- Recyclage de l'eau avec pompes de drainage.
- Filtre à ozone en supplément.
- Remplissage et drainage en environ 5 min.</td></tr>
<tr><td>Indications</td><td colspan="3">Réhabilitation :
- Intervention plus rapide et temps de rétablissement plus court.
- Amélioration de la circulation, diminution de l'inflammation, contrôle de la charge portée.</td></tr>
</table>

AquaPacer by Hudson/Ferno		- Affections principalement prises en charge : *AquaPacer Plus Cold Saltwater*, **AquaPacer Ambient/Warm Water :** ***Mauvaise circulation, éparvin, maladie dégénérative des articulations, fatigue, fractures et chips, inflammation, seime, luxation, chirurgies orthopédiques, osselet, ostéochondrose disséquante, arthrite septique, ostéophytose périarticulaire, périostite métacarpienne, inflammation des jarrets,*** *œdème osseux, hygroma de la pointe du coude ou du jarret, cellulite*, **myéloencéphalite équine à protozoaires, déséquilibres d'allure**, **hématome ou gonflement musculaire**, *abcès, contusion de la sole, atteinte de l'articulation interphalangienne distale, infection associée au ferrage thérapeutique, fourbure,* **atrophie musculaire, contusion musculaire**, *syndrome naviculaire, pousse insuffisante du sabot, inflammation post-exercice des membres inférieurs, rougeurs ou irritations cutanées, rigidité et douleur, élongation ou déchirure du ligament suspenseur, tendinite*, *myosite d'effort, tares molles.*
		Entrainement pour toutes disciplines et niveau d'activité : endurance, force musculaire (épaules, arrière-main, ligne du dos).
		Préparation à la compétition.
		Bien-être, amélioration de l'assurance et du tempérament.
	Installation	L'acheteur doit avoir obtenu les autorisations, fournir un emplacement adapté avec un sol plat, à température empêchant le gel, se procurer un chariot élévateur, avoir mis en place les canalisations d'eau nécessaires, une source d'électricité de 230 VAC, 1 Phase, 60 Hz, 50 Amp.
	Entretien	Non renseigné.
	Garanties	- **Garantie d'un an**. - **Installation et service d'accompagnement inclus**. - **Assistance pour la gestion de l'eau, et problèmes de maintenance**. - **Partenariat avec *Unbridled Equine*** pour offrir un **service de formation à l'utilisation des tapis immergés et à la construction de programmes d'entrainement**, ou de **conseils pour l'investissement dans un tel produit et la gestion de l'entreprise associée**.
	Prix	Non renseigné.
	Marché	Non renseigné.
	Contacts	**Hudson Aquatic Systems LLC** 1100 Wohlert St, Angola, Indiana 46703, United States Ventes et Services (Lundi au Vendredi, 8 à 17 heures) : 260-665-1635 Service de support uniquement, en dehors des heures d'ouverture : 260-316-3938 info@hudsonaquatic.com
	Remarques	**Webinar** https://www.hudsonaquatic.com/webinar/equine/ **Études de cas :** https://www.hudsonaquatic.com/why-water/case-studies/ - Cite le *Consensus for the General Use of Equine Water Treadmills for Healthy Horses*, 2019. - Exemple de prise en charge d'une fracture spiralée du radius chez un cheval de polo. - Exemple de prise en charge d'une fracture du jarret chez un cheval de *Western Pleasure.* - Exemple de remise en condition après mise au repos suite à une infection par le virus influenza équin (grippe équine). - Exemple de maintien du niveau d'activité pendant l'hiver chez l'athlète équin. - Exemple d'un programme d'entrainement associant travail en marcheur ou en main et tapis immergé chez trois chevaux de dressage avec déficit musculaire et irrégularité de mobilité des antérieurs, et volonté de renforcer la ligne du dos, résultant en un renforcement musculaire généralisé et une amélioration de l'amplitude du mouvement des quatre membres. ⇨ **L'utilisation d'un tapis immergé et des propriétés physiques de l'eau permet d'obtenir de meilleurs résultats que des exercices de réhabilitation sur terre, en moitié moins de temps.**

Horse-Trainer HORSE-TRAINER WATER	**Caractéristiques**	Température : Non renseigné.
		Hauteur d'eau : **Jusqu'à environ la hauteur de l'épaule**
		Vitesse : **0 à 11 km/h**
		Pente : **inclinaison jusqu'à 11 degrés**
		Dimensions : Pour **l'ensemble de la machine** : - Longueur = 6,4 m avec les rampes d'accès, et 4 m sans - Largeur = 1,6 m - Hauteur = 2,2 m
		- Tapis hors sol. - En acier inoxydable. - Contrôle par ordinateur à la tête du cheval. - 10 programmes pré-installés. - Jusqu'à 100 programmes individuels peuvent être enregistrés. - Fenêtres transparentes à 360°. - Mécanismes d'urgence : 3 boutons d'arrêt d'urgence, une cellule photoélectrique qui permet l'arrêt du tapis si le cheval trébuche.
	Gestion de l'eau	- Remplissage et drainage en environ 5 min.
	Indications	« Des tests internationaux de cette méthode d'entrainement alternative ont montré que c'est une solution optimale pour une mise en forme rapide, une performance améliorée, un maintien correct et une allure équilibrée, de même elle améliore la fonction cardiaque, favorise le développement musculaire et améliore la souplesse. Des mesures supplémentaires ont montré qu'une rééducation à l'aide d'un tapis roulant aquatique **réduit le temps de guérison de 50 à 60 %.** »
	Installation	Voltage = 3 x 400 VAC + N + PE 50Hz. Ampérage = 16 A.
	Entretien	Non renseigné.
	Garanties	Non renseigné.
	Prix	Non renseigné.
	Marché	Revendeurs au Danemark, en Suède, en Norvège, en France, en Allemagne, en Suisse, à Maltes, en Finlande, aux Etats-Unis, en Nouvelle-Zélande, en Afrique du Sud, en République Tchèque.
	Contacts	**Centrale – Horse trainer** Bygmarken 5, 3520 Farum, Danemark +45 40 44 94 00 ht@horse-trainer.dk **Distributeur en France** **PM Environnement**, François Perier 61 500 Aunou sur Orne, France +33 789053524 contact@pm-environnement.fr
	Remarques	**Études de cas** : Non renseigné. ⇨ Le HORSE-TRAINER WATER fournit le même avantage qu'une piscine, en permettant la réduction des forces d'impact, tout en conservant une position semblable à celle adoptée sur terre. Cela signifie que les muscles, tendons, et ligaments sont travaillés et renforcés de la même manière que sur terre, mais sans les forces d'impact.

