



**HAL**  
open science

# Caractérisation des techniques de massage et validation des bénéfices physiologiques d'un système de massage robotique, autonome et interactif

Yann Kerautret

## ► To cite this version:

Yann Kerautret. Caractérisation des techniques de massage et validation des bénéfices physiologiques d'un système de massage robotique, autonome et interactif. Neurosciences. Université de Lyon, 2021. Français. NNT : 2021LYSE1313 . tel-03771416

**HAL Id: tel-03771416**

**<https://theses.hal.science/tel-03771416v1>**

Submitted on 7 Sep 2022

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

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



N°d'ordre NNT :  
2021LYSE1313

**THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON**  
opérée au sein de  
**l'Université Claude Bernard Lyon 1**

**Ecole Doctorale N° 205**  
**École Doctorale Interdisciplinaire Sciences et Santé (EDISS)**

**Spécialité de doctorat** : Sciences de Techniques des Activités Physiques et Sportives  
**Discipline** : Neurosciences

Soutenue publiquement le 13/12/2021, par :  
**Yann KERAUTRET**

---

**Caractérisation des techniques de massage et  
validation des bénéfices physiologiques d'un système  
de massage robotique, autonome et interactif**

---

Devant le jury composé de :

<b>MOUREY, France</b>	Pr. des Universités	Université de Bourgogne Franche-Comté	Présidente
<b>MAZZA, Stéphanie</b>	Pr. des Universités	Université de Lyon 1	Examinatrice
<b>MOREL, Guillaume</b>	Pr. des Universités	Sorbonne Université Paris	Examineur
<b>PINSAULT, Nicolas</b>	Maître de Conférences - HDR	Université de Grenoble Alpes	Rapporteur
<b>SIEGLER, Isabelle</b>	Pr. des Universités – Praticien Hospitalier	Université Paris-Saclay	Examinatrice
<b>TALLET, Jessica</b>	Maître de Conférences - Praticien Hospitalier - HDR	Université Paul Sabatier Toulouse III	Rapporteuse
<b>GUILLOT, Aymeric</b>	Pr. des Universités	Université de Lyon 1	Directeur de thèse
<b>DI RIENZO, Franck</b>	Maître de Conférences	Université de Lyon 1	Co-directeur de thèse

## RÉSUMÉ

L'objectif de ce travail doctoral est d'étendre les connaissances sur les massages manuels et autogènes, et d'évaluer les effets de solutions de massage robotiques autonomes et interactives. Dans un premier temps, les travaux expérimentaux ont permis de préciser les caractéristiques du massage autogène, notamment ses effets interférents avec les performances en force lors d'une pratique intégrée aux séances d'entraînement, et l'absence de bénéfices additionnels lorsque des mouvements de pression glissée étaient intégrés aux routines. Nous avons ensuite comparé sur la base d'indicateurs psychométriques, comportementaux et neurophysiologiques massage manuel et massage autogène. Les deux méthodes de massages ont induit des états de relaxation supérieurs à la condition contrôle. Toutefois, le massage manuel semblait induire un état de relaxation plus marqué que le massage autogène, tant sur la base d'indicateurs objectifs que subjectifs. Sur le plan du contrôle moteur, le massage manuel engage le sujet dans un mode de contrôle de l'action essentiellement rétroactif. À l'inverse, le massage autogène implique la production de mouvements volontaires et engage donc le sujet dans un mode de contrôle proactif. Nous avons cherché à situer le massage robotique au sein de ce continuum. Le massage robotique, en offrant la possibilité au sujet d'interagir en temps réel avec les mouvements du robot, permet l'alternance entre modes de contrôle proactif et rétroactif. Le massage robotique représente donc une expérience sensorimotrice distincte du massage manuel et autogène. Dans une dernière étude, nous avons comparé l'efficacité du massage robotique à celle d'un massage manuel réalisé par un professionnel expérimenté. Les deux interventions ont produit des effets sur les indicateurs de bien-être et de relaxation, mais ceux-ci demeuraient plus marqués à l'issue du massage manuel. Toutefois, l'effet des deux interventions sur les sensations perçues était comparable. Les dispositifs de massages robotisés n'ont pas vocation à remplacer les praticiens. Ils représentent une solution d'assistance pour des tâches répétitives et élémentaires. Le massage robotique pourrait permettre, par exemple, de pallier la fatigue induite par la répétition des massages qui fut enregistrée au cours de l'étude. Les effets du massage robotique sur les indicateurs objectifs et subjectifs de bien-être laissent envisager des possibilités de démocratisation.

**Mots clés :** massage manuel, massage autogène, massage robotique, électroencéphalographie, activité électrodermale, amplitude articulaire, sensations physiques.

## **ABSTRACT**

The present doctoral work aimed at expanding current knowledge on manual and autogenic massages, and evaluate the feasibility and efficacy of autonomous and interactive robotic massage solutions. First, we conducted experimental research to better understand the characteristics of autogenic massages. We found a negative influence of embedded autogenic massage practice on strength performances. We also found that adding sliding pressures to conventional autogenic massage routines did not yield additional improvements. Then, we compared from psychometric, behavioral and neurphysiological indexes the effects of manual and autogenic massages on states of relaxation and well-being. Both massage interventions elicited greater relaxation than the control condition. However, manual massage elicited a more pronounced relaxation state than autogenic massage, as revealed by both objective and subjective indexes. With regards to motor control frameworks, manual massage mainly engages the person in a retroactive mode of action control. Conversely, autogenic massage involves voluntary actions and therefore engages the person in a proactive mode of action control. Robotic massages allow for real-time interactions with the massage gestures through remote control of the robot. Robotic massages thus allow participants to switch between proactive and retroactive modes of action control. Robotic massages therefore represent a sensorimotor experience which is distinct from that produced during manual and autogenic massages. We finally compared the effectiveness of robotic and manual massages performed by an experienced professional. Both interventions improved well-being and relaxation, but the effects were more pronounced after the manual massage intervention. Nonetheless, the effect of both interventions on perceived sensations was comparable. Robotic massage devices should not be considered as replacement tool for practitioners. They represent a support solution for repetitive and simple tasks. Massage robotic could, for example, alleviate practitioners from the fatigue induced by the repetition of massages, as recorded during our last study. The effects of robotic massage on objective and subjective indexes of relaxation and well-being should contribute to further democratization.

**Keys words:** manual massage, autogenous massage, robotic massage, electroencephalography, electrodermal activity, range of motion, physical sensations.

## **PRÉSIDENCE DE L'UNIVERSITÉ CLAUDE BERNARD – LYON 1**

Président de l'Université	M. le Professeur Frédéric FLEURY
Conseil Académique	M. le Professeur Hamda BEN HADID
Vice-président du Conseil d'Administration	M. le Professeur Didier REVEL
Vice-présidente Commission Formation et de la Vie Universitaire	Mme. BROCHIER Céline
Vice-président de la Commission Recherche	M. Petru MIRONESCU
Directeur Général des Services	M. Pierre ROLLAND

### **COMPOSANTES SANTÉ**

Faculté de Médecine Lyon Est	Directeur : M. le Professeur Gilles RODE
Faculté de Médecine et de Maïeutique Lyon Sud – Charles Mérieux	Directeur : Mme la Professeure Carole BURILLON
Faculté d'Odontologie	Directeur : M. le Professeur Dominique SEUX
Institut des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques	Directeur : Mme la Professeure Christine VINCIGUERRA
Institut des Sciences et Techniques de la Réadaptation	Directeur : M. Xavier PERROT
Département de Biologie Humaine	Directeur : Mme la Professeure Anne-Marie SCHOTT

### **COMPOSANTES ET DÉPARTEMENTS DE SCIENCES ET TECHNOLOGIE**

Biosciences	Directrice : Mme la Professeure Kathrin GIESELER
Faculté des Sciences	Directeur : M. Bruno ANDRIOLETTI
Département GEP	Directeur : Mme. Rosaria FERRIGNO
Département Informatique	Directeur : M. le Professeur Behzad SHARIAT
Département Mécanique	Directeur : M. le Professeur Marc BUFFAT
UFR Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives	Directeur : M. Yannick VANPOULLE
Institut Universitaire de Technologie de Lyon 1	Directeur : M. le Professeur Christophe VITON

Polytech Lyon

Directeur : M. le Professeur Emmanuel  
PERRIN

Observatoire des Sciences de l'Univers de Lyon

Directeur : Mme. Isabelle DANIEL

Institut de Sciences Financières et d'Assurances

Directeur : M. Nicolas LEBOISNE

Institut National Supérieur du Professorat et de  
l'Education

Directeur : M. le Professeur Pierre  
CHAREYRON

## **AFFILIATION**

Ce travail de thèse a été réalisé au sein :

Laboratoire Interuniversitaire de Biologie de la Motricité – EA 7424

UFR des Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives (UFR STAPS)

Université Claude Bernard Lyon 1

27, 29 Boulevard du 11 novembre 1918

69622 VILLEURBANNE Cedex, France

CAPSIXRobotics

7 rue Alfred de Musset

69100 Villeurbanne

## REMERCIEMENTS

Professeur Aymeric Guillot, je me souviens de notre première réunion qui avait pour but de préciser mon sujet de mémoire de recherche de Master 2. À cet instant, j'étais loin d'imaginer que nous étions sur le point d'entamer une aussi longue et belle collaboration. Venu avant tout dans la ville de Lyon pour parfaire ma formation universitaire et mes compétences professionnelles, tu as su avec l'aide de Franck me donner goût à la recherche. Si mes souvenirs sont bons, ma première rencontre avec Franck s'est effectuée lors de notre seconde réunion pour suivre mes avancées. À ce moment, lorsque vous m'avez laissé entendre que mon travail était d'une certaine manière inhabituelle, j'ai commencé à prendre confiance en mes capacités. Néanmoins, je tiens à souligner que si j'ai eu ce déclic, cet élan de motivation est avant tout expliqué à l'origine par votre qualité d'encadrement conjoint. En effet, que ce soit sur mon mémoire de recherche ou ce projet de thèse, je n'ai jamais eu la moindre contrainte, restriction de votre part. Certes il n'était pas parfait, mais j'avais initialement un postulat. À aucun instant vous n'avez essayé de m'en détourner. Au contraire, en tant que bons directeur et co-directeur, avec votre expérience vous avez su me conseiller et m'orienter afin d'avancer efficacement. Cette confiance et cette liberté que vous m'avez accordées depuis le commencement sont pour ma part les principaux motifs qui m'ont poussé à continuer sur ce projet de thèse. De même, malgré certains aléas, votre soutien sans faille a été un élément très précieux qui m'a permis d'arriver au bout de ce travail et pour tout cela, je tenais à vous en remercier chaleureusement. Malgré certaines lacunes et de multiples allers-retours, j'ai pris un réel plaisir à travailler avec vous sur cette thématique pour le moins atypique.



Un mot particulier pour le Dr Franck Di Rienzo qui m'a accompagné au plus près durant tout ce travail de thèse. Ton expérience et tes compétences ont été cruciales pour me permettre de mener à bien ce projet. J'ai eu l'occasion d'acquérir de nombreuses compétences grâce à ta pédagogie et ta confiance. Je te remercie pour ton altruisme. Nos échanges et notre relation sont allés bien au-delà d'une simple relation encadrant-encadré et je t'en remercie. Ces moments de convivialité ont contribué grandement à mon épanouissement personnel et professionnel, en espérant bientôt profiter à nouveau de ce type de moments.

Le Dr Carole Eyssautier, François Eyssautier, Stéphane Rollet, je vous remercie également de cette même confiance que vous m'avez accordée et de votre soutien. Je ne me rends compte véritablement qu'aujourd'hui de l'ampleur de ce projet. Cette démarche était pour le moins audacieuse et tout aussi courageuse. Malgré cet enjeu, vous avez toujours réussi à me laisser libre dans la gestion de ce travail. Vous avez su respecter mon rythme sans jamais m'imposer la moindre pression, et ce malgré les obstacles que vous rencontriez avec la société (difficultés financières, incendie des bureaux avec son matériel, crise du COVID). Pour cette gestion accomplie dans l'ombre, je vous félicite et vous en remercie chaleureusement. Je vous remercie personnellement de vos contributions respectives dans ce projet ; les relectures et les corrections de Carole, les journées expérimentales avec Stéphane à faire des massages et l'accompagnement et l'encadrement de François par des entretiens individuels pour faire en sorte que tout roule au quotidien.

Je remercie la Professeure France Mourey d'avoir suivi ce projet avec pas moins de trois comités de suivi de thèse. Votre regard et vos conseils ont été précieux pour la bonne réalisation et rédaction de ce travail de thèse.

Je remercie les étudiants doctorants et les enseignants chercheurs des équipes MP3 et SPIP du laboratoire LIBM de Lyon pour leur bienveillance à mon égard. Bien que ma présence n'ait été qu'épisodique, je remercie mes collègues de bureaux, Sophie Schlatter, Angèle Metais, Mélanie Gallot, Matthieu Degot, Robin Trama, Qingshan Zhang ainsi que Mathilde Mura et Etienne Gouraud qui ont eu à supporter mes solutions de détente peu orthodoxes comme la marche sur les mains ou mes tentatives d'ATR en plein milieu de notre bureau. Je les remercie également pour leur participation à certaines de mes études, les moments d'échanges professionnels mais également de détente en dehors du laboratoire. Même si mes échanges ont été rares avec certains enseignants chercheurs du laboratoire, je tenais à vous remercier chacun d'entre vous pour votre sympathie : Karine Monteil, Isabelle Rogowski, Ursula Debarnot, Christian Collet, Arnaud Saimpont, Nady Hoyek, Cyril Martin, Alexandre Fouré, Yoann Blache, Christophe Hautier et Pierre Legreneur.

Je tiens également à remercier le Dr. Léonard Feasson du LIBM de Saint-Etienne qui, sans son approbation, n'aurait pas pu nous permettre de mener à bien notre dernière expérimentation, cœur de ce travail de thèse. De la même manière, je remercie Jérémy Rossi, enseignant chercheur de l'équipe PAF de Saint-Etienne, pour sa disponibilité et son incroyable accueil lors de nos venues. Au risque d'oublier certaines personnes, je remercie l'ensemble du personnel du LIBM de Saint-Etienne, ses enseignants chercheurs et les étudiants doctorants qui se sont prêtés volontiers au jeu de notre étude. Votre curiosité et votre bonne humeur autour de notre étude furent pour moi une expérience fantastique malgré la lourdeur de son organisation.

Je remercie mes collègues de travail de la société Capsix Robotics, le Dr. Guillaume, Johan et Benjamin qui sont devenus au fil des années des amis. Je voudrais te remercier plus particulièrement, Guillaume, pour ton aide et la bienveillance dont tu as fait preuve dès le

premier jour. Ton expérience et nos échanges m'ont été d'un grand secours dans mon travail. Johan et Benjamin, merci pour vos conseils, votre bonheur et nos moments de détente. Entre nos batailles de nerf et nos parties de baby-foot, je me suis bien amusé en votre compagnie. Un vrai bol d'air frais pour me sortir de mes longues périodes de lecture et de rédaction d'articles, n'oublions pas également mes petites sessions de couture. J'ai hâte de vous revoir et de discuter autour de quelques pintes et d'un bon repas.

Je ne remercierai jamais assez les différents volontaires qui ont accepté de participer à ces expérimentations. Merci pour votre intérêt et votre temps qui m'ont été d'une grande aide pour récolter toutes ces données. C'est également l'occasion pour moi de remercier les différents propriétaires de box Crossfit qui ont bien voulu me laisser communiquer sur leurs réseaux sociaux et ainsi faciliter la prise de contact avec tous ces volontaires. Un grand merci donc à Nicolas Delay et les membres de Crossfit Lyon, Jean-Philippe Gams et les membres de Crossfit Villeurbanne, Martin Leclercq et les membres de Crossfit Elafi, Emeric Pochon et les membres de Crossfit Gerland ainsi que mes collègues de promotion de master Kévin Hector et Gaetan Morcel et les membres de Crossfit Vienne. Enfin, je remercie le Club Haltérophile de Vaulx-en-Verin, ses adhérents, ses bénévoles et son Président Fares Zitouni pour leurs aides et participations.

Bien évidemment une pensée pour mes parents qui ont enduré mes caprices durant des années chaque matin parce que je ne voulais pas aller à l'école. Se battre tous les jours pour que je fasse correctement mes devoirs. Obligé de se renseigner auprès d'autres parents pour vérifier si je ne mentais pas sur la quantité des devoirs. À toimaman plus particulièrement de m'avoir accompagné tout au long de ma scolarité. Je vous remercie tous les deux d'avoir accepté mon choix d'orientation et d'avoir fait en sorte de m'en donner les moyens pour y parvenir. Passé le

cap du BAC, porte d'entrée pour la filière STAPS dont je rêvais depuis tout petit, j'ai su prendre mon envol en baignant dans mon élément. J'ai gravi les étapes jusqu'à parvenir à ce projet de thèse. Pour ces raisons, je n'ose imaginer votre fierté, d'avoir réussi à faire de moi cet homme que je suis. « Et dire qu'il n'aimait pas l'école... ». Dorénavant, il m'arrive régulièrement de retourner à « l'école » en donnant à mon tour des cours à de jeunes étudiants. Je ne vous remercierai jamais assez pour vos sacrifices, votre patience de chaque instant, votre confiance et votre soutien depuis toujours.

Je remercie ma compagne Dilan Dogan qui partage ma vie depuis ces trois dernières années de thèse. Durant cette thèse, j'ai essuyé des hauts et des bas. Certains moments sur le plan personnel ont été tellement difficiles à gérer que des doutes se sont parfois immiscés. Mais sans cette thèse, nous ne nous serions peut-être jamais rencontrés. Depuis notre première rencontre au cours d'une de mes expérimentations, nous vivons presque chaque instant l'un avec l'autre. Je te remercie pour ton incroyable patience face à mes sauts d'humeur, témoin du stress et de mes coups de fatigue. Ton calme et ton soutien au quotidien ont bien évidemment été d'un grand secours. Et tout comme moi, je pense que tu as hâte de tourner cette page pour nous consacrer et entamer notre projet à tous les deux.

Je voudrais également remercier Fouad Laksir (29/04/2020). Mon partenaire d'entraînement, mon ami qui était presque comme un frère et avec qui j'ai partagé d'innombrables souvenirs. Tu as toujours été là pour moi dans les moments difficiles. Tu as su m'épauler et m'encourager à ne jamais lâcher ce travail titanesque. Bien que notre projet ne verra jamais le jour, je garderai en mémoire notre voyage inoubliable en Iran comme une expérience de vie hors du commun. Merci mille fois pour tout ce que tu m'as apporté.

Je terminerai par un hommage à mon grand-père décédé le 11 septembre 2021. Ta force et ta santé de fer m'aura toujours impressionné. Tu étais dur au mal et ce sont sûrement tous ces éléments réunis qui t'ont permis de tenir aussi longtemps face à la maladie. Mes études m'ont éloigné de toi et de la famille, mais je mesure aujourd'hui à quel point tu as su prendre soin de tes petits enfants. Tous ces étés passés avec toi et mamie à Boissey dans notre enfance resteront à jamais dans ma mémoire. Je m'en souviens encore comme si c'était hier et je commence véritablement à comprendre pourquoi tu appréciais tant ta maison de campagne. Quitter la ville pour retrouver le calme de ta Normandie, ton immense potager et tes arbres fruitiers dont tu étais si fier. Tout ce dur labeur que tu faisais manuellement nous permettait de nous régaler à chaque repas. Ces quelques phrases, ces quelques mots ne suffiront jamais à décrire ces innombrables souvenirs d'enfance et ne seront jamais assez forts pour te remercier de nous avoir gâtés. A toi papy, qui a sans nul doute contribué à faire de moi la personne que je suis aujourd'hui, repose en paix, tu le mérites bien.

## TABLE DES MATIÈRES

<b>RÉSUMÉ .....</b>	<b>1</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>2</b>
<b>LISTE DES ABRÉVIATIONS .....</b>	<b>16</b>
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>17</b>
<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b>	<b>22</b>
<b>CHAPITRE 1 : REVUE DE LITTÉRATURE</b>	<b>26</b>
<b>A. LE MASSAGE MANUEL .....</b>	<b>28</b>
1. Le répertoire gestuel .....	32
2. Les effets aigus.....	34
3. Les effets chroniques.....	40
<b>B. LE MASSAGE AUTOGÈNE.....</b>	<b>41</b>
1. Les différentes techniques .....	45
2. Les effets aigus.....	47
3. Les effets chroniques.....	53

<b>C. DE LA RESSEMBLANCE AUX DIFFÉRENCES.....</b>	<b>57</b>
<b>D. LE MASSAGE ROBOTIQUE : UN PARADIGME ÉMERGENT.....</b>	<b>60</b>
1. L'instrumentalisation du massage.....	60
2. De la mécanisation à la motorisation du massage.....	63
3. Le challenge de la robotisation du massage.....	69
<b>E. SYNTHÈSE .....</b>	<b>80</b>
<b>REVUE DE SYNTHÈSE</b>	<b>81</b>
<b>CHAPITRE 2 : CADRE MÉTHODOLOGIQUE</b>	<b>121</b>
<b>A. LES VARIABLES DÉPENDANTES .....</b>	<b>122</b>
1. Les variables neurophysiologiques .....	122
2. Les variables comportementales .....	134
3. Les variables psychométriques .....	144
<b>B. La solution iYU® Pro.....</b>	<b>150</b>
1. Le matériel .....	151
2. Le logiciel .....	158
<b>C. OBJECTIFS .....</b>	<b>163</b>

<b>CHAPITRE 3 : LE MASSAGE AUTOGÈNE : INFLUENCE D'UNE PRATIQUE INTÉGRÉE À L'ENTRAÎNEMENT ET EFFICACITÉ DE NOUVELLES TECHNIQUES</b>	<b>167</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>168</b>
<b>ÉTUDE 1 .....</b>	<b>169</b>
<b>RÉSUMÉ .....</b>	<b>188</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>189</b>
<b>ÉTUDE 2 .....</b>	<b>191</b>
<b>RÉSUMÉ .....</b>	<b>206</b>
<b>CHAPITRE 4 : MASSAGE MANUEL ET MASSAGE AUTOGÈNE : DIFFÉRENCE DE NATURE DU CONTRÔLE MOTEUR</b>	<b>207</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>208</b>
<b>ÉTUDE 3 .....</b>	<b>210</b>
<b>RÉSUMÉ .....</b>	<b>229</b>
<b>CHAPITRE 5 : MASSAGE ROBOTIQUE ET MASSAGE MANUEL : AUX PORTES D'UNE NOUVELLE EXPÉRIENCE</b>	<b>230</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>231</b>



<b>ÉTUDE 4 .....</b>	<b>233</b>
<b>RÉSUMÉ.....</b>	<b>275</b>
<b>CHAPITRE 6 : DISCUSSION GÉNÉRALE</b>	<b>276</b>
<b>CONCLUSION</b>	<b>291</b>
<b>RÉFÉRENCES</b>	<b>298</b>
<b>ANNEXES</b>	<b>344</b>

## **LISTE DES ABRÉVIATIONS**

**AED** : Activité Electrodermale

**AgCl** : Chlorure d'Argent

**BRUMS** : Brunel Mood Scale

**CIDN** : Contrôle Inhibiteur Diffus de la  
Nociception

**CFDRM** : Centre Français de  
Documentation et de Recherches sur les  
Massages

**EEG** : Électroencéphalographie

**EN** : Échelles Numériques

**EVA** : Échelles Visuelles Analogiques

**EVS** : Échelles Verbales Simples

**MTMAI** : Mobilisation des Tissus Mous  
Assistés par Instrument

**NASA – TLX** : NASA– Task Load index

**PC** : Personal Computer

**PID** : Proportionnel, Intégral, Dérivé

**POMS-A** : Profile of Mood States-  
Adolescents

**RED** : Réponse Électrodermale

**SASTM**: Sound Assisted Soft Tissue  
Mobilization

**SNA** : Système Nerveux Autonome

**ToF** : Time of Flight

**VFC** : Variabilité de la Fréquence  
Cardiaque

**WAO-1** : Waseda Asahi Oral  
Rehabilitation Robot 1

## **LISTE DES FIGURES**

Figure 1. Illustrations des techniques de massage manuel. ....	32
Figure 2. Illustrations d'anciens outils de massage autogène. ....	43
Figure 3. Illustrations des outils de massage autogène actuels. ....	44
Figure 4. Illustrations des outils de massage autogène vibrants. ....	47
Figure 5. Illustrations des tests d'agilité. ....	50
Figure 6. Illustrations des outils de mobilisation des tissus mous assistée par instrument. ....	61
Figure 7. Illustrations d'un outil de massage mécanique et de deux dispositifs électromécaniques. ....	64
Figure 8. Illustrations des différentes versions de fauteuil massant fujiiryoki. ....	65
Figure 9. Illustrations de dispositifs motorisés. ....	67
Figure 10. Illustrations d'un concept et de deux projets de massage robotisé. ....	70
Figure 11. Illustrations de robots collaboratifs dédiés au massage. ....	76
Figure 12. Caractéristiques des cinq ondes cérébrales de base et de leur influence .....	125
Figure 13. Illustrations du positionnement des électrodes dans le système international 10/20. ....	126
Figure 14. Illustrations du matériel d'acquisition EEG. ....	127

Figure 15. Illustrations des consommables pour la méthode exploratoire EEG.....	128
Figure 16. Illustrations du notre montage bipolaire sur la base du système international 10/20. .....	128
Figure 17. Composantes tonique et phasique exprimées en conductance de l'activité électrodermale avec l'accord de Droulers et al. (2013).....	130
Figure 18. Illustrations du matériel d'acquisition AED. ....	131
Figure 19. Illustration du matériel d'acquisition VFC, un transducteur d'impulsions piézoélectrique (TN1012/ST).....	134
Figure 20. Illustration de l'accéléromètre MyotestPro.....	136
Figure 21. Illustrations d'un inclinomètre, de goniomètres et d'une application smartphone. .....	140
Figure 22. Illustration des six sous échelles du BRUMS .....	146
Figure 23. Illustration des six sous échelles et des deux catégories du NASA-TLX.....	147
Figure 24. Illustrations des différentes échelles subjectives de la douleur.....	149
Figure 25. Schéma électrique simplifié de la solution iYU® Pro.....	154
Figure 26. Illustrations de la main de massage de la solution iYU® Pro avec son système articulé et sa chaussette en silicone.....	157
Figure 27. Technologie i&Bot® - Capsix Robotics.....	161

Figure 28. Illustrations des zones dédiées aux capteurs. ....285

Figure 29. Illustrations des gants de massage. ....286

## LISTE DES PUBLICATIONS

### ARTICLES PUBLIÉS

Guillot A., **Kerautret Y.**, Queyrel F., Schobb W. & Di Rienzo F. (2019). Foam Rolling and Joint Distraction with Elastic Band Training Performed for 5-7 Weeks Respectively Improve Lower Limb Flexibility. *Journal of Sports Science and Medicine* 18(1), 160-171.

**Kerautret Y.**, Di Rienzo F., Eyssautier C. & Guillot A. (2020). Selective effects of manual massage and foam rolling on perceived recovery and performance: current knowledge and future directions toward robotic massages. *Frontiers in Physiology*, 11, 1567. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.598898>.

**Kerautret Y.**, Guillot A. & Di Rienzo F. (2021). Evaluating the effects of embedded self-massage practice on strength performance: A randomized crossover pilot trial. *PLoS ONE* 16(3), e0248031. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0248031>.

**Kerautret Y.**, Guillot A., Eyssautier C., Gibert G. & Di Rienzo F. (2021). Effects of self-myofascial release interventions with or without sliding pressure on skin temperature, range of motion and perceived well-being: a randomized control pilot trial. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 13 (1), 43. <https://doi.org/10.1186/s13102-021-00270-8>.

**Kerautret Y.**, Guillot A., Daligault S. & Di Rienzo F. (2021). Foam rolling elicits neuronal relaxation patterns distinct from manual massage: a randomized controlled trial. *Brain Sciences*, 11(6), 818. <https://doi.org/10.3390/brainsci11060818>.

## **ARTICLES EN PRÉPARATION**

**Kerautret Y.**, Di Rienzo F., Eyssautier C. & Guillot A. Evaluation and comparison of robotic and manual massage interventions on objective and subjective indexes of performance and well-being: A randomized crossover trial.

## **PARTICIPATION EN CONGRÈS INTERNATIONAL**

**Kerautret Y.**, Di Rienzo F., Eyssautier C., Gibert G., Guillot A. (2020) Selective effects of distinct self-massage methods on skin temperature, range of motion and perceived well-being. *Applied psychophysiology and biofeedback*. 18<sup>ème</sup> congrès de l'Association des Chercheurs en Activités Physiques et Sportives (ACAPS) (28-31 octobre 2019) Paris, (France). (Poster).

## **OUVRAGE**

Joannot, B., 2020, Guide de survie pour les soignants, Édition Lamarre.

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

Au cours des dernières décennies, le travail et les activités récréatives ont considérablement modifié nos habitudes, et augmenté la sédentarité des populations humaines (Choi, 2019). Il est désormais admis que l'utilisation des ordinateurs et des smartphones peut être à l'origine de troubles musculo-squelettiques se traduisant par des déformations posturales mais aussi des douleurs au cou et aux épaules (Choi, 2019). Des gestes répétitifs et le maintien prolongé de positions statiques affectent également la santé sur le long terme (Kett and Sichtung, 2020). Ces changements posturaux peuvent limiter certains mouvements et conduire à des adhérences fibreuses, se transformant à terme en pathologies chroniques, comme par exemple le syndrome de douleur myofasciale (Myers, 2013; Schleip and Baker, 2015). Ces adhérences fibreuses induisent des tensions musculaires et l'activation d'éventuels nodules musculaires, aussi appelés points gâchettes (Travell and Simons, 1983). Pour prévenir et traiter ces troubles, le massage est utilisé comme adjuvant au traitement conventionnel depuis des siècles en ciblant les tissus mous tels que les muscles, les tendons et les fascias, afin d'y appliquer des pressions (Schleip, 2003a; Guimberteau et al., 2016). Le massage manuel est aussi une méthode connue et pratiquée dans le milieu sportif. Ces « massages sportifs » ont pour but de préparer l'athlète à un effort physique en complément d'un échauffement traditionnel. Le massage manuel est utilisé dans d'autres circonstances comme par exemple à des fins de récupération. Pour autant, son usage n'est pas réservé uniquement au domaine clinique ou sportif. Il existe un troisième domaine d'application, le massage « bien-être ». Ce dernier peut être effectué par une tierce personne, par l'intermédiaire d'instruments pour une pratique autogène, ou encore à l'aide d'appareils motorisés. Au sein de ces trois catégories émerge une forme de massage encore peu explorée : le massage « robotisé ». Comme nous le verrons dans ce travail, il ne s'agit pas



d'un simple dispositif motorisé comme un fauteuil de massage effectuant des mouvements analytiques, mais bel et bien de conceptualiser des dispositifs visant à reproduire efficacement l'acte délivré par les professionnels de la santé et du bien-être. Ces robots de massage ont pour but d'être utilisables sur le plan clinique et esthétique. Ils n'ont pas pour objet de proposer un substitut de massage mais d'offrir des alternatives aux limitations des massages manuels ou autogènes.

Ce travail de thèse de doctorat, réalisé en partenariat entre l'Université Claude Bernard Lyon 1 et la société Capsix Robotics, avait pour objectif de caractériser les modèles de massages automatisables et d'étudier les effets physiologiques d'un système de massage robotisé autonome et interactif. Pour ce faire, quatre sous-objectifs ont été définis : i) répertorier dans la littérature les ressemblances et les différences entre massage manuel et massage autogène. Ces réflexions nous ont conduit à questionner le mode de contrôle d'action par la personne recevant le massage et les perspectives offertes par l'émergence du massage robotisé ; ii) mesurer l'influence du massage autogène intégré sur les performances sportives et la récupération, et l'efficacité des pressions glissées combinées aux routines classiques de massage autogène ; iii) mesurer l'influence d'un massage autogène et du massage manuel sur des marqueurs neurophysiologiques, comportementaux et psychométriques ; iv) évaluer l'efficacité d'un massage robotisé comparativement au massage manuel. Le premier chapitre présentera l'ensemble des connaissances actuelles relatives aux massages manuels, autogène et robotisé. Il sera question d'une chronologie retraçant les origines du massage robotique, afin de mieux cerner comment s'inscrit la réflexion et le travail de développement technologique dans ce secteur. Ce chapitre s'efforcera par ailleurs de présenter une approche conceptuelle du contrôle moteur induit par ces trois formes de massage. Cette réflexion novatrice a permis la publication

d'une revue de synthèse. La revue dresse l'état des connaissances actuelles relatives à chacune des formes de massage et rapproche chaque technique d'un modèle de contrôle moteur. Le second chapitre apportera un cadre méthodologique, clarifiera les variables dépendantes sélectionnées au cours des différents travaux expérimentaux. Dans ce chapitre, il sera question d'un système de massage robotisé, autonome et interactif testé au cours du projet de thèse. Cette partie est primordiale afin d'apprécier la complexité mais également le potentiel de ce système de massage robotisé, autonome et interactif. Les chapitres suivants sont consacrés aux expérimentations menées au cours du doctorat. Le troisième chapitre se concentrera sur le massage autogène. Il traitera de deux expérimentations. La première sera consacrée à l'évaluation de l'influence de la pratique du massage autogène sur les performances physiques au cours d'un entraînement visant le développement des qualités de force. Des mesures de charge de travail totale et de puissance musculaire ont été utilisées afin d'apprécier l'impact de l'intervention par massage sur les performances. Des mesures de la circonférence des cuisses et un suivi de la perception de l'effort furent également recueillies au cours de cette expérimentation. La seconde expérimentation du troisième chapitre s'intéressera aux effets des mouvements de pressions glissées, axiales ou transverses, intégrées aux routines de massage autogènes sur la température cutanée, les performances en souplesse et les sensations perçues. Le quatrième chapitre explorera les corrélats neurophysiologiques, notamment les rythmes cérébraux enregistrés par électroencéphalographie et la conductance cutanée, d'une intervention par massage manuel et massage autogène. Ce travail ouvrira des questionnements qui seront traités dans le cinquième chapitre. Il offre un lien entre les effets du massage autogène et la construction de routines de massage robotisé. Le cinquième chapitre sera consacré à l'étude d'un massage robotisé afin d'évaluer son efficacité, comparativement au massage manuel délivré par un masseur-kinésithérapeute expérimenté. Cette expérimentation se distingue par le

suivi des capacités psychophysiques du masseur-kinésithérapeute, massage après massage. Ces quatre expérimentations devaient permettre d'étendre les connaissances sur les différentes formes de massage et de caractériser leurs ressemblances et différences, avec pour questionnement majeur la possibilité d'envisager des systèmes de massages robotisés, autonomes et interactifs offrant des effets bénéfiques sur des indicateurs de performance et de bien-être. La discussion générale, dans le dernier chapitre du manuscrit, apportera des perspectives aux différents résultats expérimentaux. Seront envisagées limites, applications pratiques et perspectives du travail doctoral.

## **CHAPITRE 1 : REVUE DE LITTÉRATURE**

Ce travail de thèse avait pour objectif initial de caractériser les différentes formes de massages et de valider les bénéfices éventuels d'un système de massage robotisé, autonome et interactif. Pour mener à bien ce travail, il fut indispensable de connaître au préalable la littérature dédiée au massage manuel et celle, plus récente, concernant les massages autogènes et robotisés. De par les avancées techniques et technologiques, l'utilisation d'un robot collaboratif pour effectuer un massage semblait offrir de nouvelles opportunités et de nouveaux usages. Bien qu'hypothétique, car encore peu étudié, la suite de ce chapitre se consacrera à la présentation d'une approche conceptuelle fondée sur des théories empruntées au champ des neurosciences cognitives et du contrôle moteur. L'appétence que semblait présenter l'utilisation de ces systèmes de massages robotisés, autonomes et interactifs a fait l'objet d'une revue de synthèse adoptant une trame narrative comparable à celle développée dans ce chapitre (Kerautret et al., 2020).

La première partie présentera les origines du massage manuel ainsi que les caractéristiques des routines administrées dans les protocoles de recherche expérimentaux. Seront évoqués les outils d'évaluations neurophysiologiques, comportementaux et psychométriques, qui permettront de mettre en évidence les effets aigus et chroniques du massage. La deuxième partie conservera une trame comparable mais portera sur le massage autogène, approche de plus en plus répandue dans les milieux sportifs (Skinner et al., 2020). Cette partie débutera par la présentation de ses fondements théoriques et des modalités d'utilisation avant de basculer sur ses outils et ses effets. La troisième partie exposera les similitudes entre massage manuel et massage autogène. Elle questionnera également les différences fondamentales entre ces méthodes du point de vue des modalités de contrôle moteur qu'elles engagent pour la personne recevant le massage. Enfin, la quatrième et dernière partie

s'intéressera aux avancées technologiques qui semblent aujourd'hui permettre le développement de systèmes robotiques. L'émergence de la robotique collaborative, accentuant les possibilités d'interaction entre l'homme et la machine, permet d'établir un continuum conceptuel quant aux formes de contrôle moteur pour les participants recevant le massage qui ouvre de nouvelles perspectives tant en termes de questionnement que d'usages.

#### A. LE MASSAGE MANUEL

Le massage manuel est une méthode ancestrale dont les premières traces écrites remontent à 2598 av. J.C, date de la fin du règne de l'Empereur Chinois Huang Di, aussi connu sous l'appellation de l'Empereur Jaune. L'étymologie du mot « massage » prend ses racines du grec « massein », qui signifie frotter. Dès l'Antiquité, les vertues du massage manuel étaient reconnues. Dans ses écrits, Hippocrate recommandait l'usage du massage manuel à but thérapeutique, pour soigner ses patients. Fait marquant, la pratique du massage manuel en Grèce était réservée à la médecine pour soigner les blessures de guerre et traiter les sportifs (Goats, 1994). N'étant pas médecin, les guérisseurs qui utilisaient le massage manuel étaient considérés comme des charlatans. Cette différence de considération marquait le début d'un long conflit. D'autres différends sont par exemple relatés en France. Durant le Moyen-Age, les pratiques corporelles comme le massage manuel tombent sous l'emprise de l'Église. Ces méthodes sont alors proscrites et les savoirs n'évoluèrent plus (Macron, 2015). Ce ne fut qu'à partir de la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, suite à des réformes de l'État en faveur d'une nouvelle politique de santé, que

le massage réapparut<sup>1</sup>. Le terme de « masseur » intégrait alors le dictionnaire en 1779, ainsi que le verbe « masser », peu de temps après (Remondière, 1996). Jean-Dominique Estradère marqua cette période en publiant le premier ouvrage en langue française, intitulé « *Du massage, son histoire, ses effets physiologiques et thérapeutiques* » (Estradère, 1863). Au sens médical, l'auteur décrivait le massage comme étant :

«[l'] action d'une personne sur une autre, exercée au moyen de manipulations pratiquées dans le but de guérir une maladie ou de conserver la santé» (Estradère, 1863; Lardry, 2016).

Selon le même auteur, sur le plan empirique et purement physique, le massage s'apparentait à :

«L'art de pétrir le corps avec les doigts, de frictionner avec la main ou un instrument destiné à cet usage, de le percuter soit avec la main ou un instrument spécial et de faire exécuter aux articulations les mouvements qui leur sont propres, le tout dans un but hygiénique ou thérapeutique. La pression, la friction, la percussion et le mouvement, tels sont les quatre termes génériques des diverses manipulations qu'exerce le masseur» (Estradère, 1863; Lardry, 2016).

---

<sup>1</sup> Référentiel de la profession, Conseil national de l'Ordre des masseurs-kinésithérapeutes, Edition numérique de mars 2013

De cette manière, Estradère rétablit ainsi les mérites d’Hippocrate à propos du massage manuel. Dans son ouvrage, il tire parti des nouvelles connaissances scientifiques pour en préciser les bienfaits sur la peau, sur la circulation sanguine, le système nerveux, le système musculosquelettique ou encore les viscères (Estradère, 1863; Lardry, 2016). Néanmoins, les outils de mesure de cette époque restent limités. Il fallut attendre la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle avec le débuts des premières expériences scientifiques pour obtenir des réponses plus objectives sur les effets du massage manuel (Monet, 2003). Mais cet espoir n’était que de courte durée puisque peu de temps après, deux évènements historiques se sont succédés marquant un tournant de la pratique en France. Pour faire face à la Première Guerre mondiale (1914-1918), le massage manuel, autrefois réservé au corps médical, est désormais délégué à des auxiliaires sous la tutelle de médecins pour soigner les nombreux blessés et mutilés. Malheureusement, la période d’Entre-deux guerres fut l’occasion pour le corps hospitalier de renforcer son autorité dans ce domaine en médicalisant la pratique (Macron, 2015). Un nouveau drame social, la Seconde Guerre mondiale (1939-1945), permit au projet de loi n° 46.857 d’officialiser la création de la profession de masseur-kinésithérapeute. Toutefois, il fallut attendre son émancipation de la tutelle des médecins hospitaliers en 1968 pour voir le droit de pratiquer devenir réellement possible (Macron, 2015). Confronté à un conflit ardent avec le corps médical et en proie à un nouveau revirement de position, la profession de masseur-kinésithérapeute entreprit de se protéger sur le plan juridique. Plusieurs articles de loi ont ainsi été publiés dans le code de la santé publique comme en témoigne l’article R4321-1, dont la première version fut créée en 1996 :

*«La masso-kinésithérapie consiste en des actes réalisés de façon manuelle ou instrumentale, notamment à des fins de rééducation, qui ont pour but de prévenir l’altération*



*des capacités fonctionnelles, de concourir à leur maintien et, lorsqu'elles sont altérées, de les rétablir ou d'y suppléer. Ils sont adaptés à l'évolution des sciences et des techniques»* (Code de la santé publique - Article R4321-1, n.d.).