Aqua equine treadmill	**Caractéristiques**	Température : refroidissement possible **jusqu'à 4 °C**
		Hauteur d'eau : ajustable (pas de précisions supplémentaires)
		Vitesse : ajustable (pas de précisions supplémentaires)
		Inclinaison : 0
		Dimensions : Non renseignées
		- Tapis **hors sol**. - Poids = 6 800 kg. - En acier inoxydable. - Ecran tactile de contrôle. - Fenêtres transparentes à 360°. - **Utilisation possible avec du sel**.
	Gestion de l'eau	- Cuve d'eau sous le sol. - Volume de 8 300 L. - Localisée jusqu'à 36,5 m du tapis immergé. - Système de refroidissement = 10 CV – 40 kW. - Système de chauffage au niveau de la cuve et de la tuyauterie pour éviter le gel dans les régions au climat froid.
		- Système de double filtration. - Remplissage en 3 min et drainage en 2 min. - Réutilisation de l'eau.
	Indications	Pour toutes disciplines : amélioration des performances, renforcement musculaire et cardiaque, amélioration de la réhabilitation, et stimulation mentale.
	Installation	Fourni avec sa propre source d'énergie (groupe électrogène). Installation en 2 jours.
	Entretien	Tous les ans.
	Garanties	- **Garantie d'un an**. - **Formation à l'utilisation pendant 2 jours après l'installation**.
	Prix	Non renseigné.
	Marché	Fabriqué en Irlande et aux Etats-Unis. Clients aux Etats-Unis, en Angleterre, Irlande, et Pays-Bas.
	Contacts	**Mr. Rory Deane**, fondateur et président directeur général Europe : +353 (0)872355454 États-Unis : 3524336515 deane.rory@gmail.com
	Remarques	Capacité : 25 à 30 chevaux par jour. **Études de cas** : Maintien de l'activité des étalons pendant l'hiver en prévision de la saison de reproduction (Programme Darley).

<table>
<tr><td rowspan="11">FMBs Activo-Med – Aqualine</td><td rowspan="5">Caractéristiques</td><td>Température : Non renseigné</td></tr>
<tr><td>Hauteur d’eau : Non renseigné</td></tr>
<tr><td>Vitesse : Non renseigné</td></tr>
<tr><td>Inclinaison : Non renseigné</td></tr>
<tr><td>Dimensions :
Pour l’ensemble de la machine :
- Longueur avec les rampes d’accès = 5,5 m
- Largeur avec plateformes pour l’entraineur = 2 m
- Hauteur depuis le sol = 1,6 m
- Hauteur depuis le tapis = 1,35 m

Chambre d’exercice :
- Longueur = 3,7 m
- Largeur = 65 cm au fond et 90 cm au sommet
- Hauteur = 1,35 m

Tapis de course = 61 x 325 cm</td></tr>
<tr><td>- Tapis hors sol ou sous le niveau du sol.
- En acier inoxydable.
- Fenêtres transparentes à 360°.
- Système d’eau froide salée optionnel, avec jets.</td></tr>
<tr><td>Gestion de l’eau</td><td>Non renseigné.</td></tr>
<tr><td>Indications</td><td>Pour la rééducation et dans le cadre d’un entrainement visant à améliorer la souplesse, la longueur de foulée, le tonus et la force musculaires pour la performance et réduire les risques de blessure.</td></tr>
<tr><td>Installation</td><td>Non renseigné.</td></tr>
<tr><td>Entretien</td><td>Non renseigné.</td></tr>
<tr><td>Garanties</td><td>- Système de conseils pour l’installation.
- Dr Matthias Baumann assure une formation continue et un soutien aux nouveaux collaborateurs, et des cours de perfectionnement.</td></tr>
<tr><td>Prix</td><td>Non renseigné.</td></tr>
<tr><td>Marché</td><td>Non renseigné.</td></tr>
<tr><td>Contacts</td><td>Therapy Systems FMBs
Pyatts Farm Lane, Lane End, Bucks HP14 3NW, United Kingdom
+44 (0) 1494 883433
+44 (0) 7885 539312
info@fmbs.co.uk

Distributeur en France
Horsefeed distributeur de performance, Franck Jouvin
5 rue de la rivière 72320 Vibraye, France
+33 665902340
+33 244325001
contact@horsefeed.eu</td></tr>
<tr><td>Remarques</td><td>Études de cas : Non renseigné.
Prend moins d’espace qu’une piscine, et l’entretien est plus facile, économique, et écologique.
Possibilité d’achat de produits de seconde main.</td></tr>
</table>

<table>
<tr><td rowspan="10">Formax – Aqua Icelander
AQI 3100
AQI 3800</td><td rowspan="4">Caractéristiques</td><td colspan="2">Température : Non renseigné</td></tr>
<tr><td colspan="2">Hauteur d’eau : Jusqu’à 1,2 m</td></tr>
<tr><td colspan="2">Vitesse : Non renseigné</td></tr>
<tr><td colspan="2">Inclinaison : 0 à 10 %</td></tr>
<tr><td>Dimensions AQI 3100
Pour l’ensemble de la machine :
- Longueur = 6,52 m avec les rampes d’accès, et 4,12 m sans
- Largeur avec plateformes pour l’entraineur = 1,79 m
- Hauteur depuis le sol = 1,82 m
- Hauteur depuis le tapis = 1,45 m

Chambre d’exercice :
- Longueur = 3,1 m
- Largeur = 82 cm
- Hauteur = 1,44 m

Poids = 1 480 kg</td><td>Dimensions AQI 3800
Pour l’ensemble de la machine :
- Longueur = 7,22 m avec les rampes d’accès, et 4,92 m sans
- Largeur avec plateformes pour l’entraineur = 1,88 m
- Hauteur depuis le sol = 1,92 m
- Hauteur depuis le tapis = 1,55 m

Chambre d’exercice :
- Longueur = 3,8 m
- Largeur = 1 m
- Hauteur = 1,54 m

Poids = 1 780 kg</td></tr>
<tr><td colspan="2">- Tapis hors sol.
- En acier inoxydable.
- Ecran tactile de contrôle.
- Fenêtres transparentes à 360°.
- Système d’eau salée optionnel.
- Jusqu’à 200 programmes individuels peuvent être installés.
- Mécanisme d’urgence : un faisceau lumineux à l’extrémité du tapis permet de détecter la position du cheval et d’arrêter la machine si le cheval le dépasse.</td></tr>
<tr><td>Gestion de l’eau</td><td colspan="2">- 2 pompes avec des filtres en acier inoxydable.
- Filtre à sable automatique permettant un recyclage et une réutilisation de l’eau.
- Lampe à rayon UV-C permettant un assainissement de l’eau.
- Contrôle automatique du pH et du chlore.
- Unité de refroidissement et de chauffage de l’eau.
- Remplissage en environ 5 min.</td></tr>
<tr><td>Indications</td><td colspan="2">Complément pour l’entrainement (endurance, force musculaire notamment du dos et de l’arrière-main, équilibre et coordination des mouvements) et la réhabilitation des chevaux de sport de toutes disciplines.</td></tr>
<tr><td>Installation</td><td colspan="2">Non renseigné.</td></tr>
<tr><td>Entretien</td><td colspan="2">Non renseigné.</td></tr>
<tr><td>Garanties</td><td colspan="2">Non renseigné.</td></tr>
<tr><td>Prix</td><td colspan="2">Non renseigné.</td></tr>
<tr><td>Marché</td><td colspan="2">Présents en Scandinavie, Europe, Russie, Australie, Etats-Unis, Canada, Pérou, Chili, Afrique du Sud, Arabie Saoudite.</td></tr>
<tr><td>Contacts</td><td colspan="2">Formax
Gegnisholapartur 801 Selfoss, Islande
+354 562 6800
info@formax.is</td></tr>
<tr><td>Remarques</td><td colspan="2">Vidéo explicatives :</td></tr>
</table>