Ces deux catastrophes humaines et ce conflit eurent pour effet de ralentir, voire de paralyser, toutes recherches scientifiques et donc l'apport de nouvelles connaissances. Les expérimentations ne reprurent qu'à la suite de la loi hospitalière de 1991, et sous la condition d'être effectuées au sein des établissements de santé<sup>2</sup>. Depuis, la recherche s'est intéressée aux effets du massage manuel dit thérapeutique, mais également dans la sphère sportive, en étudiant son impact sur les performances des athlètes. Dans le premier cas, le massage thérapeutique a été testé comme adjuvant aux traitements conventionnels sur des personnes souffrant de pathologies comme la fibromyalgie, sur des personnes brûlées ou encore sur des tissus cicatriciels en phase post-opératoire (Ault et al., 2018). Le massage manuel était alors considéré comme une thérapie manuelle autant pour le corps que l'esprit. En témoignent les bénéfices obtenus sur des patients souffrant de démence ou de dépression (Field, 2016). En dehors du domaine clinique, le massage manuel utilisé dans le domaine sportif faisait l'objet de recherches dans les sciences du sport pour déterminer son influence sur la récupération et les performances des athlètes (Weerapong et al., 2005). Bien que ces deux types de massage manuel aient été appliqués dans des contextes distincts, ils reposaient sur une base de mouvements communs. Si certaines de ces manœuvres étaient décrites dès la Grèce antique par Hippocrate,

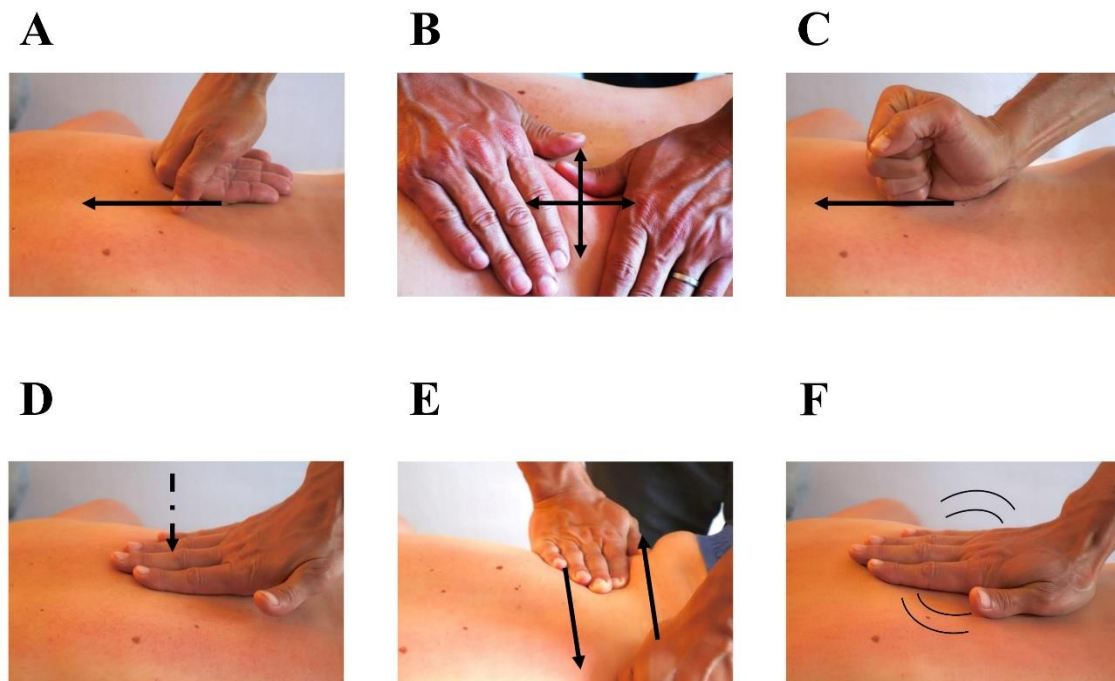
---

<sup>2</sup> Référentiel de la profession, Conseil national de l'Ordre des masseurs-kinésithérapeutes, Edition numérique de mars 2013

le répertoire gestuel ne sera complété et détaillé qu'en 1863 par le Dr. Estradère (Estradère, 1863).

## 1. Le répertoire gestuel

Le massage manuel se compose de nombreuses techniques comme l'effleurage, le pétrissage, la vibration, la percussion ou les pressions statiques et glissées (Weerapong et al., 2005, voir Figure 1).



**Figure 1.** Illustrations des techniques de massage manuel.

**A.** Effleurage. **B.** Pétrissage. **C.** Pression glissée **D.** Tapotement. **E.** Friction. **F.** Vibration.

Chacune d'entre elles stimule des mécanorécepteurs et des nocicepteurs présents dans les muscles, les tendons, les fascias et la peau (Schleip, 2003a, 2003b). De ce fait, bien que ces attributions soient essentiellement empiriques, ces techniques paraissent susceptibles d'induire

des modifications sur les plans biomécaniques, neurophysiologiques ou encore psychologiques (Weerapong et al., 2005). Par exemple, l'effleurage s'utilise couramment en début de séance dans le but d'élever la température cutanée et la circulation sanguine. En revanche, son utilisation en fin de séance a pour but de ramener l'organisme dans un état d'homéostasie. Ces mouvements glissés présentent la particularité d'être légers et fluides (Standley et al., 2010). À l'inverse, la friction nécessite plus de fermeté. Le praticien doit utiliser ses pouces et index pour progresser plus en profondeur afin de remodeler le tissu cicatriciel et libérer certaines adhérences. Ces manœuvres doivent être utilisées avec précaution car elles peuvent induire une réponse inflammatoire locale. De même, il convient au praticien, selon l'effet recherché, de choisir l'orientation de ces manœuvres en les effectuant dans l'axe ou au contraire perpendiculairement au sens des fibres (Standley et al., 2010). Le pétrissage consiste pour sa part à soulever, pétrir et compresser certains tissus afin de diminuer les adhérences et les spasmes musculaires, qui sont des contractions musculaires involontaires le plus souvent transitoires. Cette technique permet d'augmenter localement la circulation sanguine, ce qui a pour effet la réduction du gonflement musculaire. Parmi les autres manœuvres dont dispose le praticien, les tapotements, s'apparentant à de petites et rapides percussions, se réalisent de manière alternée avec les faces ulnaires de ses deux mains. Ces gestes répétés suscitent une réaction de vasodilatation locale et superficielle des capillaires. Enfin, la dernière technique pratiquée est la vibration. Cette dernière s'obtient par des secousses transversales de la masse musculaire pour favoriser une détente musculaire et un afflux sanguin. Elle est généralement réservée à des zones charnues et souples comme les muscles quadriceps (Standley et al., 2010). Dans l'ensemble, ces différentes techniques de massage sont accessibles à tous. Elles conviennent aux jeunes enfants, aux personnes âgées, et s'utilisent sur des non-sportifs aux athlètes de haut-niveau (Cafarelli and Flint, 1992; Calvert, 2002). L'utilisation du massage

manuel s'adapteaux patients souffrant de pathologies physiques et/ou mentales. Le choix des manœuvres diffèrent selon la population et l'effet désiré, donnant l'occasion à l'attribution d'une appellation de massage thérapeutique, massage sportif ou encore massage de bien-être (Bruno, 2014; Dufour et al., 2016). La pratique du massage est toutefois contre-indiquée pour certaines pathologies telles que le diabète, l'hémophilie, l'ostéoporose ou encore un cancer en phase évolutive en raison d'éventuelles complications et des risques encourus spécifiques à chaque pathologie. Pour ces raisons, un questionnaire de contre-indications est nécessaire avant toute intervention du praticien (voir Annexe 1).

## 2. Les effets aigus

Du fait de son ancienneté, la pratique du massage manuel soulève de nombreux questionnements scientifiques, notamment dans les sciences du sport. Les bienfaits sur le plan psychologique sont rapportés depuis des millénaires (Calvert, 2002). Il n'est donc pas étonnant que les premières mesures réalisées dans le cadre du massage sportif consistaient à recueillir des données subjectives aux moyens de questionnaires, d'échelles numériques et/ou analogiques. Ces variables faciles d'accès permettaient d'évaluer la qualité et la vitesse de récupération perçues à la suite d'un exercice physique. Nos recherches dans la littérature ont rapidement confirmé l'intérêt d'utiliser le massage manuel pour lutter contre les sensations de fatigue comparativement à une récupération passive (Mori et al., 2004; Robertson et al., 2004; Delextrat et al., 2013; Jourdain, 2015). D'autres études démontraient des effets encore plus intéressants sur le plan psychologique. Après avoir reçu un massage manuel, des individus souffrant d'anxiété ou de douleurs perçues bénéficiaient d'une amélioration soudaine de leur

qualité de vie (Leivadi et al., 1999; Sharpe et al., 2007; Carcano et al., 2010; Nakano et al., 2019). Cette observation s'expliquerait par un effet antalgique, temporaire, du massage manuel dû à l'épuisement des différents récepteurs périphériques à la douleur. De même, le massage induirait également la sécrétion de substances endorphiniques (Dufour et al., 2016). Toutefois, ce phénomène n'est que de courte durée. Sans une pratique régulière et la résolution en profondeur de l'origine des maux, les douleurs finissaient par réapparaître. Le massage manuel est donc une pratique empirique qui livre des effets immédiats quantifiables et reproductibles.

Pour approfondir les connaissances et dans le but d'objectiver d'autres effets du massage manuel, des mesures comportementales ont été progressivement intégrées dans les protocoles de recherches expérimentales. C'est le cas des mesures de souplesse. Parmi les plus répandues, le «*sit-and-reach*» et le test de flexion dorsale de la cheville en charge (Ayala et al., 2012; Powden et al., 2015) permettent l'évaluation du niveau de flexibilité. Ils se réalisent par des mesures en centimètres, contrairement à d'autres tests de flexibilité qui nécessitent l'utilisation d'un goniomètre. Le «*sit-and-reach*» est utilisé pour démontrer les gains immédiats au niveau de la chaîne myofasciale postérieure superficielle, i.e., à l'échelle d'une unique séance de massage (Arabaci, 2008; Arazi et al., 2012). Le test de flexion dorsale de la cheville en charge atteste de résultats positifs comparables après quelques minutes de massage (Iwamoto et al., 2016). Ces informations sont intéressantes pour les praticiens à la recherche de solutions de récupération rapides lors d'une perte d'amplitude articulaire occasionnée par l'exercice physique. Le massage manuel limiterait par exemple ce type de désagrément à la suite d'une marche lestée en descente sur tapis (Farr et al., 2002). Le massage post-effort réduirait les courbatures et limiterait la perte de force musculaire. Cependant, cette approche semblerait bien plus efficace si deux conditions étaient réunies. En effet, la durée du massage devrait être de 10

à 30 minutes et réalisé dans les 3 heures qui suivent l'effort physique (Smith et al., 1994; Tiidus and Shoemaker, 1995; Zainuddin et al., 2005; Mancinelli et al., 2006; Willems et al., 2009). Un massage manuel de 3 minutes par jambe serait insuffisant pour contribuer à la restauration des capacités physiques (McKechnie et al., 2007). Dans ces circonstances, le massage manuel en guise de récupération ne présenterait pas d'intérêt sur le plan scientifique. De même, lorsque la fatigue est moindre et les dommages musculaires quasi-inexistants, l'apport d'un massage manuel au cours de la période de récupération n'est pas clairement établi. Son usage devrait être réservé à certaines occasions comme lors d'épreuves compétitives à forte intensité. En examinant de plus près la littérature, il est possible d'observer des résultats contradictoires, ne facilitant pas les préconisations d'usage dans le domaine sportif. Cette hétérogénéité pourrait s'expliquer par le manque de reproductibilité des protocoles expérimentaux (Best et al., 2008; Brummitt, 2008). En fonction des études, les paramètres des protocoles de massage varient. Les durées effectives des massages peuvent fluctuer de 5 minutes à 30 minutes. Il en est de même pour les techniques de massage utilisées et les zones traitées (Best et al., 2008; Brummitt, 2008). Le manque de consistance dans les approches méthodologiques induit un biais scientifique pour l'analyse comparative des résultats. De même, il n'existe à ce jour aucun outil permettant d'apprécier les niveaux de pression et/ou la fréquence gestuelle des masseur-kinésithérapeutes de manière objective. De ce fait, entre l'hétérogénéité des protocoles expérimentaux et l'absence de suivi des paramètres intrinsèques à la pratique du massage, il n'est pas surprenant d'observer des effets mitigés du massage manuel sur la préparation à l'effort ou la récupération des capacités physiques.

Toutes ces données ont du sens pour les professionnels de la santé. Cependant, aucune de ces mesures ne permet de valider ou d'invalider les hypothèses émises à ce jour expliquant

les mécanismes sous-jacents à l'origine de ces effets. Fort de cet intérêt, certains auteurs se sont intéressés à des paramètres neurophysiologiques pour élucider la question et démêler les secrets du massage manuel. Dans ce domaine scientifique, des méthodes non-invasives et insavives ont été utilisées. Parmi les mesures non-invasives employées, citons l'électrocardiographie, l'électromyographie de surface, la tensiomyographie, l'électroencéphalographie, l'élastographie, l'oxymétrie colorimétrique, la sphygmomanométrie et la thermographie infrarouge. Ces techniques permettent d'évaluer les fonctions du tissu musculaire squelettique et cardiaque, l'activité cérébrale, l'élasticité du tissu biologique des tendons et des muscles, la saturation en oxygène d'hémoglobine, la pression artérielle ou encore la température cutanée. Les données répertoriées au moyen de ces outils de mesure ont démontré l'effet du massage sur l'augmentation de la température cutanée des personnes massées (Drust et al., 2003; Hinds et al., 2004). Ces résultats peuvent s'expliquer par un double phénomène lié à la friction des manœuvres sur la peau et à l'augmentation de la circulation sanguine locale. En effet, plusieurs études ont déjà constaté une amélioration de la circulation sanguine à la suite d'un protocole de massage (Arroyo-Morales et al., 2008; Wiltshire et al., 2010; Iwamoto et al., 2016). Toutefois, cette amélioration ne s'accompagnait pas systématiquement d'un changement de la fréquence cardiaque (Hemmings et al., 2000; Robertson et al., 2004; Pinar et al., 2012). D'autres travaux ont rapporté une baisse momentanée de la fréquence cardiaque ainsi qu'une élévation de la variabilité cardiaque (Delaney et al., 2002; Diego et al., 2004; Wiltshire et al., 2010). Du point de vue neuroscientifique, ces changements résulteraient d'une stimulation de l'activité du système nerveux parasympathique, le massage induisant une réponse favorable à un état de relaxation accrue (Hoffman et al., 1982). Cette hypothèse a été confirmée par des expérimentations menées sur l'influence du massage manuel sur l'activité cérébrale. En effet, en mesurant l'activité électrique du cerveau avant, pendant et après un massage manuel, des

chercheurs ont observé des modifications de la puissance de certaines oscillations neuronales. La puissance du signal dans la bande de fréquence delta (1-4 Hz) augmenterait tandis que celle des ondes alpha (8-13 Hz) et beta (13-35 Hz) diminuerait, ce qui caractériserait un état de relaxation accru (Jodo et al., 1988; Field et al., 1996b; Jones and Field, 1999; Diego et al., 2004). Au niveau des muscles squelettiques, la tensiomyographie a été privilégiée afin de caractériser l'impact du massage sur les propriétés contractiles des muscles (Hunter et al., 2006). Le massage manuel diminuerait la vitesse de contraction et, donc, la capacité de production de force des participants (Hunter et al., 2006). Cette baisse des performances s'expliquerait par une altération de l'architecture musculaire, affectant selon certains auteurs la relation force-longueur (Hunter et al., 2006). Due à la pression et aux différentes manœuvres exercées par le praticien, de brefs changements seraient observés sur la raideur musculaire (Hunter et al., 2006; Eriksson Crommert et al., 2015). À notre connaissance, il n'existe qu'une seule étude qui démontre un tel changement momentané de la raideur musculaire. Au moyen de l'élastographie, une technique d'imagerie médicale, des chercheurs ont observé une diminution de cette raideur musculaire à l'issue du traitement. Cependant, cet effet était de courte durée et ne dépassait pas un délai de trois minutes. Au-delà, plus aucun effet n'était observable sur les tissus (Eriksson Crommert et al., 2015). Parallèlement à ces approches méthodologiques, d'autres études ont privilégié les mesures invasives, comme le recueil d'échantillons sanguins ou salivaires et les prélèvements de tissu musculaire par biopsie. A partir des données recueillies par ce type de mesures, le massage manuel s'est révélé un traitement peu efficace pour réduire la lactatémie des participants à l'issue d'un effort intense (Hemmings et al., 2000; Hinds et al., 2004; Robertson et al., 2004; Ogai et al., 2008; Pinar et al., 2012). Autrement dit, le massage ne nuit pas à l'intensité de l'effort. Toutefois, bien que Smith et al. (1994) n'aient observé aucune amélioration notable sur la cortisolémie, d'autres



études apportent des résultats contradictoires démontrant les bénéfices du massage à l'échelle d'une séance de massage, ce marqueur hormonal du stress physiologique aurait diminué chez des populations saines et sportives, mais également chez les nouveaux nés de mère dépressives (Field et al., 1996a, 1996b; Leivadi et al., 1999). Fait intéressant, un simple effleurage effectué avec le dos de la main ne produirait pas de tels effets bénéfiques chez des adultes sains. Seul un massage complet, comme le massage suédois, offrant une diversité des techniques et des niveaux de pression, contribuerait à diminuer le niveau de cortisolémie (Rapaport et al., 2010, 2012). De même, le massage manuel diminuerait le niveau de concentration de certains marqueurs de l'inflammation systémique, e.g., cytokines, interleukines et les facteurs de nécrose tumorale (Rapaport et al., 2010; Crane et al., 2012; Rapaport et al., 2012). D'autres résultats attestent de l'utilité du massage en récupération pour réduire l'inflammation (White et al., 2020). Les effets du massage manuel ne s'arrêteraient pas là et pourraient même induire une libération d'endorphines (Kaada and Torsteinb, 1989). Enfin, même si ces résultats sont nuancés, il semble que les techniques de massage permettraient une diminution de l'activité enzymatique, e.g., créatine kinase concentration, après un effort physique (Smith et al., 1994; Zainuddin et al., 2005; Kargarfard et al., 2016). Toutefois, ces résultats restent contestés par des études plus récentes en raison du manque de normalisation des protocoles d'exercice et de récupération (Hemmings et al., 2000; Hinds et al., 2004; Robertson et al., 2004; Ogai et al., 2008; Cupido, 2010; Jakeman et al., 2010; Wiltshire et al., 2010; Pinar et al., 2012). En conclusion, les athlètes de haut niveau ainsi que les personnes non-sportives bénéficieraient d'effets positifs du massage manuel y compris à la suite d'une seule séance. Si les bénéfices ne sont pas systématiques entre les études, les effets observés représentent une source d'information utile pour guider les masseur-kinésithérapeutes dans l'élaboration des protocoles de massages et du choix des techniques à privilégier.

### 3. Les effets chroniques

A l'instar des études consacrées aux effets aigus, les études sur les effets chroniques du massage manuel sont peu nombreuses. Avant de poursuivre plus loin, il convient de préciser qu'un effet aigu dans le domaine du massage se mesure à l'échelle d'une séance de massage. Les effets du massage sont observés durant quelques minutes, quelques heures parfois, après le massage. Les effets chroniques font quant à eux références aux changements observés à la suite d'une période de 2 à 6 semaines et comprenant une fréquence de 2 à 5 massages par semaine. Du fait de cette complexité, de rares expériences ont recueilli des variables dépendantes neurophysiologiques, comportementales et psychométriques comparables aux effets aigus. À partir des données de la littérature, une ou deux séances de massage manuel hebdomadaires sur une durée de 4 à 6 semaines contribueraient efficacement à améliorer la qualité de vie des participants (Leivadi et al., 1999; Sharpe et al., 2007; Jourdain, 2015). Plusieurs études ont en effet constaté une diminution du niveau de stress perçu, de dépression, d'anxiété, de fatigue perçue et de douleur chez des sportifs et non-sportifs (Field et al., 1996b; Leivadi et al., 1999; Sharpe et al., 2007; Wu et al., 2014; Jourdain, 2015; Kaur, 2019). Il semblerait que le massage soit également en mesure de réduire la fréquence des pleurs et facilite l'endormissement des nouveaux-nés (Field et al., 1996a). Les différentes techniques de massage procureraient donc un sentiment de vitalité accrue et une amélioration du niveau d'humeur et de l'estime de soi (Rho et al., 2006). Toutefois, les résultats décrivant les effets d'une utilisation régulière du massage manuel sur les qualités physiques sont restreints. Seule la mesure de l'amplitude articulaire a fait l'objet de quelques recherches. Les résultats obtenus sur le long terme ont démontré une amélioration. Fait intéressant, il semblerait que cet effet soit plus marqué chez les personnes souffrant d'un déficit d'amplitude de mouvement et/ou d'incapacités motrices

résiduelles (Leivadi et al., 1999; Yang et al., 2012; Kaur, 2019). En effet, à raison de deux séances de massage par semaine, des patients souffrant de raideurs et de dysfonctionnements au niveau de l'épaule ont pu bénéficier d'une amélioration de la mobilité de la ceinture scapulaire (Yang et al., 2012). De même, l'application régulière de massage sur des patients souffrant de cervicalgie s'est traduite par une diminution de la douleur et une amélioration de la mobilité du cou (Kaur, 2019). Ces effets sont encourageants mais doivent être confirmés et approfondis sur des populations asymptomatiques. Il paraît également important d'étudier les effets sur d'autres articulations. Enfin, le massage manuel n'a fait l'objet d'aucune recherche à long terme. En dépit de preuves avérées, nous posons l'hypothèse qu'une application régulière pourrait avoir une influence positive sur les qualités physiques des sportifs, notamment en favorisant la récupération. Notre revue de synthèse, accompagnée de ces tableaux récapitulatifs, n'a pas la prétention de répondre à chacun de ces questionnements. En revanche, il convient néanmoins d'informer le lecteur sur ce travail approfondi qui a le mérite de mettre en exergue l'insuffisance des données actuelles (Kerautret et al., 2020).

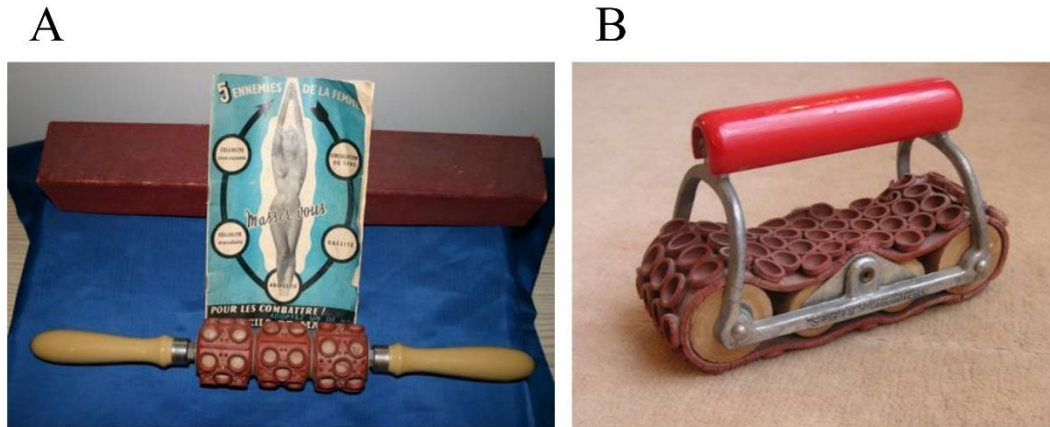
## B. LE MASSAGE AUTOGÈNE

Aussi appelé relâchement autogène, ou encore auto-massage, le massage autogène consiste à se masser soi-même à l'aide d'un outil. Selon la définition du dictionnaire Larousse, le terme « auto-» est un préfixe issu du grec autos, signifiant soi-même, lui-même (*Petit Larousse Illustré*, 2020). Le massage autogène est une méthode constituée de différentes techniques, sans l'intervention d'une tierce personne. En pratique, les mains représentent l'outil le plus commode. En effet, de manière quotidienne ou presque, nous réalisons à titre individuel

des gestes de massage autogène, de manière sporadique. Parmi ces exercices instinctifs et naturels, il est possible d'évoquer le massage des yeux au réveil. De même, lors d'un mal de tête insistant, il est commun d'exercer de légères pressions circulaires sur les tempes afin d'estomper les douleurs. Il en va de même lorsqu'une personne se brûle, se cogne. Pour dissiper la douleur, il suffit de frictionner énergiquement la zone atteinte. Cette stratégie de neuromodulation fait référence à un processus connu sous le nom de « théorie du gate control » qui permet d'obtenir une analgésie localisée (Melzack, 1996). Les manœuvres de massage autogène stimuleraient le recrutement d'interneurones inhibiteurs des cornes postérieures de la moelle, diminuant l'activité des cellules de transmission de la douleur aux centres supérieurs. Néanmoins, pour intensifier ces manœuvres et augmenter la surface de traitement, divers outils ont été inventés. En effet, à l'image du Centre Français de Documentation et de Recherches sur les Massages<sup>3</sup> (CFDRM), où d'anciens outils sont conservés, il semble que les premiers instruments de massage furent disponibles lors de la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle en France (Figure 2).

---

<sup>3</sup><http://www.cfdrm.fr>



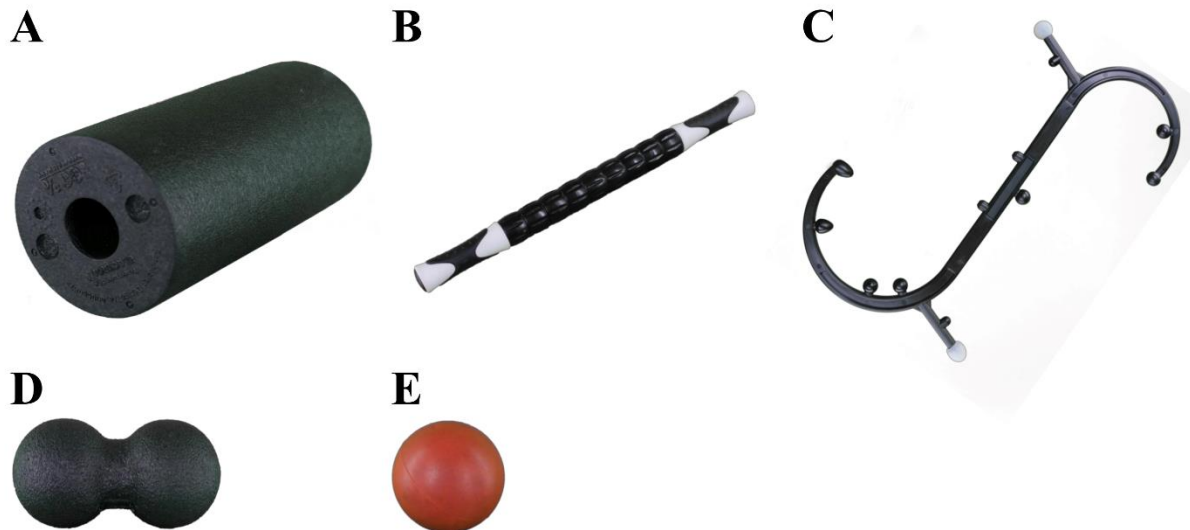
**Figure 2.** Illustrations d'anciens outils de massage autogène.

**A.** Le pétrisseur « Point-by-roller ». **B.** Tank Spirex.

Ces outils se sont démocratisés depuis une quinzaine d'années. De ces techniques découlent les termes anglophones de « *foam rolling* » et de « *self-myofascial release* ». Ces mots ont donné naissance au terme français de massage autogène pour décrire cette pratique utilisant divers outils comme le rouleau, le bâton, la canne ainsi que la balle de massage simple ou double (Figure 3). Le mot myofascial se compose donc du préfixe *myo*<sup>4</sup> d'origine grecque référant à muscle et de l'adjectif fascial relatif aux fascias.

---

<sup>4</sup><https://www.universalis.fr/dictionnaire/myo/>



**Figure 3.** Illustrations des outils de massage autogène actuels.

**A.** Rouleau de massage. **B.** Bâton de massage. **C.** Canne de massage. **D.** Balle double de massage. **E.** Balle simple de massage.

Le massage autogène est utilisé dans le milieu sportif tant pour l'échauffement qu'en récupération. Il s'agit d'une technique simple à mettre en œuvre et peu coûteuse. Toutefois, au même titre que le massage manuel, la pratique du massage autogène est contre-indiquée pour certaines pathologies (Annexe 1). Ces exercices de massage autogène obéissent à certaines règles et consignes d'utilisation. En effet, il est conseillé de ne traiter que les zones charnues. Les zones dépourvues de tissus mous, comme les rotules, les condyles, les tubérosités osseuses et les côtes flottantes, sont donc à proscrire. Pour chaque groupe musculaire, il existe différents exercices et postures selon l'outil utilisé et le niveau de pression recherchée. Le principe commun à tous ces exercices consiste à exercer une pression sur les tissus mous. Avec un rouleau de massage, cette pression est exercée à l'aide du poids du corps en effectuant des mouvements d'aller-retour. Avec le bâton ou la canne, il est nécessaire d'avoir recours à la

force des membres supérieurs. Concernant l'intensité des exercices, il est recommandé de ne jamais dépasser le seuil de tolérance à la douleur. A partir d'une échelle numérique de la douleur comprise entre 0 («pas de douleur»), et 10 («douleur maximale imaginable»), 7/10 est le seuil à ne pas dépasser (Dębski et al., 2019; Hendricks et al., 2019). L'examen de la littérature fournit un cadre en termes de durée de massage, de fréquence et de vitesse de roulement, pour induire des effets. Une durée comprise entre 30 s et 120 s par groupe musculaire semble suffisante afin d'induire des effets(Dębski et al., 2019). De même, la fréquence gestuelle doit être comprise entre 10 et 60 mouvements par minute (Bradbury-Squires et al., 2014; Halperin et al., 2014; Mohr et al., 2014; Peacock et al., 2015; Behm et al., 2018).

## 1. Les différentes techniques

Le massage autogène est connu le plus généralement sous sa forme dynamique, qui consiste à faire rouler son corps par des allers-retours sur un rouleau ou une balle de massage. Pour obtenir des résultats similaires à l'aide d'un bâton ou d'une canne de massage, il suffit d'exercer la pression et les mouvements avec la force des bras. Cette seconde configuration est certes plus coûteuse du point de vue des ressources physiques et attentionnelles, mais permet un meilleur ajustement du niveau de pression. Les mouvements d'allers-retours s'effectuent communément dans l'axe proximo-distal. L'objectif est de couvrir la portion complète de chaque groupe musculaire, de son origine à sa terminaison. Depuis peu, certains protocoles expérimentaux proposent une option alternative pour faciliter le massage de groupes musculaires imposant comme le quadriceps. Cette solution consiste à diviser le groupe musculaire cible selon deux portions égales, une première dite « proximale », et une seconde dite « distale » (Cheatham et al., 2017a; Cheatham and Baker, 2017; Cheatham and Kolber,

2018). En utilisant cette technique, l'amplitude des manoeuvres est restreinte ce qui permet de garantir de meilleures postures et un meilleur contrôle du niveau de pression sur le rouleau lors de la pratique. Cette technique d'allers-retours se réalise le plus souvent de manière longitudinale avec un rouleau. Toutefois, avec une balle de massage, il est également possible d'exécuter des mouvements transversaux et/ou circulaires suivant les zones. De même, les utilisateurs ont la possibilité de réaliser une compression ischémique. Cette technique consiste à exercer une pression statique sur un point sensible. En pratique, après avoir identifié une zone sensible au cours d'allers-retours, il est préconisé de s'arrêter sur le point douloureux pour masser localement plus longtemps. Le principe est de maintenir la pression durant une trentaine de secondes jusqu'à ressentir le relâchement des tissus. Pour compléter la compression ischémique, des études se sont intéressées à l'ajout de mobilisations articulaires (Cheatham and Stull, 2018a, 2018b, 2019). Cette combinaison, encore peu courante, consiste à mobiliser de manière volontaire l'articulation sur laquelle le muscle massé s'insère tout en maintenant une pression ischémique. Encore plus récemment, de nouvelles techniques de massage ont émergé avec le développement de matériel motorisé. L'intégration de moteurs aux outils de massage a permis de bénéficier de la vibration, par le biais de petits mouvements d'oscillations rapides sur les tissus mous (Larousse, 2021a; Figure 4). Aussi, depuis quelques années, les pistolets de massage se sont popularisés et bénéficient de la technique de percussion (Figure 4). Ces instruments délivrent le choc d'un corps dur contre un autre corps (Larousse, 2021b), les petits chocs répétés étant exercés par l'effecteur de l'appareil sur les tissus mous afin de produire une action de percussion. Suivant les fabricants, ces appareils proposent diverses fréquences de percussion à la minute, qui oscillent traditionnellement entre 1 000 et 3 200 coups à la minute.





**Figure 4.** Illustrations des outils de massage autogène vibrants.

**A.** Rouleau de massage vibrant (Booster set, Blackroll). **B.** Bâton de massage vibrant (Releazer, Blackroll). **C.** Balle de massage vibrante (Compexmolecule™, Compex). **D.** Pistolet de massage vibrant (Auto-masseurcompex FIXX™).

## 2. Les effets aigus

Le massage autogène est un sujet de recherche récent, qui suscite toutefois un intérêt grandissant. En effet, depuis ces quatre dernières années, il est possible de constater une forte augmentation du nombre d'articles publiés sur cette thématique. Cette effervescence permet d'apporter un éclairage scientifique solide sur les effets de cette technique, avec une grande diversité de protocoles expérimentaux. À l'échelle d'une séance, le massage autogène offrirait de nombreux bénéfices. Les différentes variables étudiées dans ce domaine ont largement été influencées par le massage manuel. Il est donc, de fait, logique de retrouver des mesures neurophysiologiques, comportementales et psychométriques. Comme pour le massage manuel, les variables psychométriques ont été recueillies au moyen de questionnaires et d'échelles subjectives analogiques. Ces mesures ont permis d'estimer l'évolution des sensations de récupération et de bien-être. L'utilisation d'un algomètre a permis de compléter ces données par l'évaluation du seuil de sensibilité/douleur à la pression au niveau musculaire et articulaire

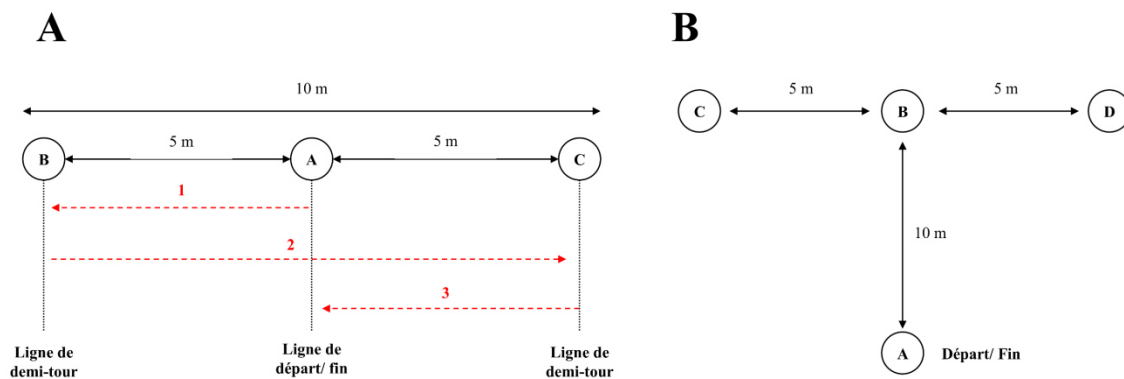
(Fransoo, 2009). Les résultats sont sans équivoque, puisque comme pour le massage manuel, cette technique de massage autogène réduirait les sensations de douleur musculaire (Aboodarda et al., 2015; Chan et al., 2015; Gordon et al., 2018; Grieve et al., 2013). Les individus présentant des points gâchettes dans le tissu myofascial pourraient ainsi bénéficier d'une baisse des douleurs perçues (Hanten et al., 2000; Gulick et al., 2011; Wilke et al., 2018). Toutefois, les effets du massage autogène sur la récupération resteraient dépendants de certaines conditions d'utilisation. En effet, en l'absence d'une fatigue importante ou de courbatures, les exercices de massage ne semblaient induire aucun bénéfice (Peacock et al., 2015; Kalén et al., 2017; Beier et al., 2019). Seules les études comprenant un protocole de nature à induire des dommages musculaires ont constaté un effet du massage autogène, dans lequel les participants rapportaient à l'issue de l'intervention des douleurs musculaires réduites (MacDonald et al., 2014; Pearcey et al., 2015).

Concernant les mesures comportementales, l'amplitude de mouvement et la flexibilité musculaire sont des variables courantes dans ce domaine de recherche. Selon les articulations ou les groupes musculaires, les chercheurs disposent de plusieurs tests fonctionnels, parmi lesquels le test du sit-and-reach pour mesurer la souplesse rachidienne et des ischio-jambiers (Ayala et al., 2012; Mayorga-Vega et al., 2014). Selon les études, le test de la distance doigt-sol est utilisé (Ayala et al., 2012), tandis que le test de flexion dorsale de la cheville en charge permet d'apprécier l'influence du massage des fléchisseurs plantaires. Ce test présente la particularité d'être évalué par mesure centimétrique ou par goniométrie (Powden et al., 2015). Cette méthode est utilisée également pour le test de l'élévation de la jambe tendue lorsqu'il s'agit d'évaluer la souplesse des ischio-jambiers en mesurant l'angle de fermeture de hanche (Davis et al., 2008). Pour tous ces tests et malgré l'hétérogénéité des protocoles, les résultats

sont là encore sans équivoque puisque les routines de massage autogène démontrent une efficacité certaine. Que l'outil utilisé soit un rouleau, un bâton ou une balle de massage, des progrès immédiats sur l'amplitude de mouvement et la flexibilité ont été constatés (Sullivan et al., 2013; Halperin et al., 2014; Cheatham et al., 2015; Fairall et al., 2017; Le Gal et al., 2018; Guillot et al., 2019). Cette amélioration serait toutefois de courte durée : les gains obtenus s'estomperaient au-delà de 10 à 20 min après le dernier exercice de massage autogène (Halperin et al., 2014; Hodgson et al., 2019; Monteiro et al., 2019). Fait intéressant pour les professionnels de la santé et les préparateurs physiques en charge de la réathlétisation, le massage autogène aurait la faculté de produire un effet controlatéral. En effet, la dorsiflexion de la jambe contrôle, non-traitée, a été améliorée jusqu'à 10 min après l'intervention (contre 20 min pour la jambe ipsilatérale ; Kelly and Beardsley, 2016; Ye et al., 2019). Durant ce délai, un second phénomène fut enregistré : l'utilisation de ces outils sur les tissus ne se limiterait pas uniquement à un effet local. Dans une étude comprenant trois groupes distincts, les participants devaient effectuer un exercice de relâchement de 4 minutes. Le premier groupe avait pour consigne de traiter les deux voûtes plantaires, tandis que les deux autres devaient se focaliser respectivement sur les muscles ischio-jambiers et la région suboccipitale. À l'issue de l'expérience, tous les participants avaient amélioré de manière comparable leur performance au test de sit-and-reach, démontrant l'existence d'un effet non-local de cette technique sur la chaîne myofasciale arrière (Jung et al., 2017).

Tout comme pour l'évaluation des effets du massage manuel, il est possible de recueillir la performance lors de tests physiques de terrain afin de quantifier l'impact d'une routine de massage autogène. Deux types de tests sont principalement utilisés à ce jour dans les protocoles de recherche : le countermovement jump pour la détente verticale et le broad jump pour la

détente horizontale (Mikesky et al., 2002; Peacock et al., 2015; Abrantes et al., 2019). Afin d’apprécier les performances de force maximale du haut du corps, le développé couché est également utilisé (Peacock et al., 2014, 2015), tandis que pour les membres inférieurs l’exercice d’extension de genou sur machine est le plus administré (MacDonald et al., 2013; Behara and Jacobson, 2017). Selon les protocoles, la vitesse de course peut être mesurée avec des sprints dont la distance peut aller de 5 à 40 m, tandis que l’agilité s’évalue par le « Pro agility test » ou le « T-test » (Peacock et al., 2014; Phillips et al., 2018; Richman et al., 2019, voir Figure 5). Le « Pro agility test » est un sprint chronométré en navette avec des changements de direction à 180°. Dans les faits le « T-test » est comparable. Néanmoins, il se distingue par des courses en marche avant, en pas-chassés et à reculons. Les changements de direction varient entre 90° et 180° pour former un « T » (Figure 5).



**Figure 5.** Illustrations des tests d’agilité.

**A.** Test "Pro agility test". **B.** Test du "T-test"

Enfin, même si les études sont moins nombreuses à s’intéresser à ce paramètre, le Y-balance test constitue un test d’évaluation fréquent (Lee et al., 2018). Contre toute attente, les effets du massage autogène sur les différentes qualités physiques, mesurées par ces tests

fonctionnels, sont divergents et ne permettent pas d'établir un réel consensus (Cole, 2018; Hendricks et al., 2019). Certaines études ont rapporté une amélioration des qualités de force, de puissance, d'explosivité ou encore d'agilité (Peacock et al., 2014; Terada and Nakatani, 2018; Lyu et al., 2020), alors que d'autres ne montraient aucun changement (Fama and Buetti, 2011; Grabow et al., 2018). Ces différences pourraient s'expliquer par le manque de reproductibilité des expérimentations. En effet, suivant les protocoles, les tests de terrain et/ou les routines de massage autogène diffèrent (Cole, 2018). Malgré l'absence d'effet positif systématique, contrairement aux étirements passifs, le massage autogène n'a induit aucun effet délétère sur les performances (Lee et al., 2018; Lyu et al., 2020). Pour ces raisons, l'utilisation de rouleau ou de bâton de massage reste intéressante à l'échauffement pour continuer à bénéficier, à minima, d'effets établis sur la flexibilité.