		- Dos : différents axes de mouvement (rotation axiale, flexion pelvienne, flexion latérale), et influence d'une eau à hauteur du carpe pour la gestion des douleurs de dos. - Problèmes articulaires. - Effet d'un entrainement à haute hauteur d'eau. - Effet de la combinaison de l'inclinaison et de la hauteur d'eau : augmentation du travail musculaire de l'arrière-main jusqu'à 3 fois par rapport au travail sur sol sec plat. **Études de cas** : Non renseigné.
Horse Gym – Aquatrainer **AquatrainerW2** **AquatrainerW2T1** **AquatrainerW3** **AquatrainerW3T1**	**Caractéristiques**	Température : Non renseigné Hauteur d'eau : **Jusqu'à 1 m** (W2, W2T1) / **Jusqu'à 1.2 m** (W3, W3T1) Vitesse : jusqu'à 10 km/h W2 et W3, 18 km/h W2T1 et W3T1 Inclinaison : Non renseigné Dimensions : Pour **l'ensemble de la machine** : - Longueur avec les rampes d'accès = 6 m - Largeur avec plateformes pour l'entraineur = 2,3 m - Hauteur depuis le sol = 2 m Poids = 2 000 kg
		- Tapis **hors sol** ou **sous le sol**. - En acier inoxydable. - Modèles sans fenêtres transparentes. - Régulation de la hauteur d'eau par 10 cm. - **Système d'eau salée optionnel**. - Mécanisme d'urgence : cellule photoélectrique qui permet l'arrêt automatique du tapis lorsque le cheval la dépasse.
	Gestion de l'eau	Cuve de 4 000 L.
		- Autonettoyage, filtre avec faible maintenance. - Recyclage de l'eau.
	Indications	En complément de l'entrainement, réhabilitation après une opération ou lésion d'un tendon, traitement de problèmes de dos, bien être du cheval.
	Installation	Source d'énergie : 5 kW, 380 V. Accessoires optionnels : contrôle de la fréquence cardiaque, revêtement de résistance au sel, unité de refroidissement et de chauffage, plateforme pour l'entraineur, unité de stérilisation additionnelle, une cuve de 6 000 L ou une autre de 4 000 L, un écran tactile de contrôle. Livraison et installation en Europe.
	Entretien	- Cycle de nettoyage du tapis une fois par jour (vidéo explicative disponible). - Vérifier la tension du tapis une fois par semaine. - Vérifier l'absence de déchirure ou de trous sur le tapis une fois par mois. - Lubrification des mécanismes une fois par semaine. - Vérifier l'absence de fuite d'huile moteur une fois par mois. - Vérifier les composants hydrauliques tous les 6 mois. - Nettoyer la cellule photoélectrique une fois par semaine et vérifier l'intégrité de son câble une fois par mois. - Nettoyer la pompe et les filtres une fois par semaine. - Vérifier les valves d'évacuation une fois par semaine. - Vérifier la tuyauterie et rechercher la présence de fuites une fois par mois. - Lubrifier les portes d'entrée et sortie une fois par mois.

<table>
<tr><td rowspan="5"></td><td>Garanties</td><td colspan="5">Garantie de 2 ans.</td></tr>
<tr><td>Prix</td><td colspan="5">Non renseigné.</td></tr>
<tr><td>Marché</td><td colspan="5">Non renseigné.</td></tr>
<tr><td>Contacts</td><td colspan="5">Horse Gym 2000 GmbH
CEO Siegfried Mitzel
Grobsorheimer Langgasse 18, D-86655 Harburg-Grobsorheim, Allemagne
+49 (0) 90 80 – 92 22 99
info@horse-gym-2000.de

Distributeur en France
PM Environnement, François Perier
61 500 Aunou sur Orne, France
+33 789053524
contact@pm-environnement.fr</td></tr>
<tr><td>Remarques</td><td colspan="5"><u>Études de cas :</u>
- Entrainement de 12 jeunes chevaux avec un tapis sec.
- Vidéo montrant l’évolution de la conformation musculaire chez un cheval après 14 jours d’utilisation de l’Aquatrainer (pas de précisions).</td></tr>
<tr><td colspan="6"></td></tr>
<tr><td rowspan="8">HydroHorse equine treadmill

Model 101A
Model 201
Model 1000 Superior
Model HydroCiser
Model Stainless Steel HydroCiser</td><td rowspan="4">Caractéristiques</td><td colspan="5"><u>Température</u> : Non renseigné</td></tr>
<tr><td colspan="5"><u>Hauteur d’eau</u> : 1,5 m (101A)</td></tr>
<tr><td colspan="5"><u>Vitesse</u> : Jusqu’à 18 km/h (1000 Superior)</td></tr>
<tr><td colspan="5"><u>Inclinaison</u> : Non renseigné</td></tr>
<tr><td><u>Dimensions 101A</u>
- Couloir de 14 m de long
- Tapis de course = 3 m de longueur</td><td><u>Dimensions 201</u>
- Couloir de 16,5 m de long
- Tapis de course = 3 m de longueur</td><td><u>Dimensions 1000 Superior</u>
- Couloir de 17 m de long
- Tapis de course = 3,6 m de longueur</td><td><u>Dimensions HydroCiser</u>
Ensemble de la machine :
- Longueur = 3,6 m
- Largeur = 1 m à l’intérieur du caisson, 1,4 m depuis l’extérieur
- Hauteur = 2,1 m</td><td colspan="2"><u>Dimensions Stainless Steel HydroCiser</u>
Ensemble de la machine :
- Longueur = 3,6 m
- Largeur = 1 m à l’intérieur du caisson, 1,4 m depuis l’extérieur
- Hauteur = 1,8 m</td></tr>
<tr><td><u>101A</u>
- Tapis sous le niveau du sol.
- En fibre de verre.
- Jets.</td><td colspan="2"><u>201 / 1000 Superior</u>
- Tapis sous le niveau du sol.
- Jets.</td><td colspan="2"><u>HydroCiser / Stainless Steel HydroCiser</u> (en acier inoxydable)
- Tapis hors sol.
- Inclus bain à remous avec 16 jets.
- Unité de refroidissement et chauffage de l’eau.
- Ecran de contrôle numérique.
- En cas d’urgence : valve de drainage.</td></tr>
<tr><td>Gestion de l’eau</td><td colspan="5">Cuve de 9 500 L (HydroCiser et Stainless Steel HydroCiser).
Système de filtration de l’eau avec du sable :
- Avec 2 filtres, option 3 filtres disponible (101A et 201).
- Avec 3 filtres (1000 Superior).</td></tr>
<tr><td>Indications</td><td colspan="5">Méthode d’entrainement qui limite les lésions.
Gestion thérapeutique rapide et sûre du cheval blessé.</td></tr>
<tr><td>Installation</td><td colspan="5">Moteur 10 CV (101A, 201) / 20 CV (1000 Superior).
208-220 V 100 A (HydroCiser et Stainless steel HydroCiser).</td></tr>
<tr><td>Entretien</td><td colspan="5">Non renseigné.</td></tr>
</table>