Des outils et méthodes de recueil de corrélats physiologiques et neurophysiologiques sont également utilisés. Ces mesures révèlent que l'effet du massage autogène sur la température cutanée n'est pas systématique. Une première étude utilisant un rouleau de massage n'a montré aucun effet notable (Murray et al., 2016), alors qu'une augmentation a été observée après massage avec une balle de tennis et un bâton (Gordon et al., 2018; Rivera et al., 2019). Ces effets corroborent certaines observations déjà enregistrées sur d'autres marqueurs hémodynamiques. En effet, le massage autogène permettrait l'amélioration de la fonction endothéliale vasculaire (Okamoto et al., 2014), ainsi qu'une réduction de la raideur artérielle et une augmentation de la circulation sanguine artérielle (Thistlethwaite et al., 2016; Hotfiel et al., 2017). Une étude récente a par ailleurs mis en évidence l'efficacité de cette pratique sur la réduction de la pression sanguine (Lastova et al., 2018). Au niveau du système musculaire, l'électromyographie de surface et la tensiomyographie ont montré que le massage autogène

n'induirait aucune modification de l'activité des muscles ainsi que de leurs propriétés contractiles (Martínez-Cabrera and Núñez-Sánchez, 2016; Murray et al., 2016; Hodgson et al., 2018; Madoni et al., 2018). Comparativement à un échauffement dynamique, un traitement de 2 minutes des muscles droits fémoraux et grands fessiers n'a induit aucune altération de l'activité musculaire (Beier et al., 2019). Ces résultats ont été confirmés sur les muscles fléchisseurs plantaires, quadriceps et ischio-jambiers (Mazzei, 2019), bien que certaines études rapportent respectivement une augmentation ou une réduction de l'activité musculaire (Romero-Moraleda et al., 2017; Macgregor et al., 2018). Concernant l'impact de la pression du rouleau de massage sur les propriétés contractiles des muscles, les données actuelles restent peu nombreuses. Néanmoins, sur cet aspect de l'appareil locomoteur, deux études récentes ont conclu que le massage autogène n'avait aucun effet délétère (Martínez-Cabrera and Núñez-Sánchez, 2016; Schroeder et al., 2017). En effet, les propriétés contractiles du muscle rectus femoris restaient inchangées entre la jambe controlatérale et ipsilatérale (Murray et al., 2016). L'imagerie par ultrasons offre l'opportunité d'étudier plus spécifiquement l'organisation et l'architecture musculaire des effecteurs. Dans une étude portant sur les fléchisseurs plantaires, l'angle de pennation, la longueur des fascicules, ainsi que l'épaisseur et la section transversale du muscle ont pu être étudiés. Les résultats ont montré que la pression exercée par le rouleau de massage ne modifiait pas les propriétés intrinsèques de ces muscles (Casanova et al., 2017). L'utilisation d'une balle de massage n'a également eu aucune influence sur l'épaisseur du tissu cutanée, que ce soit chez de jeunes adultes ( $25 \pm 3$  ans) ou des adultes d'âge moyen ( $45 \pm 5$  ans) (Capobianco et al., 2019). Bien que de plus larges études soient nécessaires, ces données préliminaires témoignent du caractère inoffensif de cette technique. Dans une perspective prophylactique, une étude récente préconise toutefois que le traitement de la région suboccipitale devrait se faire à l'aide d'une balle souple (Kim et al., 2019). Les radiographies

des cervicales ont en effet mis en évidence une moindre tension des muscles périphériques et une meilleure extension des cervicales avec une balle souple. Une balle dure, de même diamètre, augmentait les sensations d'inconfort des participants en raison d'une plus forte compression des tissus mous (Kim et al., 2019). En conclusion, le massage ne semble pas nuisible à l'intégrité physique des utilisateurs, ce qui contredit les mises en garde formulées par certains auteurs (Freiwald et al., 2016a, 2016b). Néanmoins, par précaution, il est recommandé d'utiliser des outils souples et une pression modérée, notamment pour les zones les plus sensibles. Enfin, les connaissances neuroscientifiques dans ce domaine restent limitées à ce jour. La littérature ne fait mention que d'une seule étude s'intéressant aux variations du système nerveux autonome par le biais de la variabilité de la fréquence cardiaque. Les résultats ont montré que les participants ayant complété 15 minutes de massage autogène avaient bénéficié d'une diminution temporaire de l'équilibre sympathovagal. En effet, les fréquences basses du système nerveux sympathique diminuaient tandis que les fréquences hautes du système nerveux parasympathique augmentaient (Lastova et al., 2018). Le massage autogène induirait donc une réponse favorable à la relaxation sur des personnes saines. Toutefois, l'enregistrement de ces données étant resté limité à 30 minutes, il est difficile de conclure sur la durée effective réelle du massage.

### 3. Les effets chroniques

Au même titre que les effets aigus, des expérimentations se sont intéressées aux effets chroniques d'une pratique régulière du massage autogène. En raison de la complexité et de la lourdeur des protocoles expérimentaux, les données attestant des effets chroniques du massage autogène restent peu nombreuses. Il existe par ailleurs une forte disparité entre les routines,

relatives à la durée du massage, à la zone ciblée et à l'outil utilisé. Selon les études, la durée d'investigation s'étend de 5 jours à 8 semaines, avec une fréquence d'application du massage quotidienne ou hebdomadaire. Malgré ces différences, les données semblent démontrer l'efficacité du massage autogène. Une expérience a par exemple été menée chez de jeunes joueurs de tennis de niveau avancé présentant un déficit de l'articulation gléno-humérale en rotation interne et une sensation d'instabilité sur le bras dominant. Après 5 semaines d'intervention, les exercices de massage autogène ont contribué à réduire l'instabilité et le déficit gléno-huméral, sans pour autant se substituer à un échauffement standard. En effet, le traitement des muscles infra-épineux et pectoral était réalisé en complément d'un échauffement standard à raison de 3 fois par semaine (Le Gal et al., 2018). Des bénéfices comparables ont été observés chez des coureurs et des cyclistes présentant un syndrome de la bandelette ilio-tibiale. L'utilisation bi-hebdomadaire d'un rouleau de massage s'est révélée efficace pour atténuer les douleurs symptomatiques, au repos comme à l'effort. D'autres travaux ont montré que des programmes d'exercices à domicile incluant cette technique étaient bénéfiques pour diminuer les douleurs perçues chez des patients présentant des points gâchettes myofasciaux et souffrant de fibromyalgie (Hanten et al., 2000; Grieve et al., 2013; Chan et al., 2015; Lee et al., 2017). Après 40 séances, les patients ont attesté, par questionnaire, le recul de leur état dépressif conjugué à une diminution des émotions négatives. Percevant moins de douleurs, les participants manifestaient par ailleurs une meilleure qualité du sommeil et une moindre fatigue. Tous ces progrès ont contribué à améliorer la qualité de vie de ces patients (Ceca et al., 2017, 2020).

Plusieurs travaux ont en outre montré les effets prometteurs du massage autogène sur l'inconfort perçu, comparativement à une médication par ibuprofène. En effet, la douleur



attribuée aux points gâchettes et la sensibilité à la pression du haut du dos étaient significativement réduites après une pratique quotidienne de 10 minutes de massage autogène, sur une période de 5 jours (Wamontree et al., 2015a, 2015b, 2016). Sans chercher à substituer le massage aux traitements conventionnels, cette technique offrait de nouvelles opportunités de soulagement faciles d'accès et peu coûteuses. Comparé aux exercices avec un rouleau de massage, l'intervention d'un chiropracteur sur des personnes souffrant de fibromyalgie resterait toutefois la méthode la plus efficace (Else, 2016). Au-delà d'une amélioration de la qualité de vie des patients souffrant de douleur myofasciales, l'utilisation régulière du massage autogène à domicile comme adjuvant au traitement conventionnel pourrait devenir une alternative dans certaines situations à la médication systématique. Plus hypothétique encore, des bénéfices comparables pourraient être obtenus par une pratique régulière de massage autogène dans le cadre de la résolution de douleurs chroniques, et non pas uniquement sur des crises aiguës.

Pour compléter ces résultats, des recherches se sont intéressées aux effets d'une pratique régulière de massage autogène sur des variables comportementales comme l'amplitude articulaire, la flexibilité et les performances physiques. Les études s'intéressant aux effets chroniques du massage sur la flexibilité ont principalement été orientées sur des populations présentant des déficits. Sans surprise, les résultats ont montré des bénéfices certains avec une pratique régulière, d'autant plus significatifs lorsque le massage était réalisé en complément d'un échauffement conventionnel ou d'étirements statiques (Mohr et al., 2014; Le Gal et al., 2018). Par exemple, des jeunes joueurs de tennis sont parvenus à améliorer l'amplitude articulaire gléno-humérale du bras dominant de 19,4% en moyenne sur les mouvements de rotation interne. Les joueurs avaient intégré, pendant 5 semaines, quelques exercices de massage autogène avec une balle de tennis en fin d'échauffement (Le Gal et al., 2018). Des

gains similaires ont été observés sur des participants présentant des limitations lors du mouvement de flexion de hanche jambe tendue. Après deux semaines de protocole et à raison de trois séances par semaine, les participants qui avaient réalisé un massage autogène à l'aide d'un rouleau sur les ischio-jambiers ont vu leur flexibilité s'améliorer (Mohr et al., 2014). L'âge et le sexe ne seraient donc pas des facteurs prédictifs, et, tout comme le massage manuel, cette technique serait bénéfique pour tous types d'utilisateurs. Au-delà des gains de flexibilité, des exercices avec rouleau de massage ont contribué au recouvrement de certaines aptitudes fonctionnelles. En effet, après 8 semaines de test, les scores de « *Functional Movement Screen* » (*FMS*) se sont nettement améliorés (Boguszewski et al., 2017). Même si ces résultats nécessitent d'être confirmés, le massage autogène présente l'avantage d'être peu coûteux et simple d'utilisation, en faisant une alternative de choix pour améliorer la flexibilité et la mobilité. Les praticiens soucieux de leurs patients pourraient également profiter de ces massages en proposant des programmes de réhabilitation en cabinet, mais aussi et surtout à domicile. À ce jour, nous n'avons toutefois relevé qu'une étude destinée à évaluer les effets sur les qualités physiques des sportifs (Hodgson et al., 2018). L'objectif de cette expérimentation était de comparer l'efficacité du massage en fonction de sa fréquence d'utilisation (3 vs. 6 fois par semaine, sur une durée de 4 semaines). Contre toute attente, aucune de ces deux conditions expérimentales n'a eu d'effet sur les performances de détente verticale des participants. Ces résultats méritent d'être approfondis et testés dans des conditions et avec des publics différents. En particulier, de futures études restent nécessaires pour mieux identifier les effets à long terme des massages autogènes et déterminer des préconisations d'usage pour les praticiens, les athlètes et les entraîneurs.

### C. DE LA RESSEMBLANCE AUX DIFFÉRENCES

L'étude des effets du massage manuel et du massage autogène a révélé de nombreuses similitudes, les deux approches induisant des effets aigus comparables. Dans une moindre mesure, et malgré une littérature moins fournie, des effets chroniques proches ont été observés. Cette congruence s'explique principalement par la nature des deux pratiques, qui engagent selon des modes distincts l'application de pressions sur les tissus mous. La pression des mains du praticien sur la peau, comme celle produite par les outils de massage, stimulent des organes et tissus semblables. Par ce biais, elles activent les mêmes mécano-nocicepteurs dont certains sont impliqués dans la régulation du tonus, et d'autres dans la proprioception ce qui permet de détecter les changements subtils de pression, de force tangentielle et du toucher (Schleip, 2003a, 2003b; Wilke et al., 2020). De ce fait, cette pression exercée sur les mécano-nocicepteurs serait susceptible de déclencher des afférences qui modulent l'activation du système nerveux autonome, équilibrant les sorties sympathique/parasympathique vers les muscles (Schleip, 2003a; Behm and Wilke, 2019; Wilke et al., 2020). De même, il est possible que cette pression induise un contrôle inhibiteur diffus de la nociception (CIDN), facilitant l'accoutumance à l'inconfort (DeBruyne et al., 2016). Ce sont précisément ces mécanismes qui seraient à l'origine d'une augmentation du bien-être. Ces deux techniques permettraient de diminuer de manière comparable la perception de douleur (aiguë et chronique), en élevant le seuil de sensibilité de la douleur à la pression. Elles contribueraient par ailleurs à augmenter temporairement l'amplitude articulaire et la flexibilité, sans induire en contrepartie des effets négatifs sur les performances physiques. Au contraire, elles permettraient même dans de nombreuses études d'obtenir des bénéfices, même si l'absence de protocoles longitudinaux à fort niveau de validité scientifique impose de rester prudent quant à l'interprétation et la généralisation de tels effets.

Du point de vue pratique, le massage manuel et le massage autogène sont deux méthodes distinctes. En effet, la durée d'un massage manuel est généralement comprise entre 15 et 30 minutes (Standley et al., 2010). Ce délai s'explique par le temps de mise en place d'un cadre propice à la détente (Strub, 2013), le massage manuel trouvant son sens dans une vision holistique du corps (Calvert, 2002; Bruno, 2014). Il n'a donc pas pour habitude de se focaliser sur une seule partie du corps : plusieurs groupes musculaires sont massés et diverses techniques peuvent être utilisées sur chaque zone, ce qui augmente la durée totale d'une séance (Standley et al., 2010). A contrario, comme en témoignent la plupart des études portant sur le massage autogène, seul un ou deux groupes musculaires sont ciblés lors des interventions, qui durent de 30 à 120 secs (Dębski et al., 2019). Cette technique se rapproche donc davantage d'une conception analytique du fonctionnement de l'appareil locomoteur. Le massage autogène prête le plus généralement son attention sur les zones où les restrictions sont les plus fréquentes et les adhérences les plus nombreuses. Bien entendu, une routine complète du corps reste possible et de ce fait, une intervention de massage autogène peut osciller entre 30 secs et 20 minutes de temps effectif, selon le but recherché (Pearcey et al., 2015; Boguszewski et al., 2017). Un second facteur qui différencie les deux techniques réside dans le contexte qu'elles imposent aux participants qui reçoivent le massage. Au cours d'une séance de massage manuel, la personne massée se retrouve dans une position allongée. Elle est en quelque sorte spectatrice de l'acte dévivié par le praticien, qui est seul à la manœuvre et contrôle le bon déroulement du massage. Dans le cas d'une session auto-administrée avec rouleau ou bâton de massage, l'utilisateur devient son propre décideur. Dans cette configuration, l'individu peut choisir de son propre chef le niveau de pression en temps réel, en fonction de ses besoins. Il est donc mis à contribution et nécessite des choix et mouvements volontaires.

À notre connaissance, il n'existe à ce jour aucune approche conceptuelle questionnant le mode de contrôle moteur dans lequel s'inscrit la personne massée. Pourtant, il semble exister une distinction fondamentale en fonction de la nature du massage. En effet, lors d'un massage manuel, la personne massée est passive, généralement allongée sur une table de massage en décubitus ventral ou dorsal. Ce sont les mains du praticien qui exercent une pression sur les tissus mous. Ces manœuvres conservent donc une part d'aléatoire ne permettant pas véritablement d'anticipation de la part de la personne massée. Dans cette configuration, cette dernière se positionnera dans un mode de contrôle rétroactif, construit sur l'intégration continue des retours sensoriels (Hasegawa et al., 2001). Même si le participant reste en mesure d'ajuster son tonus musculaire, ce mode de contrôle d'action rétroactif demeure dominant (Braver, 2012). Au contraire, lors d'un massage autogène, c'est l'utilisateur qui exerce la pression, à l'aide d'un outil. Dans ces circonstances, la personne est active et doit anticiper les actions et les conséquences sensorielles correspondantes, s'inscrivant principalement dans un mode de contrôle proactif. Ces opérations volontaires impliquent des modélisations directes et indirectes ne dépendant pas des rétroactions sensorielles (Cervin et al., 2002). Dans le cas d'un rouleau ou d'une balle massage, la personne utilise son poids de corps, tandis qu'avec un bâton de massage elle doit fournir davantage d'efforts en mobilisant la force des membres supérieurs. Dans les deux cas, l'utilisateur exerce un contrôle proactif, même s'il lui est possible d'ajuster les manœuvres au moyen d'opérations rétroactives si le besoin se fait ressentir. Contrairement au massage manuel, il existe donc une part d'anticipation lors du massage autogène, certainement en raison des copies d'efférences dérivées des modèles prédictifs de l'action (Wolpert and Flanagan, 2001). Ces deux types de massage, aux modes d'action fondamentalement opposés, ne semblent offrir aucun compromis. L'utilisateur peut en effet difficilement migrer d'un mode d'action vers un autre. Parmi les alternatives envisagées, la

robotique représente un choix de premier ordre pour offrir au niveau le plus fondamental des modes de pratique du massage alternatifs. Les progrès technologiques de ces dernières années et l'apparition de robots collaboratifs laissent effectivement présager de tels usages. La nouvelle génération de robot permettrait de combiner les spécificités des différentes formes de massage, manuel et autogène. Leur autonomie, ainsi que leur capacité d'interaction en temps réel avec les utilisateurs, offrent des perspectives séduisantes sur la réconciliation des modes de contrôle de l'action dans lesquelles les personnes massées s'inscrivent lors des soins.

## D. LE MASSAGE ROBOTIQUE : UN PARADIGME ÉMERGENT

### 1. L'instrumentalisation du massage

Avant d'évoquer spécifiquement la robotisation du massage et les perspectives offertes par les progrès technologiques, il convient de présenter les différentes étapes qui l'ont précédé. Utilisé tout d'abord pour traiter le choléra, le GuaSha tient ses origines de la Médecine Traditionnelle Chinoise (Nielsen, 2014). Cette pratique consiste à contusionner le patient à l'aide de grattoirs. Comme son nom l'indique, en chinois, «Gua» signifie «gratter, frotter» et «Sha» signifie «maladie» (Nielsen, 2014). Dans le domaine du massage manuel, ces appellations sont plus répandues sous les termes de «pression profonde» et de «friction». Toutefois, bien que les gestes soient similaires, le GuaSha se distingue par une pression nettement supérieure pouvant induire des pétéchies, sortes de tâches de couleur rouge, brune ou violette dues à la sortie d'un peu de sang de petits capillaires sanguins sous la peau. Cette intensité est rendue possible par la densité des ustensiles et de la surface de contact, souvent restreinte. Ces premiers outils étaient confectionnés à partir d'os, de corne de buffle ou encore

de pierre de jade (Nielsen, 2014). Le GuaSha s'apparente, de ce fait, à la première forme d'instrumentalisation du massage justifié par le contexte et l'état des connaissances sanitaires de l'époque. Plus récemment, les méthodes de robotisation se sont démocratisées chez les kinésithérapeutes, avec de nouveaux outils ciblant la mobilisation des tissus mous assistés par instrument (MTMAI). Le but principal était la mobilisation des tissus cicatriciels et des adhérences myofasciales (Cheatham et al., 2016). David Graston, précurseur dans ce domaine, a ainsi inventé la Technique de Graston<sup>®</sup>, puis la Sound Assisted Soft Tissue Mobilization (SASTM) (Silbaugh, 2013). La technique de Graston<sup>®</sup> se servait initialement d'outils en acier inoxydable avant d'être remplacée par une version plastique pour la SASTM. Depuis, d'autres appellations ont été proposées : Técnica Gavilán<sup>®</sup>, Hawk Grips<sup>®</sup> et FAT-Tool<sup>™</sup> (Figure 6).



**Figure 6.** Illustrations des outils de mobilisation des tissus mous assistée par instrument.

**A.** Gua Sha. **B.** Graston Technique<sup>®</sup>. **C.** Sound Assisted Soft Tissue Mobilization<sup>™</sup>. **D.** Técnica Gavilán<sup>®</sup>. **E.** Hawk Grips<sup>®</sup>. **F.** FAT-Tool<sup>™</sup>.

Du fait de résultats quelquefois contradictoires selon les outils et les techniques utilisés, Cheatham et al. (2016) ont émis une réserve quant à leur réelle efficacité. Toutefois, des études récentes semblent confirmer l'utilité de ces techniques MTMAI sur l'augmentation d'amplitude articulaire et la réduction des douleurs aiguës chez les patients souffrant de troubles musculo-squelettiques (Park et al., 2016). Comparativement à un massage autogène du quadriceps, la technique de MTMAI s'est révélée plus efficace pour améliorer l'amplitude articulaire. Les gains obtenus sur le genou et la hanche étaient de 10% et 19% contre 5% et 9% avec l'utilisation d'un rouleau de massage. Vingt-quatre heures après l'intervention de MTMAI, un effet résiduel de 7% sur le genou et 13% sur la hanche était également constaté (Markovic, 2015). D'autre part, des gains de flexibilité équivalents ont été observés après traitement des ischio-jambiers par massage vibrant, massage manuel léger ou par la technique de Graston (Koumantakis et al., 2020). Lee et al. (2020) ont aussi constaté ces effets aigus et résiduels, que ce soit après traitement par la technique de Graston ou l'utilisation d'un bâton de massage jusqu'à 48h (Lee et al., 2020). Enfin, Sandrey et al. (2020) ont récemment confirmé l'intérêt d'une pratique régulière des techniques de MTMAI et de massage autogène. Après seulement 3 semaines et à raison de 2 fois par semaine, les participants voyaient leur amplitude du genou améliorée de manière équivalente. Autre résultat observé, ces deux traitements induisaient un déplacement du fascia au niveau des muscles biceps et droit fémoral (Sandrey et al., 2020). En conclusion, les techniques de MTMAI apparaissent comme une solution offrant des bénéfices comparables au massage manuel et au massage autogène. Cette forme d'instrumentalisation du massage, qui consiste à remplacer la main du praticien par un outil externe, ne semble pas compromettre ses effets sur les indices psychométriques. Les participants déclaraient être satisfaits par les deux méthodes de traitement en termes de confort ressenti et d'efficacité perçue. Il semblerait que l'instrumentalisation du massage offre l'opportunité aux praticiens de produire une pression



importante à moindre effort. Avec les progrès techniques et technologiques, la pratique du massage continue d'évoluer de manière régulière vers une robotisation plus marquée.