	Garanties	Non renseigné.	6 mois de garantie sur toutes les pièces sauf le tapis et les tuyaux à air comprimé qui sont garantis 90 jours à partir de l'installation.
	Prix	Non renseigné.	
	Marché	Non renseigné.	
	Contacts	**HydroHorse – Equine Treadmill Systems** PO Box 1034, Merrill, Oregon 97633, United States 541-798-0110 sturner@horsetreadmills.com	
	Remarques	**Études de cas** : Non renseigné.	
Hippocenter – Protrainer Water HIPPOCENTER SINCE 2008	**Caractéristiques**	Température : **Entre 5 et 8 °C**	
		Hauteur d'eau : **Jusqu'à 1,2 m**	
		Vitesse : **Jusqu'à 11 km/h**	
		Inclinaison : **Jusqu'à 10 %**	
		Dimensions : Pour **l'ensemble de la machine** : - Longueur avec les rampes d'accès = 7 m - Largeur = 1,7 m - Hauteur depuis le sol = 2,6 m Poids = 2 400 kg	
		- Tapis **hors sol**. - En acier inoxydable. - Ecran tactile de contrôle. - Jusqu'à 100 programmes individuels. - Fenêtres transparentes à 360°. - **Système d'eau froide salée optionnel**.	
	Gestion de l'eau	Système de filtration à triple action, l'eau du Protrainer Water est filtrée à l'entrée et à la sortie de la machine : elle passe par un filtre à sable pour les grosses particules, un filtre à charbon pour les plus petites et enfin une lampe UV permettant la destruction des germes et bactéries.	
	Indications	Dans le développement et le renforcement musculaire : prise de masse plus rapide qu'un simple entrainement. Dans la rééducation et la remise en forme : réduire le poids sur les membres et développer les muscles de sorte à soulager les tendons et les articulations.	
	Installation	Non renseigné.	
	Entretien	Non renseigné.	
	Garanties	- Garantie de 2 ans. - Installation et formation possible. - Assistance téléphonique 7j/7.	
	Prix	Non renseigné.	
	Marché	Non renseigné.	
	Contacts	**Hippocenter** Rue aux Vaches, 14 490 Saint Paul du Vernay, France +33 (0)2 31 92 31 96 contact@hippocenter.fr	

	Remarques	**Études de cas** : Non renseigné. Diminution du temps de récupération jusqu'à 50 %.
Physiotech	**Caractéristiques**	Température : Non renseigné
		Hauteur d'eau : **Jusqu'à 1,6 m**
		Vitesse : **jusqu'à 45 km/h**
		Inclinaison : **jusqu'à 15%**
		Dimensions : - **Tapis de course** = largeur de 110 cm
		- Tapis **hors sol**. - Fenêtres transparentes à 360°. - Mécanisme d'urgence, avec détection et arrêt en cas de chute.
	Gestion de l'eau	Cuve de 12 000 L.
		- Système de filtration intégré. - Filtre UV supplémentaire optionnel.
	Indications	Augmentation ciblée de la masse musculaire et de l'endurance. Réhabilitation et prévention.
	Installation	Le tapis doit être installé dans une salle hors gel d'au moins 12 x 8 m (idéalement 15 x 10 m).
	Entretien	Après chaque utilisation, la cartouche de filtration doit être rincée à l'eau chaude et savonneuse. A la fin de la journée, enlever la saleté résiduelle sur le tapis et les parois à l'aide d'un aspirateur humide. A la fin de chaque semaine d'utilisation, nettoyage de la machine avec un produit ménager permettant la dissolution des graisses, et anti-calcaire, pendant environ 30 minutes. Tous les un à deux mois, un grand nettoyage d'environ 1 heure est conseillé. Pour l'élimination des algues de la tuyauterie, leur nettoyant *AlgenStopp SPEZIAL* est recommandé. Il doit être appliqué toute la nuit tous les 2 à 3 mois, suivi d'un rinçage abondant. La **maintenance** est conseillée tous les 2 à 4 ans selon la fréquence d'utilisation.
	Garanties	Non renseigné.
	Prix	Non renseigné.
	Marché	Non renseigné.
	Contacts	**PHYSIO-TECH GmbH** **Speckenbeker Weg 130 a, 24113 Kiel, Allemagne** **+49 (0) 431 535 502-0** info@physio-tech.com
	Remarques	**Études de cas** : Non renseigné.

ECB Aquatreadmill	**Caractéristiques**	Température : refroidissement possible **jusqu'à 7 °C**
		Hauteur d'eau : **Jusqu'à 1 m**
		Vitesse : **jusqu'à 12 km/h**
		Inclinaison : **0 à 12 %**
		Dimensions : Pour **l'ensemble de la machine** : - Longueur avec les rampes d'accès = 7,6 m - Largeur avec plateformes pour l'entraineur = 2,7 m - Hauteur depuis le sol = 2 m **Chambre d'exercice** : - Longueur = 4,5 m - Largeur = 2,3 m - Hauteur = 1,6 m **Poids** = 2 200 kg
		- Tapis **hors sol**. - En acier inoxydable. - Ecran tactile de contrôle. - Jusqu'à 100 programmes individuels. - Fenêtres transparentes à 360°. - **Système d'eau salée optionnel** : la concentration est choisie par le client. - Système de réfrigération optionnel. - Mécanisme d'urgence : retrait rapide des barres arrière et de poitrail, bouton d'arrêt d'urgence, un faisceau lumineux à l'extrémité du tapis permet de détecter la position du cheval et d'arrêter la machine si le cheval le dépasse, et un système d'ouverture et fermeture des portes facile. - Balance intégrée optionnelle.
	Gestion de l'eau	2 cuves de 3 000 L : 2,5 m de hauteur et 0,9 m de rayon chacune, 60 kg chacune. Pompe : 2,4 m de hauteur et 1 m de largeur, 450 kg.
		- Système de filtration autonettoyant : filtre à tambour intégré (avec UV), filtre à cartouche et filtre UV séparé. - Utilisation possible de harnais pour la collection des crottins. ⇨ permet un recyclage de l'eau jusqu'à 6 semaines. - Remplissage et drainage rapide : 2,5 min pour atteindre 60 cm.
	Indications	Environnement contrôlé pour la **rééducation** lors de lésions au niveau de la **colonne vertébrale ou des extrémités**. Par exemple : œdème suite à une contusion ou lymphangite, lésions articulaires chroniques et arthrite afin de réduire l'inflammation et augmenter l'amplitude du mouvement, conflit des processus épineux. Amélioration de l'endurance, augmentation de la masse musculaire, de l'amplitude des mouvements articulaires, de la stabilité du tronc, de l'équilibre et de la coordination.
	Installation	L'installation est prise en charge par la compagnie. Alimentation électrique : mono ou triphasée.
	Entretien	La maintenance est conseillée tous les 2 ans. Nettoyer les filtres quotidiennement.
	Garanties	- Garantie de 2 ans. - Une formation de l'acheteur à l'utilisation du tapis est comprise.
	Prix	Environ 170 000 euros hors taxes.
	Marché	Local et international (sans précisions).

	Contacts	**ECB EQUINE HEADQUARTERS – Angleterre et reste du monde** Bourton Hill Farm, Bourton on the Water Cheltenham, Gloucestershire, GL54 2LF UK +44 (0)1451 822969 Richard Norden / richard@equinespa.com
	Remarques	Diagnostics à distance, manuels d'utilisation et guides vidéo de maintenance fournis. Harnais pour la collection des crottins et collecteur de déjections inclus. Affichage et enregistrement de la fréquence cardiaque en temps réel, en fonction de la hauteur d'eau, de la vitesse et de l'inclinaison (optionnel). **Études de cas** : non réalisées.
Equine Aquatrainer – Sascotec	**Caractéristiques**	Température : refroidissement **jusqu'à 4 °C** (optionnel)
		Hauteur d'eau : **Jusqu'à 1,35 m**
		Vitesse : **jusqu'à 10 km/h**
		Inclinaison : de **-1 jusqu'à 12 %** (optionnel)
		Dimensions : **Chambre d'exercice** : - Longueur = 3,95 m - Largeur = 90 cm - Hauteur = 1,4 m
		- Tapis **hors sol**. - En acier inoxydable. - Ecran tactile de contrôle. - Fenêtre transparente latérale optionnelle. - **Système d'eau salée optionnel**. - *Dynamic Forest Floor* : absorption des chocs. - Poids ~ 3000 kg. - Jets d'eau optionnels. - Balance intégrée optionnelle.
	Gestion de l'eau	4 systèmes de gestion de l'eau sont proposés, permettant plus ou moins d'économie d'eau : approvisionnement d'eau à partir d'un puits ou d'une cuve (fournie ou non selon le système choisi). - Système 1 et 2 (non économique) : cuve non fournie, renouvellement de l'eau à chaque cheval, pour une utilisation : entre 720 L (hauteur d'eau de 20 cm) et 1 800 L (hauteur d'eau de 50 cm), et filtre kaki pour la filtration des eaux usées. - Système 3 (économique) : approvisionnement en eau par un puits ou l'eau de ville, présence d'un réservoir à entonnoir de 5 000 L, un filtre kaki pour une filtration grossière de l'eau du système, et l'eau peut être réutilisée. - Système 4 (le plus économique) : réutilisation de l'eau, présence d'un réservoir d'eau sale (7 000 L), et d'un réservoir utilitaire à entonnoir (5 000 L), système de filtration avec un filtre multicouche vortex permettant une filtration fine des particules, et un filtre UV pour l'élimination des germes.
	Indications	Augmentation de la masse musculaire, amélioration de l'endurance, de l'équilibre, de la condition cardio-respiratoire. Bien être et détente, relâchement des tensions, diminution de la douleur. Rééducation.
	Installation	La pièce doit faire au moins 9 m de long, 4 m de large et 3 m de haut. L'acheteur doit fournir la source d'eau (possible d'utiliser l'eau courante, un puits, l'eau de pluie). 2 pompes à eau de 50m^3/h avec tuyauterie et vannes. Puissance électrique 400 V / 32 A.

Equine Aquatrainer – Sascotec		Fourni sans rampes d'accès (en option).
	Entretien	Développés sans huile et sans lubrification, les paliers de roulements et de l'entrainement ne demandent aucun entretien, et rendent impossible la contamination de l'eau par l'huile.
	Garanties	- **Garantie de 5 ans**. - **Formation à l'installation, puis possible ultérieurement sur place ou dans le centre de rééducation SASCOTEC**.
	Prix	Location à partir de 1 500 euros / mois.
	Marché	Non renseigné.
	Contacts	**Sandmann Innovation GmbH** Gewerbestr. 10, 49777 Klein Berssen 0 59 65 - 94 98 203 info@sascotec.de **Distributeur en France** **Cheval Habitat** Parc Unicom, 8 rue Antoine Lavoisier, 57970 BASSE-HAM (France) +33 (0)3 82 88 34 42
	Remarques	**Études de cas** : Non renseigné.

<u>Annexe 4</u> : Protocoles des différentes études sur l'utilisation des tapis immergés chez le cheval, source : Delacharlerie Aurore.

Les résultats sont présentés par ordre chronologique de publication.

Études	Chevaux étudiés	Détails	Hauteurs d'eau évaluées	Vitesses évaluées
Voss, Mohr, et Krzywanek (2002)	n = 7 (Hanovrien, *Bayern*, *Holsteiner*) Âge = entre 4 et 15 ans	Niveau de condition physique différent entre les chevaux Échauffement de 5 min au pas, puis 20 min d'exercice à la vitesse et profondeur souhaitée, puis récupération de 5 min	- Tapis à sec - Carpe - Coude	- Pas (1,56 m/s) - Trot (2,9 m/s)
Nankervis, Thomas, et Marlin (2008)	n = 8 Âge = 12,5 ± 5.5 ans Taille au garrot = entre 142 et 168 cm Poids = 508 ± 65 kg	16 minutes de marche à trois températures d'eau : - 13°C - 16°C - 19°C Température ambiante entre 4 et 10°C	Articulation scapulo-humérale (épaule)	Vitesse de marche jugée confortable pour le cheval : entre 1,1 et 1,4 m/s
Scott *et al.* (2010)	n = 8 (*Thoroughbreds* et *Warmbloods* à l'entrainement) Âge = 8 ± 2 ans Taille au garrot = 167 ± 4,2 cm Poids = 563,4 ± 56,6 kg	Température de l'eau = 14°C	- Sabot (contrôle) - Articulation interphalangienne proximale - Carpe - Ulna	0,9 m/s
Borgia, Valberg, et Essen-Gustavsson (2010)	n = 5 (1 étalon Pur-sang arabe, 1 hongre Pur-sang arabe x *Quarter Horse*, 3 juments (1 *Paint Horse*, 1 *Thoroughbred*, and 1 *Quarter Horse* x Pur-sang arabe)) Âge = 6 ± 3,8 ans	Échauffement de 5 min au pas <u>Entrainement sur tapis immergé</u> : 5 jours/semaine pendant 4 semaines - semaine 1 : 5 min/jour - semaine 2 : 10 min/jour - semaine 3 : 15 min/jour - semaine 4 : 20 min/jour Avant et après les 4 semaines d'entrainement : test d'effort sur tapis à sec	Limite ventrale de l'abdomen	2 m/s