## 2. De la mécanisation à la motorisation du massage

Les techniques d'instrumentalisation du massage précédemment évoquées, si elles accompagnent ou simplifient l'acte délivré par le praticien, ne permettent pas de s'y substituer et nécessitent son intervention. D'un autre côté, bien que le massage autogène démontre d'une certaine efficacité, il ne représente pas une solution optimale autonome et interactive. En effet, l'expertise du kinésithérapeute y est absente et sa mise en œuvre requiert une dépense d'énergie non négligeable de la part de l'utilisateur. Aussi le massage autogène présente l'intérêt d'être personnalisable, certaines zones comme le dos n'en reste pas moins difficile d'accès. Pour tenter de palier ces limitations, le domaine des techniques de massage a progressivement connu une importante évolution impulsée par les développements technologiques. Poussée par la révolution industrielle du XVIII<sup>e</sup> siècle, est apparu le phénomène de mécanisation (Rioux, 2014). Ce processus a été marqué par le remplacement de tâches manuelles par l'utilisation de machines des suites de la transition démographique. Dans le domaine du massage, cette mutation a eu lieu à la fin du XIX<sup>e</sup>- début du XX<sup>e</sup> siècle, où de nombreux appareils ont été inventés. Parmi ces innovations, il est possible d'évoquer le Pulsoconn<sup>5</sup>. Inventé en 1890 par le Dr. Macaura, cet appareil de massage vibratoire était composé d'un carter, d'un système d'engrenages, d'un volant d'inertie et de trois concusseurs (Petitdant, 2018, voir Figure 7).

---

<sup>5</sup><https://ehive.com/collections/5051/objects/397820/vibrator>

Comme la majorité des inventions de cette époque, cet appareil visait en premier lieu à améliorer le confort des praticiens en minimisant la fatigabilité et la pénibilité des techniques vibratoires, jusqu'alors manuelles. A l'aide de ce dispositif, le thérapeute peut désormais se concentrer de faire tourner un simple volant d'inertie.



**Figure 7.** Illustrations d'un outil de massage mécanique et de deux dispositifs électromécaniques.

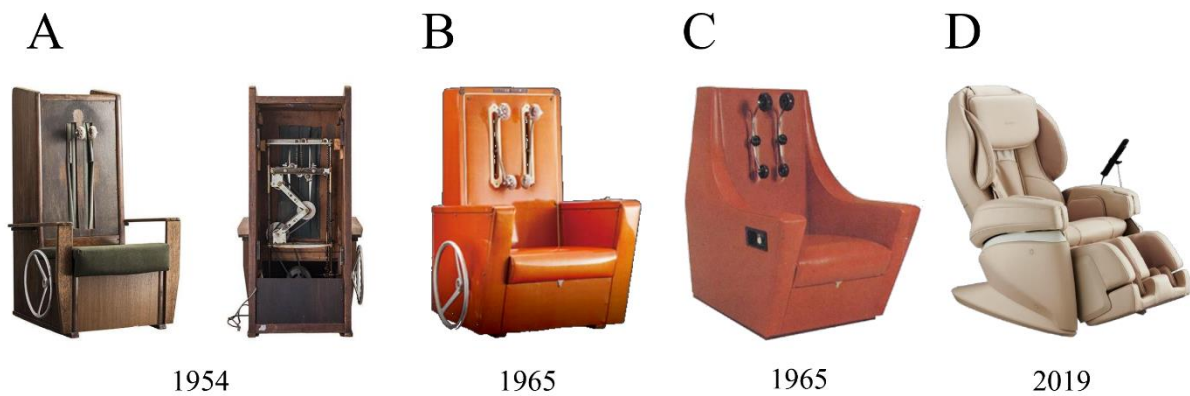
**A.** Pulsoconn et ces trois concusseurs (avec l'accord de Bernard Petitdant et du CPHR). **B.** Masseur-roller « Vigorator ». **C.** Masseur vibratoire « Maspo ».

Dans un même registre est apparu au Japon en 1954 le premier fauteuil massant mécanique (Figure7)<sup>6</sup>. Bien que ces dispositifs soient prometteurs, leur utilisation nécessitait encore l'intervention d'une tierce personne. Pour ces raisons, une seconde vague d'inventions a exploré la possibilité de concevoir des appareils « électromécaniques » autonomes, c'est-à-dire dotés de moteurs électriques. La présence systématique d'un praticien au cours du massage

---

<sup>6</sup><https://www.fujiiryoki.com/en/history/>

n'était plus indispensable, en raison de l'ajout d'un micro contrôleur et d'algorithmes. De nouvelles techniques ont alors vu le jour, à l'instar de la vibration. Le premier modèle de fauteuil massant électrique de Nobuo Fujimoto fut commercialisé pour le grand public en 1975, avant de devenir le modèle AS-2000 d'aujourd'hui (Figure 7). Ce massage motorisé standardisé a marqué un tournant dans la démocratisation des systèmes robotiques de massage. En effet, progressivement ces appareils sont apparus dans les instituts de beauté ainsi que dans certains foyers.



**Figure 8.** Illustrations des différentes versions de fauteuil massant fujiiryoki.

**A.** 1er fauteuil massant, le Fuji. **B.** A1. **C.** MOTHER FM-52. **D.** AS-2000.

Parmi ces appareils novateurs, le H2O Body system<sup>®7</sup> et le wellsystem<sup>™8</sup> sont des lits de massage bien-être se distinguant par l'application de la pression au moyen de jets d'eau (Figure 8). Durant cette même période du XX<sup>e</sup> siècle, la compression pneumatique a fait son apparition (Figure 8). Toutefois, les résultats scientifiques associés à ces différents dispositifs sont restés mitigés. En effet, comparativement à une récupération passive, plusieurs études ont souligné leur inefficacité (Zelikovski et al., 1993; Viitasalo et al., 1995; Poppendieck et al., 2016; Kabore and Kaux, 2017). De même, malgré la présence d'une commande de contrôle sur ces appareils, les ajustements permis pour les utilisateurs restaient sommaires et peu ergonomiques (Golovin et al., 2018). Le principal paramètre modifiable était l'intensité des pressions exercées.

---

<sup>7</sup><http://www.insideluxuryhotels.fr/info/h2o-body-system-massage-complet-corps.htm>

<sup>8</sup><https://www.time4wellness.de/wellsystem-ueberwasser-massage-relax-plus-hydro-jet.html>



**Figure 9.** Illustrations de dispositifs motorisés.

**A.** Cellu M6®. **B.** H2O Body system®. **C.** Wellssystem™. **D.** Normatec Pulse 2.0 leg recovery.

La motorisation a par la suite gagné les cabinets de kinésithérapie. A l'image du Cellu M6®, des dispositifs de massage motorisé guidés se sont développés (Figure 9). Le Cellu M6®, inventé en 1986 par Louis-Paul Guitay, fondateur de la société française LPG Systems®, se distinguait par la mécanisation du geste de palper-rouler dans le contexte de l'anti-cellulite (Yin Xiaoqin&Xu Yonggen, 2010; Mezencevová et al., 2017). Celui-ci est réalisé à l'aide d'une action concomitante d'aspiration et de rotation de deux rouleaux à des vitesses différentes, créant ainsi un bourlet de peau au cours de son déplacement. Contrairement à d'autres appareils automatiques, ce type d'instrument n'avait pas la faculté de fonctionner de manière autonome. C'est grâce à l'intervention du praticien qui guide la tête de l'appareil que le Cellu M6® est capable d'assurer l'efficacité du traitement. Dans ce contexte, le kinésithérapeute se démarquait par une individualisation des trajectoires et restait l'unique décideur du protocole. Pour les professionnels, ce type de dispositif permettait toutefois de palier à la fatigue liée à la répétition des gestes de massage. Ces outils participaient ainsi indirectement à la préservation de leur santé sur le long terme. En effet, certaines études ont souligné la prévalence importante de

troubles musculo-squelettiques chez les professionnels, en raison notamment de la surexposition à des postures inconfortables et à la répétition des manœuvres. La répétabilité de la pratique du massage occasionne notamment des douleurs aux pouces et des troubles musculosquelettiques au niveau des poignets, des épaules, du cou et du dos (Albert et al., 2008; Suryanarayanan Murali et al., 2014; Rossetini et al., 2016). D'un point de vue conceptuel, avec ou sans dispositif d'accompagnement motorisé, l'individu massé demeure passif au cours du massage. Il s'en remet aux programmes définis par la machine ou à l'expertise du praticien, il n'a donc aucun pouvoir de décision ou d'ajustement sur le massage. De ce fait, le mode de contrôle privilégié s'apparente donc à celui identifié au cours d'un massage manuel, à savoir le mode de contrôle rétroactif. Bien qu'imparfaite, cette motorisation a malgré tout offert de nouvelles solutions de massage. Limitée par des moyens techniques, elle a ouvert une nouvelle ère pour la robotisation des massages, tant sur le plan conceptuel que technologique. L'avènement du massage robotisé a depuis considérablement progressé. Cette version moderne du massage s'apparente à une approche enrichie du massage mécanisé avec des gestes qui restent répétitifs mais programmés. Les manœuvres deviennent également évolutives puisqu'il est désormais possible d'en superviser la pression exercée. Néanmoins, la variété des trajectoires fait que l'utilisateur ne peut anticiper les manœuvres du robot, laissant entrevoir de cette configuration hybride une nouvelle expérience utilisateur sensori-motrice stochastique. Aussi par l'association des nouveaux systèmes de captation et de calculs 3D, les systèmes de massages robotisés peuvent prétendre à la personnalisation du massage en prenant compte la morphologie de chaque individu. Ce sont ces mêmes outils qui offrent des possibilités augmentées d'interactivité entre l'homme et la machine. Au-delà du simple contrôle de l'intensité, les innovations permettront peut-être aux utilisateurs d'arrêter le robot sur une zone spécifique afin de profiter de pression statique. Rien n'exclut la possibilité d'ajouter une

fonction chauffante à l'effecteur et ajustable à la convenance de chaque utilisateur. Sans toutefois remplacer les professionnels, ces systèmes de massages robotisés semblent à première vue la seule voie d'accès à une utilisation à grande échelle. Guidée par la loi de l'offre et la demande l'expansion du massage robotique laisse entrevoir une utilisation régulière par son coût plus attractif.

### 3. Le challenge de la robotisation du massage

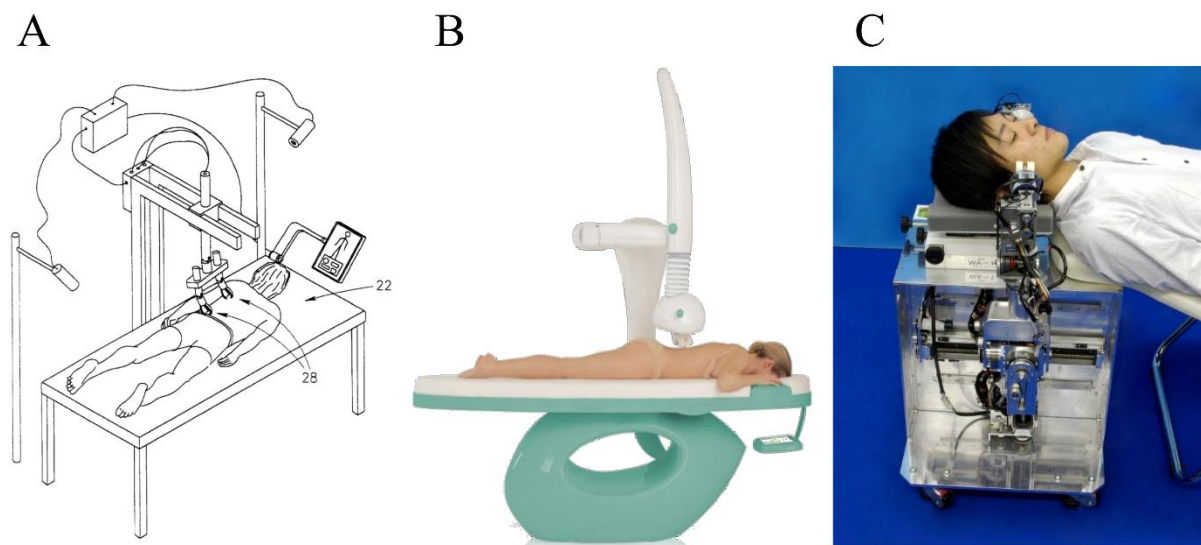
#### a) La standardisation, une limite

À notre connaissance, le massage robotique date de 1998, impulsé par un projet universitaire russe<sup>9</sup>. Peu de temps après, un brevet israélien est déposé, mais le projet demeurera sans suite (Nissim, 2001, voir Figure 10). Les chercheurs russes parviennent alors à fabriquer un prototype en état de marche. Ce robot est capable de suivre les courbures morphologiques de chaque utilisateur. Cette avancée majeure s'explique par la présence d'un système de compliance qui génère un effort constant, déterminé par la raideur du ressort. Toutefois, malgré cette innovation prodigieuse, ce projet n'a jamais franchi le cap de la commercialisation. Les raisons de cet échec sont multifactorielles. En effet, bien que de nouveaux domaines d'ingénierie se multiplient à cette époque, les difficultés techniques restent importantes. Parmi les complications rencontrées, le positionnement et l'amplitude des gestes du robot en fonction de la morphologie constitue certainement l'un des freins majeurs (Golovin et al., 2018).

---

<sup>9</sup><http://medicalrobot.narod.ru/articles.html>

De même, il est possible que les coûts élevés des développements robotiques soient un facteur limitant (Golovin et al., 2018). Enfin, reste l'acceptabilité de telles systèmes de massage robotisé, autonome et interactif par les communautés professionnelles et d'utilisateurs. Par exemple, les créateurs du robot Dreamtouch ne sont pas parvenus à vendre leur robot auprès des masseurs-kinésithérapeutes français malgré un prototype bien avancé (Crisan, 2009, 2010, voir Figure 10).



**Figure 10.** Illustrations d'un concept et de deux projets de massage robotisé.

**A.** « Human touch massager ». **B.** Dreamtouch. **C.** WAO-1.

Malgré ces déconvenues, d'autres projets de développements robotiques ont connu davantage de succès, notamment dans le domaine médical. Poussé par le manque évident de praticiens au Japon et la recrudescence de patients souffrant de troubles de l'articulation



temporo-mandibulaire et de sécheresse buccale, le projet de robot WAO-1<sup>10</sup> a vu le jour (Waseda Asahi Oral Rehabilitation Robot 1) (Takanishi et al., 2008, 2009, voir Figure 10). Ce robot, conçu pour le massage des muscles temporaux et masséters, est issu d'une collaboration entre la société Asahi Roentgen et les Universités Waseda et Asahi. Afin d'évaluer son efficacité, plusieurs études ont montré qu'une seule séance de massage robotisé permettait d'atténuer les douleurs musculaires de manière immédiate. De même, ce massage robotisé améliorerait les sensations perçues de confort, de chaleur, et augmenterait les sensations perçues en matière de motricité de la mâchoire (Ariji et al., 2009a, 2009b; Obokawa et al., 2009; Ariji et al., 2010, 2015). Parmi ces expérimentations, aucune mesure répétée n'a été réalisée. Ces données ne permettent pas d'établir la durée effective de ces effets dans le temps. Toutefois, il est intéressant de remarquer que malgré une augmentation de la production de salive chez les patients, le massage manuel d'un docteur serait plus efficace que celui prodigué par le robot, avec notamment une plus grande stimulation des glandes parotides (Koga et al., 2008; Ishii et al., 2009).

Dans le massage traditionnel, l'évaluation de la pression est souvent considérée comme un facteur subjectif directement déterminé par le praticien. Dans le cadre du massage robotique, la détermination objective de ce paramètre est essentielle pour le bon fonctionnement et la caractérisation de l'acte de massage. De ce fait, plusieurs études ont examiné l'effet de différents niveaux de pression distincte afin de déterminer la pression idéale. Pour les muscles masséter et temporaux, la pression oscillait entre 100 g à 1.5 kg (Koga et al., 2008; Ariji et al.,

---

<sup>10</sup><http://www.takanishi.mech.waseda.ac.jp/top/research/oral/index.htm>

2009a, 2009b; Ishii et al., 2009; Obokawa et al., 2009; Solis et al., 2009; Arijji et al., 2010; Hiraiwa et al., 2013). La pression avoisinant les 800 g a été considérée comme la plus efficace pour recouvrer les fonctions motrices de la mâchoire. Dans la continuité de ce processus de robotisation, d'autres robots ont alors contribué à diminuer les douleurs lombaires, en abaissant la fréquence cardiaque ou en réduisant l'activité musculaire (Peng et al., 2010; Luo and Chang, 2011; Lei Hu et al., 2013). Une expérience serait même parvenue à objectiver des marqueurs de relaxation à l'issue du massage robotisé, avec une baisse de la puissance des oscillations bêta et une hausse de la puissance des ondes alpha. Au cours de cette étude, 14 canaux ont été choisis sur la base du système international 10-20 : AF3, AF4, F7, F8, F3, F4, FC5, FC6, T7, T8, P7, P8, O1 et O2. Les emplacements P3 et P4 servaient de référence et le taux d'échantillonnage était de 128Hz. Pour mesurer l'influence du massage, des enregistrements de 3 minutes étaient réalisés avant et après chaque intervention (Luo et al., 2016). Toutefois, en raison de la petite taille de l'échantillon, ces résultats méritent confirmation. Comparativement aux fauteuils massants, les robots utilisés dans ces expérimentations présentaient l'intérêt d'être automatisés et avaient la faculté d'épouser les courbures du corps. Cette capacité restait imprécise en raison du manque de développement technologique. Aucune amélioration n'a pu être proposée concernant les facultés d'interactions entre le robot et l'utilisateur. Par exemple, il n'était pas possible de prendre en considération les différences individuelles relatives au seuil de tolérance à la pression. L'utilisateur ne pouvait pas non plus ajuster la pression suivant ses propres besoins, limitant de fait l'interactivité homme-machine. Dans ces circonstances, il était impossible de parler d'individualisation du massage. Les personnes massées conservaient donc une posture passive durant le massage, impliquant une nouvelle fois un mode de contrôle principalement rétroactif. Pour autant, nous pouvons considérer qu'il s'agissait là des prémisses des systèmes de massages robotisés, autonomes et interactifs actuels. La prise en compte des

paramètres individuels des usagers et la mise en place d'un dispositif d'interaction représenteraient des points d'améliorations majeurs et des enjeux considérables pour l'individualisation du massage, permettant de mettre en exergue de nouvelles facettes du massage robotisé. L'éventualité d'une personnalisation en temps réel avec le robot laisse envisager de nouvelles formes de massage robotisé autogène, avec comme assise théorique la possibilité d'engager les utilisateurs dans différents modes de contrôle de l'action.