Lindner, Wäschle, et Sasse (2012)	n = 10 (*German Warmbloods*) Âge = 12,5 ± 7 ans Taille au garrot = 154 ± 8 cm Poids = 501 ± 74 kg	Acclimatation chaque jour sur une semaine pendant 20 min à vitesse croissante, et variation de la hauteur d'eau Échauffement et récupération à 1,6 m/s Température de l'eau = 20°C		
		7 chevaux : 3 tests d'exercice standardisé réalisés à 3 hauteurs d'eau. Pour chaque hauteur d'eau, 5 étapes de 5 min avec augmentation de la vitesse de 0,5 m/s 1 semaine entre chaque test, où le cheval est travaillé 20 min par jour sur le tapis immergé	- 10 % de la hauteur du garrot - 50 % de la hauteur du garrot - 80 % de la hauteur du garrot	- 3,5 m/s - 4 m/s - 4,5 m/s - 5 m/s - 5,5 m/s
		10 chevaux : 1 test d'exercice standardisé réalisé à 5,5 m/s avec 5 étapes de 5 min à différentes hauteurs d'eau	- 20 % de la hauteur du garrot - 35 % de la hauteur du garrot - 49 % de la hauteur du garrot - 63 % de la hauteur du garrot - 77 % de la hauteur du garrot	5,5 m/s
Mendez-Angulo *et al.* (2013)	n = 9 (8 *Quarter Horses* et 1 *Thoroughbred*) Âge = 8,1 ± 4.3 ans Taille au garrot = 150,1 ± 3,2 cm Poids = 486,6 ± 26,3 kg	6 sessions d'habituation, avec sédation légère à la xylazine si nécessaire sur les deux premières séances Température de l'eau non contrôlée (entre 15 et 21°C)	- < 1 cm d'eau (contrôle) - Boulet du membre postérieur (condyle latéral de l'aspect distal du métatarse III) - Tarse (centre du talus) - Grasset (au niveau du plateau tibial)	0,9 m/s
Mooij *et al.* (2013)	n = 12 (10 *Warmbloods*, 2 chevaux Baroque) Âge = 7,4 ± 2,1 ans Taille au garrot = 166 ± 8 cm	Entrainement 4 fois sur une période de 10 jours	- Région de la bande coronaire (contrôle) - Articulation du boulet - Carpe - Coude - Ligne médiane de l'épaule	0,8 m/s
Yarnell *et al.* (2014)	n = 8 Âge = 14 ± 5 ans Taille au garrot = 156,1 ± 8 cm	Exercice de 15 min pour chaque hauteur d'eau, sur trois jours consécutifs Température de l'eau à température ambiante de la pièce : environ 10°C	- Tapis à sec - Articulation interphalangienne proximale - Carpe	Vitesse de marche active jugée confortable pour le cheval : en moyenne 1,6 m/s

Firshman, Borgia, et Valberg (2015)	n = 5 (*Quarter Horses*) Âge = 7 ± 2 ans Poids = 526,9 ± 63,3 kg	<u>Entrainement sur tapis immergé ou tapis à sec (2 groupes)</u> : 5 jours/semaine pendant 8 semaines, augmentation d'1 min/j - semaine 1 : 16 à 20 min/jour - semaine 2 : 21 à 25 min/jour - semaine 3 : 26 à 30 min/jour - semaine 4 : 31 à 35 min/jour - semaine 5 : 36 à 40 min/jour - semaines 6 à 8 : 40 min/jour Avant et après les 8 semaines d'entrainement : test d'effort sur tapis à sec	- Tapis à sec - Pointe de l'olécrâne	1,5 m/s
Nankervis, Finney, et Launder (2016)	n = 14 (11 *Warmbloods*, 2 *Irish Sport Horses* and 1 *Thoroughbred*) Âge = 9 ± 4 ans Taille au garrot = 168 ± 5 cm Poids = 600 ± 46 kg	/	- Sabot (contrôle) - Articulation métatarso-phalangienne - Tarse - Articulation fémoro-patellaire	0,8 m/s
Greco-Otto et *al.* (2017)	n = 15 (*Quarter Horses*) Âge médian = 14,5 ans (Quartiles : 11,5-15,3) Taille au garrot = 152,4 cm (Quartiles : 148,0-155,6 cm) Poids médian = 516,9 kg (Quartiles : 475,5-555,0 kg)	Acclimatation sur 3 sessions de 20 min Température de l'eau = 14°C (13-15)	- Tapis à sec - Mi-canon - Carpe - Grasset	- 1,11 m/s - 1,25 m/s - 1,39 m/s
Nankervis et Lefrancois (2018)	n = 8 (3 *Warmbloods*, 3 *Warmblood x Thoroughbreds*, 2 *Thoroughbreds*) Âge = 10 ± 2,8 ans Taille au garrot = 166,5 ± 4 cm Poids = 520 à 580 kg	Température de l'eau = 14°C Échauffement de 5 min dans l'eau à hauteur du jarret.	- Tapis à sec - Sabot (en dessous de la bande coronaire) - Boulet - Jarret - Grasset	- 1,6 m/s (tapis à sec) - 0,8 m/s (tapis immergé)
Greco-Otto *et al.* (2019)	n = 22 (*Quarter Horses*) Âge médian = 6 ans (Quartiles : 5,5-10,5) Taille au garrot = 152,4 cm (Quartiles : 152,4-155,9) Poids médian = 536 kg (Quartiles : 489,5-558,5)	Accéléromètres placés au niveau du sabot, mi-canon et mi-radius	- Tapis à sec (contrôle) - Mi-canon - Carpe - Grasset	- 0,83 m/s - 1,39 m/s

Greco-Otto *et al.* (2020)	n = 9 (*Thoroughbreds*) Âge ~ 10 ans Poids ~ 586 kg	Température de l'eau = 14°C (13-15) Programme d'entrainement de 18 jours (5 jours/semaine) : - 6 chevaux sur tapis immergé - 3 chevaux sur tapis à sec Augmentation progressive de la durée de travail (et hauteur de l'eau) des jours 1 à 8, puis 20 min d'entrainement pour les jours 9 à 18 (à hauteur du grasset). Test d'intensité maximale sur hippodrome avant et après entrainement : 300 m à 4 m/s, 6 m/s, 8 m/s et 800 m à vitesse maximale.	- Tapis à sec ou - Grasset	1,45 m/s
Silvers *et al.* (2020)	n = 30 (*Quarter Horses*) Âge = 496 ± 12 jours Poids = 343 ± 28 kg	Trois groupes de chevaux, suivant un protocole différent : - contrôle - tapis à sec - tapis immergé Protocoles de 140 jours : * Phase 1 (0 à 112 jours) : - Groupe contrôle : absence d'exercice - Groupes tapis à sec et tapis immergé : marche 30 min/jour, 5 jours/semaine *Phase 2 (113 à 140 jours) : - Groupe contrôle : absence d'exercice - Groupes tapis à sec et tapis immergé : exercice dans un marcheur 30 min/jour, 5 jours/semaine Température de l'eau = 27°C	Phase 1 : - tapis à sec - tapis immergé : 60 % de la hauteur au garrot	*Phase 1 : 1,2 m/s (semaine 1), augmentation de 0,2 m/s tous les 28 jours, jusqu'à 1,8 m/s *Phase 2 : Fractionnement entre 1,75 et 6,5 m/s (alternance pas, trot, canter)