### **b) Les nouvelles perspectives de la cobotique**

Depuis le milieu des années 90 est apparue une nouvelle branche de la robotique appelée robotique collaborative ou encore «cobotique» (Claverie et al., 2013; Kleinpeter, 2015). Cette technologie transdisciplinaire a emprunté des compétences propres à la robotique telles que la mécanique et l'électronique, mais également l'informatique et la programmation. Son domaine de compétence s'est étendu également aux sciences cognitives et à la biomécanique (Claverie et al., 2013; Kleinpeter, 2015). Comparativement à la robotique traditionnelle, la cobotique se destine à l'optimisation des interactions possibles entre l'individu et la machine, dans le but d'atteindre un objectif commun. De ce fait, son fonctionnement se fonde sur la coopération d'un robot avec l'humain, et non plus son simple remplacement. L'émergence de la cobotique a été possible par des avancées techniques et technologiques majeures, avec de nouveaux robots dits «collaboratifs» ou «cobots». Selon le dictionnaire Petit Larousse, un cobot est un :

*«Robot non autonome, travaillant en collaboration directe avec un humain, en vue d'augmenter sa productivité et de réduire la pénibilité de ses tâches» (Petit Larousse Illustré, 2020).*

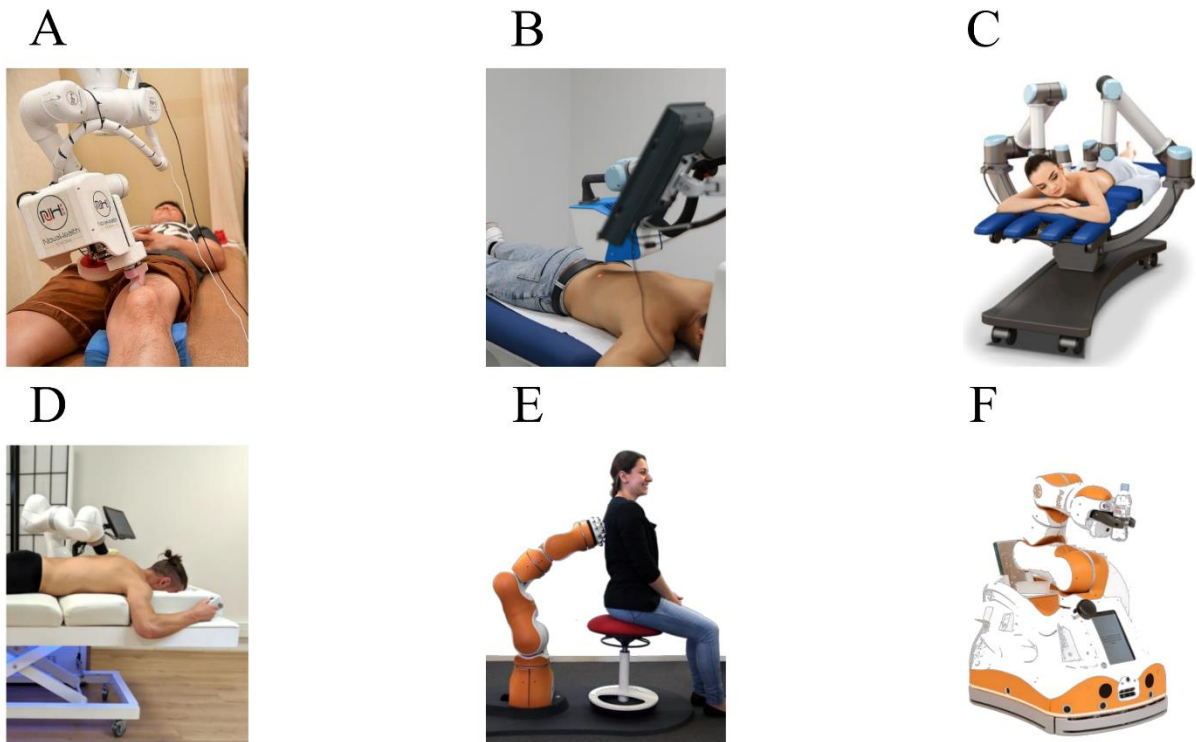
Forts de leurs attributs, ces cobots ont rapidement intéressé les professionnels pour imaginer de nouveaux usages. En effet, comparativement aux anciennes générations de robots, les robots collaboratifs sont relativement plus petits, légers et faciles à programmer. Ils sont également moins énergivores. Les principaux facteurs expliquant cette expansion restent le coût d'achat bien moindre et leur programmation simplifiée, alors que la présence de nombreux axes couplés aux servomoteurs leur offre la liberté de réaliser de multiples tâches avec aisance. Enfin, certains cobots (comme le Kuka LBR iiwa ou le FANUC CRX-10iA) intègrent des capteurs de force redondants qui autorisent des interactions sécurisées, ainsi que des déplacements avec une régulation PID (proportionnel, intégral, dérivé), ce qui élargit le champ des possibles. Le chemin historique vécu autour de l'automatisation du massage, couplé à l'arrivée des robots collaboratifs, a conduit à l'émergence de plusieurs projets de massage « cobotisé » au cours des cinq dernières années. Par exemple, depuis 2015 la startup singapourienne AiTreat a développé son projet de robot de massage thérapeutique spécialisé dans le « Tui Na » (Figure 11). Bien que ce robot, appelé EMMA, utilise certains principes de l'intelligence artificielle pour personnaliser les trajectoires de massage, ce dernier ne jouit pas d'une véritable autonomie puisqu'il nécessite toujours l'intervention d'un professionnel de santé pour identifier les zones de traitement, paramétrer le robot et le surveiller durant la séance (Qiu et al., 2019). En 2015 également, la société espagnole Adamo Robot, a présenté son système robotique de traitement thérapeutique (Figure 11). Cet appareil se distingue par un système à air comprimé sans contact direct avec l'utilisateur (Jimenez, 2019). En 2015 toujours, la startup

française Capsix Robotics a élaboré un projet autour de la solution technologique iYU® Pro<sup>11</sup>. À terme, ce dispositif robotique équipé d'un capteur 3D est destiné à s'adapter de manière autonome à tout type de morphologie en s'appuyant sur un modèle générique (Eyssautier and Gibert, 2020)

En 2016, ce n'est pas un mais deux projets similaires qui virent le jour. Situé Outre-atlantique, Massage Robotics a dévoilé son concept dédié aux centres de massage (Figure 11). Faute d'un manque de description technique de la mise en œuvre du projet, le brevet accompagnant ce projet a été refusé définitivement en remettant en cause son caractère innovant (Mackin, 2017; Nissim, 2001). Pour finir, le dernier projet en date émane de la société F&P Robotics et de son robot collaboratif P-Rob. Initialement proposé comme une solution de massage personnel appelé Massimo, il est devenu le robot personnel Lio (Figure 11), dédié au service et à l'assistance, se démarquant par l'introduction d'une plateforme mobile. Diverses fonctionnalités lui sont allouées, dont la pratique du massage (Bendel, 2020; J. Mišeikis et al., 2020).

---

<sup>11</sup> Cette solution de massage robotisée est celle qui a été retenue dans le travail expérimental de cette thèse, cœur de ce projet.



**Figure 11.** Illustrations de robots collaboratifs dédiés au massage.

**A.** EMMA robot. **B.** Adamo Robot. **C.** Massage robotics. **D.** iYU<sup>®</sup> Pro. **E.** Robot de massage personnel Massimo. **F.** Lio.

Force est de constater que les systèmes robotiques sont évolutifs et que les dispositifs élaborés ou mis sur le marché permettent des interventions aussi bien thérapeutiques que non thérapeutiques. À terme, ces projets devraient faciliter l'accès du massage au plus grand nombre et contribuer à l'amélioration du bien-être et de la santé (Golovin et al., 2018). Parmi les sociétés impliquées dans ces challenges technologiques, les usages et les marchés visés sont multiples : salons de bien-être nouvelle génération, massage en entreprise ou dans les salles de sport, appui médical pour la rééducation et la kinésithérapie, etc. Les sociétés étant très jeunes, les marchés ciblés évoluent, et il n'est pas encore possible de déterminer le ou les secteurs majoritaires d'usage de ces instruments. Suivant les projets, il est possible de bénéficier d'un ajustement de

la morphologie au moyen d'une configuration préliminaire, réalisée en automatique en temps réel, ou manuellement par un praticien sur une séance antérieure. Certains projets prévoient ou ont déjà un dispositif de contrôle de la pression, comme le dispositif iYU<sup>®</sup>Pro de la société Capsix Robotics ou le dispositif Emma de la société AI Treat qui offrent l'opportunité aux utilisateurs d'ajuster en temps réelle niveau de pression exercée. Enfin, ce type de massage robotisé présente l'avantage de la disponibilité, d'être confidentiel : l'utilisation de ces dispositifs peut s'effectuer sur demande, à n'importe quel moment de la journée, en mode d'usage autonome (iYU<sup>®</sup>Pro, Adamo), ou avec présence d'un opérateur (AI Treat, Massage Robotics). Ces cobots de dernière génération représentent donc une solution prometteuse, sous réserve qu'ils puissent reproduire efficacement les techniques de massages manuels prodigués par les spécialistes et qu'ils soient suffisamment accessibles et positivement accueillis par les utilisateurs. Sous réserve également qu'ils trouvent leur marché, en proposant des usages, des tarifs ou une richesse d'interaction, propres à les distinguer des solutions existantes. Le haut niveau d'interaction que permet d'envisager cette nouvelle technologie supporte par ailleurs l'existence d'un pont conceptuel encore inexploré. En effet, au-delà d'une comparaison simpliste et simplifiée des modes de contrôle rétroactif et proactif dans lesquels se positionne la personne recevant le massage, la possibilité d'intégrer une télécommande d'ajustement de la pression ou d'autres paramètres, en temps réel, offre une possibilité d'interaction plus ou moins avancée qui concilierait ces deux modes de contrôle de l'action. En définitive, l'utilisateur pourrait être en mesure de basculer à l'envie d'un extrême à l'autre de ce continuum et bénéficier ainsi d'une nouvelle expérience utilisateur sensori-motrice stochastique. Dans ces circonstances, cette approche originale concèderait par la même occasion l'éventualité d'une réconciliation entre l'homme et la machine. Néanmoins, une extrême prudence est de mise. Du fait de la liberté accordée aux utilisateurs, il semble important de reconsidérer leur sécurité et le cadre

éthique de l'intervention, ainsi que les bénéfices recherchés par le massage. En effet, en pratique les niveaux de pression et/ou les trajectoires ne devraient pas être déterminés au hasard. Ces paramètres devraient être prédéterminés par un professionnel et contrôlables. C'est le point de vue pris et défendu par les concepteurs des projets Adamo et CapsixRobotics, qui font appel au savoir-faire des masseurs-kinésithérapeutes pour la définition des protocoles et de leurs paramètres. Cette réflexion semble d'autant plus importante que ce type de paramétrage se doit d'être spécifique à chaque individu. Elles sont entre autres influencées par la masse musculaire et/ou les habitudes de massage. Aussi, cette nouvelle forme de massage suscite de nombreuses questions. Par exemple, la mobilisation cognitive requise par la télécommande ou tout autre moyen d'interaction avec l'appareil influence-t-il le niveau de détente de l'utilisateur ? Dans ces circonstances, le massage robotique peut-il être perçu comme étant aussi efficace que le massage manuel conventionnel ? Permet-il d'obtenir des effets similaires sur le plan psychophysiologique ? Ces systèmes autonomes, offrant une grande liberté aux utilisateurs, sont-ils à l'initiative de nouveaux usages, de nouvelles pratiques de massage. Sur la base de la perception humaine et des considérations éthiques, les capacités d'imitation du robot pourraient facilement être considérées comme de potentiels substituts à l'intervention humaine. Toutefois, ces dispositifs ne permettent pas de reproduire l'ensemble des gestes métiers, ni de produire un diagnostic mais rendent possible l'aménagement de la charge de travail et la préservation du capital de santé des praticiens. Pour ces raisons, certains sont présentés comme des solutions de santé en complément à un traitement conventionnel (Adamo et AI treat), et d'autres de détente lorsqu'il s'agit de la notion de bien-être (Capsix Robotics et Massage Robotics).

L'écho favorable de ces dispositifs auprès de certains utilisateurs tient à la promesse de nouveaux usages dans des lieux peu ou pas couverts en offre, ou selon des temporalités non



couvertes par les offres actuelles (horaires décalés, ou forte récurrence), ou encore à l'aspect d'intimité corporelle préservée par une interaction robotique (image de soi, contact par un tiers), ou enfin à la promesse de tarifs plus adaptés à un usage régulier. Au-delà de ces intérêts utilisateurs, ce type de dispositifs robotiques apparaît aussi comme une alternative aux maux des praticiens précédemment évoqués. De ce fait, ces systèmes de massages robotisés, autonomes et interactifs représenteraient un outil non-négligeable pour accompagner les professionnels dans leurs tâches. Outre le massage des tissus cicatriciels, le massage manuel est une tâche qui nécessite un travail intense et répétitif de la part du praticien. Ces robots représenteraient donc une opportunité d'atténuer la charge de travail des praticiens en réalisant des manipulations préliminaires simples et reproductibles (Golovin et al., 2018). Dans cette éventualité, le masseur-kinésithérapeute bénéficierait d'une valorisation de ses compétences en se concentrant sur les tâches où il est plus difficile/impossible de le remplacer (i.e., mobilisations articulaires, exercices d'étirement et de renforcement). Rappelons par ailleurs que la pratique du massage manuel s'inscrit dans une démarche de prévention, et non comme un moyen curatif. A noter également l'impossibilité actuelle pour ces robots de remplacer le praticien car ils restent à ce jour, incapables de faire un diagnostic des patients. En attendant des éléments de réponses à ces différentes interrogations, le maintien d'un regard critique demeure nécessaire sur ces nouvelles technologies et ces nouveaux usages. Sans nul doute, la résolution de ces problématiques constituera un axe de recherche passionnant dans les années à venir. Des essais cliniques et des études comparatives seront nécessaires pour apporter des réponses sur l'intérêt de ce nouveau type de massage «cobotisé».

## E. SYNTHÈSE

Comme mentionné dans ce chapitre et malgré une existence ancestrale, le massage sous sa forme manuelle demeure un sujet de recherche récent. De nombreuses études ont été conduites pour éclaircir et objectiver les bénéfices de cette pratique. Incontestablement, ses formes plus modernes que sont le massage autogène et le massage robotique sont tout autant concernées. Afin de caractériser les bénéfices de ces techniques et leurs caractéristiques en termes de routines dans les protocoles expérimentaux, nous avons réalisé une revue de littérature. Cette revue de synthèse complète ce chapitre et clarifie notre approche théorique qui situe les différentes formes de massages en termes de mode de contrôle de l'action induit pour les participants. Cet article précède notre cadre méthodologique qui aura pour objet la caractérisation de modèles de massages automatisables et la validation des bénéfices physiologiques d'un système de massage robotisé, autonome et interactif.

**REVUE DE SYNTHÈSE**

**EFFETS SÉLECTIFS DU MASSAGE MANUEL ET**

**DU MASSAGE AUTOGÈNE SUR LA**

**PERCEPTION DE LA RÉCUPÉRATION ET LES**

**PERFORMANCES : CONNAISSANCES**

**ACTUELLES ET ORIENTATIONS FUTURES**

**DESTINÉES AU MASSAGE ROBOTIQUE**

(Kerautret et al., 2020)

## ARTICLE 1:

Selective effects of manual massage and foam rolling on perceived recovery and performance: current knowledge and future directions toward robotic massages. Yann Kerautret, Franck Di Rienzo, Carole Eyssautier and Aymeric Guillot (2020). *Frontiers in Physiology*, 11, 1567

<https://doi.org/10.3389/fphys.2020.598898>

## CONTRIBUTION DES CO-AUTEURS

Les co-auteurs de l'étude sont Yann Kerautret, Franck Di Rienzo, Carole Eyssautier et Aymeric Guillot. L'approche conceptuelle de la revue a été conçu par Yann Kerautret, Franck Di Rienzo et Aymeric Guillot. La revue a été rédigé par Yann Kerautret, Franck Di Rienzo et Aymeric Guillot puis Yann Kerautret, Franck Di Rienzo, Carole Eyssautier et Aymeric Guillot ont lu, modifié et approuvé conjointement la version finale de la revue.



# Selective Effects of Manual Massage and Foam Rolling on Perceived Recovery and Performance: Current Knowledge and Future Directions Toward Robotic Massages

Yann Kerautret<sup>1,2</sup>, Franck Di Rienzo<sup>1</sup>, Carole Eyssautier<sup>2</sup> and Aymeric Guillot<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Univ Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, Laboratoire Interuniversitaire de Biologie de la Motricité EA 7424, Villeurbanne Cedex, France, <sup>2</sup> Capsix Robotics, Lyon, France

## OPEN ACCESS

### Edited by:

Katsuhiko Suzuki,  
Waseda University, Japan

### Reviewed by:

Waldemar Andrzejewski,  
University School of Physical  
Education in Wrocław, Poland  
Yusuke Hara,  
University of Tsukuba, Japan

### \*Correspondence:

Aymeric Guillot  
aymeric.guillot@univ-lyon1.fr

### Specialty section:

This article was submitted to  
Exercise Physiology,  
a section of the journal  
Frontiers in Physiology

**Received:** 28 August 2020

**Accepted:** 10 November 2020

**Published:** 21 December 2020

### Citation:

Kerautret Y, Di Rienzo F,  
Eyssautier C and Guillot A (2020)  
Selective Effects of Manual Massage  
and Foam Rolling on Perceived  
Recovery and Performance: Current  
Knowledge and Future Directions  
Toward Robotic Massages.  
*Front. Physiol.* 11:598898.  
doi: 10.3389/fphys.2020.598898

Manual massage and foam rolling are commonly used by athletes for warm-up and recovery, as well as by healthy individuals for well-being. Manual massage is an ancient practice requiring the intervention of an experienced physiotherapist, while foam rolling is a more recent self-administered technique. These two topics have been largely studied in isolation from each other. In the present review, we first provide a deep quantitative literature analysis to gather the beneficial effects of each technique through an integrative account, as well as their psychometric and neurophysiological evaluations. We then conceptually consider the motor control strategies induced by each type of massage. During manual massage, the person remains passive, lying on the massage table, and receives unanticipated manual pressure by the physiotherapist, hence resulting in a retroactive mode of action control with an ongoing central integration of proprioceptive feedback. In contrast, while performing foam rolling, the person directly exerts pressures through voluntary actions to manipulate the massaging tool, therefore through a predominant proactive mode of action control, where operations of forward and inverse modeling do not require sensory feedback. While these opposite modes of action do not seem to offer any compromise, we then discuss whether technological advances and collaborative robots might reconcile proactive and retroactive modes of action control during a massage, and offer new massage perspectives through a stochastic sensorimotor user experience. This transition faculty, from one mode of control to the other, might definitely represent an innovative conceptual approach in terms of human-machine interactions.

**Keywords:** physiotherapy, manual massage, self-myofascial release, cobots, foam rolling, robotic, motor control

## INTRODUCTION

In the last decades, work and recreational activities drastically affected our habits by increasing sedentary life (Choi, 2019). This is further a well-admitted harmful consequence of the overuse of computers and smartphones resulting in various disorders such as postural deformity, and neck and shoulder pain (Choi, 2019). It is also well-established that the repetition and prolonged

maintenance of body postures affects health (Kett and Sichtung, 2020). To prevent and address such disorders, manual massage (MM) techniques are appreciated and recommended. However, these have not yet been considered as therapeutic interventions *per se*. Practically, MM target soft tissues such as muscles, tendons, and fascias (Guimberteau, 2004; Guimberteau et al., 2016). The MM treatment applied to these structures is performed through several maneuvers including effleurage, kneading, static or slide pressures, but also light and deep pressures. They are likely to involve biomechanical, physiological, neurological and psychological mechanisms, although these empirical attributions are not always confirmed by scientific data (Weerapong et al., 2005). While the benefits of MM are extensively demonstrated in the literature in individuals with or without motor disorders (Poppendieck et al., 2016), such interventions remain expensive and time-consuming (Weerapong et al., 2005). Delivering a MM requires a trained practitioner, and massaging interventions are difficult to scale since only one patient can be treated at the same time. To address these limitations, self-massage using foam-rolling (FR) became popular quite recently, especially in the sport domain. FR has applications in strength and conditioning, and is most frequently administered during warm-up and recovery. FR consists in making back and forth movements with a foam roller or a roller massager. FR thus consists in rolling actions applying pressure to soft tissues (Cheatham et al., 2015; Wiewelhove et al., 2019). Although direct comparisons between FR and MM in randomized control trials are limited (Sharp, 2012; Cho et al., 2015; Patole et al., 2019; Rivera et al., 2019), FR appears as conducive as MM to significantly improve performance (e.g., Schroeder and Best, 2015; Murray et al., 2016). Enhanced flexibility was observed in both athletes and non-athletes populations (Halperin et al., 2014; Kelly and Beardsley, 2016), and lower muscle pain was also reported after FR (Jay et al., 2014; Chan et al., 2015; Ceca et al., 2017). This accounted for an analgesic effect of FR, comparable to that found as a result of traditional MM (Monteiro et al., 2017b). Massaging techniques affect central pain-modulating sensory systems (nociceptors and mechanoreceptor sensitivity) (Capobianco et al., 2019). Also, mechanical pressure may alleviate pain perception through stimulation of afferent central nociceptive pathways and descending anti-nociceptive pathways, i.e., diffuse noxious inhibitory control (Wiewelhove et al., 2019). Both MM and FR might improve blood circulation and promote muscle homeostasis (i.e., rearrangements of myofascia, muscle fibers, and microvessels), although this claim awaits further experimental investigation (Schleip, 2003a,b).

As for MM, evidence for the benefits of FR remains foremost empirical. In spite of accumulating research, in practice, the physiotherapist can modify the parameters according to the people based on his own feelings and experience to achieve the expected result. The physiotherapist can also benefit in real-time from feedback from his patient during the massage intervention. FR being a self-administration, each practitioner retains some degrees of adjustments of the different parameters, as found with MM. These two configurations

make it possible to individualize the treatment but does not facilitate the establishment of practical guidelines. The purpose of this review was to highlight the similarities in terms of scientific research (e.g., population, uses, outcome measures and effects) on MM and FR, and extend the discussion in the field of robotic massage. Currently, there is no literature review reporting the effects of these three massage modalities. The present paper first provides a synthesis of the experimental evidence supporting their benefits, and then disentangles optimal inherent characteristics and practical guidelines for efficient interventions. We also conceptualize the sensorimotor experience involved by MM and FR to delineate perspectives and research avenues. More specifically, we discuss whether MM should be considered a retroactive closed-loop convergence process while FR should rather be considered a proactive mode of action control. We consider to which extent future developments in the field, such as robotic solutions, might allow switching from a proactive to a retroactive mode of action control in specific massaging routines. We examine whether assisting classical massages with interactive and intelligent massaging robots might represent a promising and fruitful avenue.