McCrae *et al.* (2021)	n = 13 (5 *Thoroughbred* croisés, 4 *Warmbloods*, 2 *Quarter Horses*, et 2 chevaux de trait légers) Âge = 12 ± 4 ans Taille au garrot = 155 ± 5 cm Poids = 534 ± 36 kg	Entrainement sur tapis immergé entre le 2e et 9e jour : 28 minutes par jour (10 min à mi-canon, 10 min au carpe, et 8 min au grasset). Température de l'eau non contrôlée (entre 15 et 21°C)	- Mi-canon - Carpe - Grasset	Les vitesses sont adaptées à chaque cheval, et augmentent sur la période d'entrainement pour augmenter la charge de travail : - 2e jour : ~ 1,4 m/s (mi-canon), ~ 1,3 m/s (carpe), ~ 1,2 m/s (grasset) - 9e jour : ~ 1,5 m/s (mi-canon), ~ 1,4 m/s (carpe), ~ 1,4 m/s (grasset)
		Mesures lors des tests au 1er et 10e jour : - lors de marche en main dans une carrière de sable avant exercice sur tapis - lors de marche sur tapis - lors de marche en main dans une carrière de sable immédiatement après exercice sur tapis (uniquement à J10)	- Tapis à sec - Carpe - Grasset	Lors des tests, les vitesses sont adaptées au cheval, mais maintenues constantes entre le 1er et 10e jour : en moyenne 1,4 m/s (1,3-1,5)
Tranquille *et al.* (2022a)	n = 6 Âge = 15 ± 6,5 ans Taille = 164 ± 2 cm Poids = 539 ± 37 kg	/	- Tapis à sec - à 7,5 cm (région de la bande coronaire) - à 21 cm (région du boulet) - à 34 cm (région du métacarpe proximal) - à 47 cm (région du radius distal)	1,6 m/s
			Ces hauteurs d'eau et cette vitesse ont été sélectionnées car recensées comme les plus utilisées lors de protocoles sur tapis immergé (Tranquille et al. 2018)	

Saitua *et al.* (2022)	n = 6 (1 croisé, 1 Pur-sang arabe, 1 Anglo-Arabe, 3 Andalous) Âge = 12,6 ± 1,6 ans Poids = 414 ± 45 kg	Quatre sessions d'exercice de 40 min sur tapis immergé, au cours de laquelle le cheval est soumis aux différentes hauteurs d'eau. Un jour de repos entre chaque session Évaluation des paramètres d'accélérométrie avant et 30 min après la session sur tapis immergé : marche et trot en longe sur 80 mètres	- Tapis à sec - Articulation métacarpo-phalangienne - Carpe - Grasset	1,4 m/s
De Geer *et al.* (2022)	n = 12 (*Warmbloods*)	/	- Tapis à sec - à 30 cm	0,9 à 1,2 m/s
Pasman *et al.* (2022)	n = 12 (*Warmbloods*)	/	- Tapis à sec - à 30 cm	0,9 à 1,2 m/s
Nankervis *et al.* (2023)	n = 6 *Thoroughbreds* à l'entrainement Âge = 5,8 ± 0,4 ans Taille au garrot = 166,8 ± 1,8 cm	Échauffement : marche en main pendant 5 min sur une surface ferme	- Tapis à sec - Articulation métacarpo-phalangienne - Carpe	- 0,8 m/s - 1,2 m/s - 1,5 m/s - 1,7 m/s
Fraschetto *et al.* (2024)	n = 6 (*Standardbreds*) Âge médian = 12 ans (Quartiles: 10,5-12) Taille au garrot = 158,2 cm (157,2-159 cm) Poids médian = 556 kg (Quartiles : 538-583 kg)	Échauffement de 2 min au pas sur tapis à sec Chaque cheval effectue 3 sessions d'exercice de 25 min sur tapis. Durant chaque session, le cheval est mis au trot, d'abord sur tapis à sec, puis sur tapis immergé à une des 3 hauteurs d'eau. Deux vitesses de trot sont testées à chaque fois	- Tapis à sec - Mi-canon - Mi-radius - Pointe de l'épaule	- 3,5 m/s - 5 m/s

n = nombre de chevaux recrutés dans l'étude

<u>Annexe 5</u> : Exemple de programme de réhabilitation sur tapis immergé utilisé à l'Université du Tennessee en 2011 par Adair pour une lésion tendineuse légère à modérée, source : Delacharlerie Aurore.

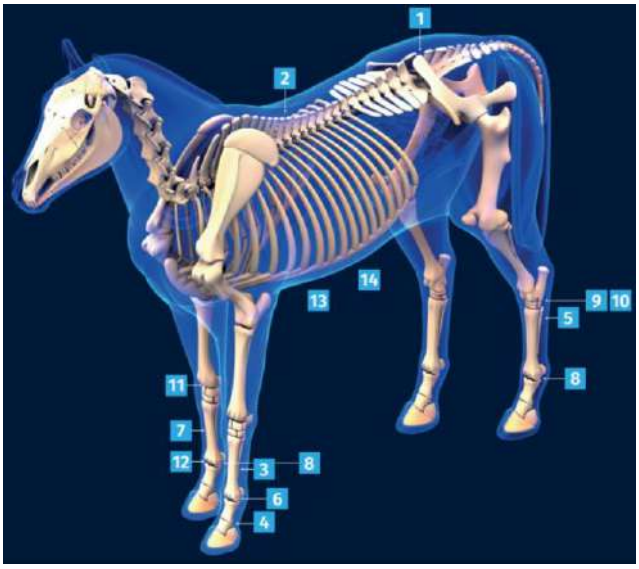
<table>
<tr><th>Temps</th><th>Échauffement</th><th>Hauteur de l'eau</th><th>Vitesse (m/s)</th><th>Durée (minutes)</th><th>Récupération</th><th>Fréquence</th><th>Contrôle</th></tr>
<tr><td>Période d'acclimatation (1 à 2 jours)</td><td colspan="6">Faire marcher le cheval à côté du tapis, puis sur le tapis à l'arrêt. Remplir le tapis pour habituer le cheval aux bruits. Positionner le cheval sur le tapis à l'arrêt et remplir à 15 cm de hauteur d'eau. Répéter en mettant le tapis en marche. Possibilité de sédater, au besoin.</td><td>Le programme n'est commencé qu'une fois qu'un contrôle échographique de la zone lésée a montré une cicatrisation suffisante, et que le cheval peut supporter des sessions de marche en main.</td></tr>
<tr><td>Jours 3 à 7</td><td>2-3 minutes</td><td>Olécrâne</td><td>0,9</td><td>5</td><td>2-3 minutes</td><td rowspan="4">Une fois par jour, cinq jours par semaine.</td><td>S'assurer que le cheval marche confortablement pendant 5 min à 0,9 m/s.
Avant chaque session : évaluer la présence de chaleur ou œdème du tendon.
Réévaluation du degré de boiterie chaque semaine.</td></tr>
<tr><td>Semaine 2</td><td rowspan="5">Au moins 5 min à 0,9 m/s</td><td rowspan="5">Augmenter ou diminuer la profondeur de l'eau selon l'objectif de la réhabilitation.</td><td>0,9-1,34</td><td>10</td><td rowspan="5">Au moins 5 min à 0,9 m/s</td><td>S'assurer que le cheval marche confortablement pendant 10 min à 1,34 m/s.
Avant chaque session : évaluer la présence de chaleur ou œdème du tendon.
Réévaluation du degré de boiterie chaque semaine.</td></tr>
<tr><td>Semaine 3</td><td>Jusqu'à 1,8</td><td>15</td><td>S'assurer que le cheval marche confortablement pendant 15 min à 1,34-1,8 m/s.
Avant chaque session : évaluer la présence de chaleur ou œdème du tendon.
Réévaluation du degré de boiterie chaque semaine.</td></tr>
<tr><td>Semaine 4</td><td>Jusqu'à 2,2</td><td>20</td><td rowspan="2">S'assurer que le cheval marche confortablement pendant 20 min à 1,8-2,2 m/s.
Avant chaque session : évaluer la présence de chaleur ou œdème du tendon.
Réévaluation du degré de boiterie chaque semaine.
Renouvellement du contrôle échographique tous les mois.</td></tr>
<tr><td>Semaine 5 ± Introduction de l'entrainement croisé</td><td>Jusqu'à 2,2</td><td>20</td><td>Une fois par jour, trois à cinq jours par semaine.</td></tr>
</table>

<u>Annexe 6</u> : Guide pour l'utilisation des tapis immergés, recensant les différents paramètres pour la construction de protocoles de réhabilitation, proposé par l'Université de Hartpury.

L'université de Hartpury en Angleterre propose un guide sur l'utilisation du tapis immergé pour les propriétaires, fourni par le concepteur *Aqua Equine Treadmill*. Les différents paramètres sont donnés dans le Tableau A.

<u>Tableau A</u> : Paramètres proposés *par l'Université de Hartpury* pour la construction de protocoles de réhabilitation sur tapis immergé.

Durée	- 1ère session : ne pas dépasser 10 minutes ; - 2e session : 10 à 15 minutes ; - 3e session : 20 minutes ; - Sessions suivantes : **en général pas plus de 20 minutes**.
Vitesse	Pour la plupart des chevaux, la vitesse de marche confortable dans l'eau est inférieure à la vitesse observée sur terre : - Vitesse sur un tapis sec = 1,6 à 2 m/s ; - **Vitesse sur tapis immergé = 1 à 1,4 m/s**, cette vitesse sera diminuée pour les poneys ou pour les niveaux d'immersion élevés.
Hauteur d'eau	Le niveau d'eau choisi dépend de l'objectif de la session et de la présence simultanée éventuelle d'autres affections sur le cheval. Le Tableau B propose plusieurs indications de hauteurs d'eau selon la lésion, il est à nuancer et adapter à la réponse du cheval, et aux recommandations vétérinaires. En règle générale pour l'acclimatation, l'eau ne doit pas dépasser : - 1ère session : mi-canon ; - 2e session : en dessous du jarret ; - 3e session : grasset.



<u>Figure A</u> : Légende des différentes lésions mentionnées Tableau B, *selon l'Université de Hartpury*.

<u>Tableau B</u> : Hauteurs d'eau recommandées pour le travail sur tapis immergé *par l'Université de Hartpury* pour différentes lésions.

	Lésions - Indications	Hauteur d'eau	Commentaires
1	Douleur au niveau de l'articulation sacro-iliaque	Au niveau du jarret ou légèrement au-dessus	L'objectif est d'augmenter la force musculaire de base.
2	Conflit des processus épineux	Mi-canon	Une hauteur d'eau au-dessus du jarret favoriserait une extension thoracique, ce qui est à éviter.
3	Lésions du tendon du muscle fléchisseur superficiel du doigt et du ligament accessoire du tendon fléchisseur profond du doigt	Boulet	Aucun exercice sur tapis pendant la phase aigüe, durant les 6 à 8 semaines suivant la lésion, puis utilisation du tapis sec pendant 8 à 12 semaines, avant utilisation du tapis immergé.
4	Lésion du tendon du muscle fléchisseur profond du doigt	Non utilisé	Aucun exercice sur tapis pendant la phase aigüe, durant les 6 à 8 semaines suivant la lésion, puis utilisation du tapis sec uniquement.
5	Lésion proximale du ligament suspenseur du boulet	Au niveau du jarret ou légèrement au-dessus	Aucun exercice sur tapis pendant la phase aigüe, durant les 6 à 8 semaines suivant la lésion, puis utilisation du tapis immergé pour renforcer les muscles des membres postérieurs.
6	Lésion d'une branche du ligament suspenseur du boulet	Au niveau du jarret ou légèrement au-dessus	/
7	Déformation dorsale du canon *(Sore shins)*	Jarret au grasset	L'objectif est de réduire le support de poids par les membres et de promouvoir la cicatrisation tout en maintenant la condition physique.
8	Fracture condylaire du boulet	Jarret au grasset	L'objectif est de réduire le support de poids par les membres.
9	Douleur au jarret	Mi-canon	Une hauteur d'eau à mi-canon favorisera l'amplitude du mouvement en flexion du jarret et peut être utilisée chez les chevaux fréquemment infiltrés aux jarrets pour l'amélioration de leurs performances.
10	Boiterie de haut grade au niveau du jarret	Non utilisé	Tapis à sec uniquement.
11	Douleur au carpe	Jarret au grasset	Une augmentation de la hauteur de l'eau réduira d'autant plus les forces d'impact sur le carpe. Mais la marche dans l'eau ne doit pas être utilisée chez des chevaux dont la conformation du carpe est en hyperextension en arrière de la ligne d'aplomb.
12	Douleur au boulet	Jarret au grasset	Une augmentation de la hauteur de l'eau réduira d'autant plus les forces d'impact.
13	Renforcement musculaire de base, conditionnement	Jarret au grasset	/
14	Après une course ou une compétition	En dessous du jarret	L'objectif est de favoriser l'engagement des postérieurs sous le corps et de promouvoir la flexion lombaire. Cependant, en cas de boiterie ou d'inconfort au niveau des antérieurs, possibilité de hauteur d'eau supérieure.

Les numéros font référence à la Figure A.

Mise en perspective de l'utilisation des tapis immergés pour la réhabilitation de l'athlète équin

Auteur

DELACHARLERIE Aurore

Résumé

Suite à une lésion musculo-squelettique, l'objectif pour un athlète humain comme pour un athlète équin, est un retour au niveau d'exercice et de compétition avant blessure en un temps minimum tout en respectant les contraintes de la cicatrisation. Des pertes relatives des adaptations physiologiques cardiorespiratoires, musculaires, osseuses, tendineuses, et articulaires peuvent être observées lors de période sans entrainement. Un équilibre entre le maintien des forces biomécaniques des tissus mous et osseux, et le respect du processus de cicatrisation des tissus lésés doit donc être défini.
Les différentes propriétés physiques de l'eau, appliquées sous différentes combinaisons, peuvent intervenir au sein du processus multimodal de réhabilitation musculo-squelettique, et répondre aux grands principes de réhabilitation en médecine du sport. Notamment, l'exercice des chevaux sur tapis immergé, avec un choix raisonné de la vitesse et de la hauteur d'immersion, permet une réduction des forces d'impact sur les structures anatomiques des membres, le travail de l'amplitude du mouvement des articulations des membres et du dos, et concourt au maintien voire à l'amélioration de la capacité aérobie et de la force musculaire. Il reste néanmoins encore à apprendre sur l'utilisation optimale de cette modalité thérapeutique en fonction de l'affection musculo-squelettique ou cardiorespiratoire considérée. Les recherches sont à poursuivre afin de répondre au mieux aux objectifs spécifiques et individuels de la réhabilitation d'un athlète équin.

Mots-clés

Réhabilitation, Thérapie aquatique, Athlète, Cheval, Homme

Jury

Président du jury	:	**Pr**	**CADORÉ Jean-Luc**
Directeur de thèse	:	**Pr**	**LEPAGE Olivier**
2ème assesseur	:	**Pr**	**ROGER Thierry**

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

VetAgro Sup