This literature review was conducted using four search engines, Google Scholar, PubMeb, ResearchGate and Kinedoc, preceding and including 2020, without language restrictions. A total of 413 articles including key-words “foam roller,” “roller massager,” foam rolling,” “self-myofascial release,” “self-massage,” “MM,” “automated massage,” and “robotic massage,” were found in English, French and Spanish. A total of 316 articles were included. Items including the use of a foam roller or other comparative tool that did not include rolling the device on soft tissue were excluded (i.e., use for core stability training). A total of 173 articles were finally retained.

## MANUAL MASSAGE

MM therapy is widely used as a warm-up method and cool-down process in sports (Weerapong et al., 2005). It is also administered in clinical populations for therapeutic purposes or well-being (Field et al., 2005). In the first case, therapeutic massage is practiced as part of therapeutic interventions targeting the symptoms of a specific pathology/disease. MM appears to be an effective treatment for infants of depressed mothers, and in elderly patients with severe dementia (Field et al., 1996; Suzuki et al., 2010). Also, world-class athletes benefit from MM to improve their performance and facilitate recovery (Espí-López et al., 2020). Noteworthy, the use of MM is not restricted to therapeutic or performance-enhancing interventions. Indeed, it is also used as a tool to promote well-being. Wellness massage is therefore not intended to treat patient, but also used for the sole purpose of enhancing perceived well-being across physical, mental, social and even spiritual domains (Andrade, 2013). The various maneuvers and pressures are performed on soft tissues by the hands of a qualified physiotherapist, who adjusts his MM routine based on the aim and time available for his intervention.

## Dependent Variables

### Psychometric and Behavioral Assessments

MM is an ancestral practice found in many civilizations. Beyond these origins, it is available in three forms: wellness, therapeutic, and sports MM. To appreciate its impact, researchers first collected subjective evaluations through self-report ratings. These tools are simple to use, cost-effective, and non-invasive. While monitoring objective data is likely to provide greater levels of precision, it remains costly and invasive. There are nonetheless several reports of behavioral assessments of the effects of MMs. Joint amplitude is assessed by means of goniometers and functional tests (Leivadi et al., 1999; Hilbert et al., 2003; Zainuddin et al., 2005; McKechnie et al., 2007; Arabaci, 2008; Arazi et al., 2012; Iwamoto et al., 2016; **Table 1**). Behavioral measures also enabled researchers to assess the impact of MM on strength production of athletes (Rinder and Sutherland, 1995; Tiidus and Shoemaker, 1995; Farr et al., 2002; Hilbert et al., 2003; Dawson et al., 2004; Zainuddin et al., 2005; Jakeman et al., 2010). The influence of MM was also examined in vertical and horizontal power production (Farr et al., 2002; McKechnie et al., 2007; Willems et al., 2009; Jakeman et al., 2010; Delextrat et al., 2013; Abrantes et al., 2019). Speed and agility qualities were checked, taking into account acceleration, deceleration (Mancinelli et al., 2006; Arabaci, 2008; Arazi et al., 2012; Delextrat et al., 2013; **Table 1**).

### Neurophysiological Evaluations

Technological advances allowed investigation of changes occurring at the physiological level (**Table 2**). For instance, cutaneous temperature attesting changes in peripheral blood circulation was frequently collected (Drust et al., 2003; Hinds et al., 2004; Mori et al., 2004). It thus became possible to evaluate muscle temperature (Drust et al., 2003; Hinds et al., 2004), speed of blood circulation (Tiidus and Shoemaker, 1995; Hinds et al., 2004; Mori et al., 2004; Wiltshire et al., 2010), and blood pressure (Hinds et al., 2004; Arroyo-Morales et al., 2008; Wiltshire et al., 2010; **Table 2**). Some researchers also investigated the repercussions of MM on the activation of the sympathetic and parasympathetic nervous systems through monitoring of heart rate variability (Hemmings et al., 2000; Drust et al., 2003; Robertson et al., 2004; Arroyo-Morales et al., 2008; Wiltshire et al., 2010; Pinar et al., 2012; **Table 2**). More invasive procedures, such as biopsies and blood sampling, enable measures of changes in cortisol levels, markers of inflammation and metabolic products (Kaada and Torsteinb, 1989; Smith et al., 1994; Leivadi et al., 1999; Hemmings et al., 2000; Hilbert et al., 2003; Hinds et al., 2004; Robertson et al., 2004; Zainuddin et al., 2005; Ogai et al., 2008; Cupido, 2010; Rapaport et al., 2010; Wiltshire et al., 2010; Crane et al., 2012; Pinar et al., 2012; Iwamoto et al., 2016; Kargarfard et al., 2016; White et al., 2020; **Table 2**). This represents valuable information to prevent stress or inflammatory conditions that may ultimately lead to injury or a state of overtraining.

### Short-Term Effects

MM therapy has supposedly many virtues (Calvert, 2002). Its positive effects have been extensively reported in the scientific

literature (Weerapong et al., 2005; Best et al., 2008; Brummitt, 2008). A sensation of psychological well-being was frequently reported (Mancinelli et al., 2006; Visconti et al., 2015). MM is further supposed to alleviate mood and anxiety disorders (Leivadi et al., 1999; Sharpe et al., 2007; Nakano et al., 2019), improve the feeling of recovery, reduce physical fatigue (Hemmings et al., 2000; Mori et al., 2004; Robertson et al., 2004; Ogai et al., 2008; Carcano et al., 2010; Pinar et al., 2012; Delextrat et al., 2013; Jourdain, 2015).

Several authors reported range of motion (ROM) gains. Indeed, the dorsiflexion following MM ranged from 18.4° to 22.8°. Also, on a sit-and-reach box test, participants' score increased from 11.8 to 12.7 cm, after only 15 min of MM (Arabaci, 2008; Iwamoto et al., 2016). More generally, MM were shown to induce short-term flexibility gains, similar to those induced by static stretching, without co-occurrence of negative effects on physical performance (McKechnie et al., 2007; Arazi et al., 2012). These notions of ROM and flexibility were combined to increase the suppleness of an athlete.

In terms of recovery, few studies measured the influence of manual therapy on muscle stiffness. To date, no consensus is clearly established. Authors observed, using a durometer, a drop in stiffness between two intense efforts after a kneading MM (Ogai et al., 2008). Ultrasound shear wave elastography also showed progress in stiffness, but the benefits did not last more than 3 min (Eriksson Crommert et al., 2015). Some contradictory results, obtained with a rotary potentiometer or a myotonometry device, could be due to the very short observation time (Thomson et al., 2015; Kong et al., 2018). Before drawing general conclusions, further experimental studies are certainly required. Particular attention should be paid to the timing of the measurements. Manual therapy further appears to be effective to reduce adverse effects of exercise, likely to elicit delayed-onset muscle damage (DOMS). These benefits were obtained when MM is performed immediately after the effort, and up to 3 h afterward; **Table 3**). A recent meta-analysis concluded that MM could be the most efficient post-exercise intervention to prompt recovery. Compared to cryotherapy, cold-water immersion and compression garment, MM elicited a greater reduction in DOMS, perceived fatigue, and markers of inflammation (Dupuy et al., 2018). With regards to sport performance, MM was punctually found to positively affect the recovery of muscle power (Mancinelli et al., 2006; Willems et al., 2009) **Table 1**). However, other studies failed to detect such positive changes (Tiidus and Shoemaker, 1995; Farr et al., 2002), while others reported negative effects (Arabaci, 2008; Arazi et al., 2012). Similar inconsistent results were also reported by various meta-analytical reviews (Brummitt, 2008; Gaullier, 2015; Poppendieck et al., 2016). In another set of studies, MM was not found to promote force reduction after an exercise-induced muscle damage (Tiidus and Shoemaker, 1995; Farr et al., 2002; Hilbert et al., 2003; Zainuddin et al., 2005; **Table 3**). Based on these data, and despite some inconsistencies, we shall recommend the use of MM before a physical effort or even between two successive sporting events. Also, athletes immobilized due to injury could benefit from MM. In mice, Saitou et al. (2018) demonstrated

**TABLE 1** | The effects of MM on performances.

Author (year)	Study design	Sample	Massage intervention			Control	Others experimental groups	Outcome measures	Effects
			Targeted area	Technique	Treatment time				
<b>Range of motion</b>									
Leivadi et al. (1999)	RCT	30 dance students	Whole body	Effleurage, petrissage, friction	30 min	No	Massage Relaxation therapy 2 times/week over 5 weeks	Neck and shoulder ROM	Long term effect: ↑ neck extension ROM ↑ shoulder abduction ROM
Arazi et al. (2012)	RCT	20 college athletes	Main lower limb muscles	Effleurage, friction, petrissage, vibration and tapotment	15 min	Yes	Swiss massage Static-stretching	Sit-and-reach	↑ lower back and hamstrings flexibility
Hilbert et al. (2003)	RCT	18 young and healthy subjects	Hamstrings	Effleurage, tapotement, petrissage	20 min/post 2 h	Yes	Swedish massage Placebo massage	Straight leg raise test	NS change hamstring ROM
McKechnie et al. (2007)	RC	19 healthy and recreationally active	Plantar flexors	Effleurage and petrissage	3 min/leg	Yes	Petrissage Tapotement at 4 Hz	Ankle joint flexibility	petrissage > tapotement ↑ ankle ROM
Arabaci (2008)	RC	24 healthy and physically active	Main lower limb muscles	Effleurage, friction, petrissage, vibration, tapotment	15 min	Yes	Swedish massage Stretching	Sit-and-reach	↑ lower back and hamstrings flexibility
Iwamoto et al. (2016)	CT	12 healthy students	Popliteal fossa	Small circle with thumb at 3 Hz	2–3 min	No	Friction massage	Ankle joint flexibility	↑ dorsiflexion NS change plantar flexion
<b>Power performance</b>									
Mancinelli et al. (2006)	RCT	22 NCAA Division I basketball and volleyball players	Quadriceps, hamstrings	Effleurage, petrissage and vibration	17 min/post 48 h	Yes	Western massage	CMJ Timed shuttle run	↑ vertical power NS change horizontal power
Arazi et al. (2012)	RCT	20 college athletes	Main lower limb muscles	Effleurage, friction, petrissage, vibration and tapotment	15 min	Yes	Swiss massage Static-stretching	Vertical jump, 30 m sprint, agility-T test	↓ horizontal and vertical power ↓ agility
Delextrat et al. (2013)	RCT	8 basketball players	Main lower limb muscles and back	Effleurage, petrissage	15 min/leg	Yes	Massage Cold-water immersion	CMJ Repeated sprint ability	↑ CMJ NS change repeated sprint ability
Farr et al. (2002)	RCT	8 healthy and recreationally active	Main lower limb muscles	Effleurage, petrissage (no deep tissue massage)	30 min/post 2 h	No	Leg massage Leg control	Single limb jumps	↓ muscular power at 24 h
McKechnie et al. (2007)	RC	19 healthy and recreationally active	Plantar flexors	Effleurage and petrissage	3 min/leg	Yes	Petrissage Tapotement at 4 Hz	Drop-jump	NS change muscular power
Arabaci (2008)	RC	24 healthy and physically active	Main lower limb muscles	Effleurage, friction, petrissage, vibration, tapotment	15 min	Yes	Swedish massage Stretching	30 m sprint Leg reaction time	↓ horizontal and vertical power ↓ reaction time

*(Continued)*



TABLE 1 | Continued

Author (year)	Study design	Sample	Massage intervention			Control	Others experimental groups	Outcome measures	Effects
			Targeted area	Technique	Treatment time				
Jakeman et al. (2010)	RCT	32 healthy and physically active	Main lower limb muscles	Effleurage, petrissage, tapotment and hacking	30 min	Yes	Sport massage + compression Compression alone (12 h)	CMJ Squat jump (SJ)	↑ horizontal and vertical power
Abrantes et al. (2019)	RCT	39 physically active men	Finger/elbow Stick massage	Main lower limb muscles and chest	8 min	No	Manual massage (upper body) + Foam rolling (lower limbs)	Vertical and horizontal jump	↑ vertical and horizontal power
<b>Strength performance</b>									
Rinder and Sutherland (1995)	RC	20 club member	Quadriceps	Effleurage and petrissage	3 min/leg	Yes	Massage	Maximum number of leg extension at 50% 1RM	↑ quadriceps performance
Tiidus and Shoemaker (1995)	RCT	9 healthy students	Quadriceps	Superficial and deep effleurage	10 min/post < 1 h	No	Leg massage Leg control	Isometric and isokinetic knee extension	NS change muscle strength
Zainuddin et al. (2005)	RC	10 healthy subjects	Hand and main upper limb muscles	Effleurage, petrissage, friction	10 min/post 3 h	No	Arm massage Arm control	Isometric and isokinetic elbow flexion	NS change muscle strength
Willems et al. (2009)	RCT	7 healthy and moderately active	Main lower limb muscles	Effleurage, petrissage, tapotement	25 min	No	Leg massage Leg control	Single limb jumps	↑ muscular power at 48 h
Jakeman et al. (2010)	RCT	32 healthy and physically active	Main lower limb muscles	Effleurage, petrissage, tapotment and hacking	30 min	Yes	Sport massage + compression Compression alone (12 h)	Knee extension	↑ isokinetic strength vs control group
Abrantes et al. (2019)	RCT	39 physically active men	Finger/elbow Stick massage	Main lower limb muscles and chest	8 min	No	Manual massage (upper body) + Foam rolling (lower limbs)	Vertical and horizontal jump	↑ vertical and horizontal power

CT, Clinical trial; RCT, randomized controlled trial; RC, randomized crossover; CCT, controlled clinical trial; NR, not reported; ROM, range of motion; CMJ, countermovement jump; ↑ indicates increase; ↓ indicates decrease; NS, not significant.

**TABLE 2 |** The effects of MM on neurophysiological and psychological variables.

Author (year)	Study design	Sample	Massage intervention			Control	Others experimental groups	Outcome measures	Effects
			Targeted area	Technique	Treatment time and rate				
<b>Neurophysiological and physiological effects</b>									
Leivadi et al. (1999)	RCT	30 dance students	Whole body	Effleurage, petrissage, friction	30 min/Slow	No	Massage Relaxation therapy 2 times/week over 5-weeks	Salivary cortisol	↓ cortisol (stress hormones)
Hemmings et al. (2000)	RCT	8 amateur boxers	Main lower limb muscles, back, shoulder and arms	Effleurage, petrissage	20 min Effleurage: 30 strokes/min Petrissage: 50–60 strokes/min	Yes	Massage therapy	Blood analyzes Heart rate	NS change blood lactate, glucose concentration NS change heart rate
Kargarfard et al. (2016)	RCT	30 male bodybuilders	Quadriceps	Effleurage, petrissage and vibration	30 min/post 2 h	Yes	Western massage group	Blood sample	Massage vs control group : ↓ creatine kinase level from 48 h up to 72 h
White et al. (2020)	RC	9 collegiate-level athletes	Main lower limb muscles	Effleurage and neurolymphatic	30 min	Yes	Massage therapy	Blood sample pre- and post-exercise T0, T+1, 2 h, 24 h	↓ inflammation marker concentrations (↓IL-6)
Kaada and Torsteinb (1989)	CT	12 subjects with chronic pain	Lumbo-sacral region	Connective tissue massage	30 min/Slow	No	Connective tissue massage	Blood sample	↑ relaxation substances (↑ β-endorphins)
Smith et al. (1994)	RCT	14 healthy but untrained subjects	Biceps, triceps	Effleurage, shaking, petrissage, cross-fibre	30 min/post 2 h	Yes	Sport massage Sham massage	Blood analyzes	↑ neutrophils ↓ CK Less ↓ cortisol serum
Tiidus and Shoemaker (1995)	RCT	9 healthy students	Quadriceps	Superficial and deep effleurage	10 min/post < 1 h	No	Leg massage Leg control	Arterial blood velocity Venous blood velocity	NS change quadriceps muscle blood flow
Drust et al. (2003)	RC	7 healthy subjects	Quadriceps	Deep effleurage	5, 10, 15 min 52 strokes/min	No	3 groups of massage Ultrasound (5 min)	Heart rate monitor Skin and intramuscular temperature	↑ intra muscular and skin temperature at depths of 1.5 and 2.5 cm ↑ heart rate
Hilbert et al. (2003)	RCT	18 young and healthy subjects	Hamstrings	Effleurage, tapotement, petrissage	20 min/post 2 h	Yes	Swedish massage Placebo massage	Blood sample	NS change neutrophils

(Continued)

TABLE 2 | Continued

Author (year)	Study design	Sample	Massage intervention			Control	Others experimental groups	Outcome measures	Effects
			Targeted area	Technique	Treatment time and rate				
Hinds et al. (2004)	RCT	13 young healthy subjects	Quadriceps	Deep effleurage and petrissage	2*6 min 50–60 strokes/min	Yes	Massage	Blood flow Skin and muscle temperature Blood sample Blood pressure Heart rate	↑ skin temperature ↑ skin blood flow NS change blood pressure, heart rate, lactate concentration and FABF
Robertson et al. (2004)	RC	9 healthy and recreationally active	Main lower limb muscles	Effleurage, kneading, picking up, wringing, rolling	20 min/post active recovery 5 min	Yes	Massage	Blood sample Heart rate	NS change lactate level and heart rate response
Zainuddin et al. (2005)	RC	10 healthy subjects	Hand and main upper limb muscles	Effleurage, petrissage, friction	10 min/post 3 h	No	Arm massage Arm control	Upper arm circumference Blood sample	↓ swelling smaller ↑ creatine kinase activity
Arroyo-Morales et al. (2008)	RCT	62 healthy active subjects	Whole-body myofascial release	Long stroke, cross hand, static pressure	40 min/post 15 min active and passive recovery	Yes	Sham (ultrasound and magnetotherapy)	Heart rate variability Blood pressure	↓ heart rate variability index ↓ diastolic blood pressure
Ogai et al. (2008)	RC	11 healthy and active students	Main lower limb muscles	Petrissage	10 min between two sets	Yes	Massage	Blood sample	NS blood lactate concentration
Cupido (2010)	RC	13 young healthy and recreationally active	Quadriceps	Effleurage, petrissage, compression	10 min/post 10 min	No	Leg massage Leg control	Blood sample Muscle damage Muscle glucose level	NS glycogen, lactate concentration and muscle damage
Jakeman et al. (2010)	RCT	32 healthy and physically active	Main lower limb muscles	Effleurage, petrissage, tapotment and hacking	30 min	Yes	Sport massage + compression Compression alone (12 h)	Blood sample	NS creatine kinase activity
Rapaport et al. (2010)	RCT	53 healthy subjects	Full body	Effleurage, petrissage, kneading, tapotement and thumb friction	45 min	No	Swedish massage Light touch	Blood analyzes T+5, +1 pre- min and post- T+1, 5, 10, 15, 30, 60 min	Massage > light touch ↑ immune system (↑ circulating phenotypic lymphocyte, ↓ cytokine level, arginine-vasopressin and cortisol)

(Continued)

TABLE 2 | Continued

Author (year)	Study design	Sample	Massage intervention			Control	Others experimental groups	Outcome measures	Effects
			Targeted area	Technique	Treatment time and rate				
Wiltshire et al. (2010)	RC	12 healthy subjects	Forearm muscles	Effleurage, petrissage	10 min	Yes	Massage Active recovery	Forearm blood flow Blood sample Heart rate	↓ blood flow (impairing lactic acid removal) ↓ heart rate vs active recovery NS change heart rate vs passive recovery
Crane et al. (2012)	RCT	11 young healthy and recreationnaly active	Quadriceps	Effleurage, petrissage, compression	10 min/post 10 min	No	Leg massage Leg control	Blood analyzes	↓ inflammation (cytokines TNF- $\alpha$ , interleukin-6, heat shock protein 27) ↑ mitochondrial biogenesis (focal adhesion kinase, ERK1/2, PGC-1 $\alpha$ ) NS change muscle metabolites (glycogen, lactate)
Pinar et al. (2012)	RC	12 young healthy and recreationnaly active	Quadriceps, hamstrings	Effleurage, kneading, picking up, wringing, rolling	24 min	Yes	Massage Electrical muscle stimulation	Blood sample Heart rate	NS blood lactate concentration and heart rate
Iwamoto et al. (2016)	CT	12 healthy students	Popliteal fossa	Small circle with thumb at 3 Hz	2–3 min	No	Friction massage	Oxygenated hemoglobin Deoxygenated hemoglobin Total hemoglobin	↑ venous return (muscle oxygenation)
<b>Psychological effect</b>									
Leivadi et al. (1999)	RCT	30 dance students	Whole body	Effleurage, petrissage, friction	30 min/slow	No	Massage Relaxation therapy 2 times/week over 5 weeks	State-trait anxiety inventory Profil of mood states Pain VAS-10	↑ mood ↓ anxiety ↓ pain
Hemmings et al. (2000)	RCT	8 amateur boxers	Main lower limb muscles, back, shoulder and arms	Effleurage, petrissage	20 min 30–60 strokes/min	Yes	Massage	Numerical recovery scale	↑ perceived recovery
Carcano et al. (2010)	CT	96 national and international atheletes	Main lower limb muscles	Superifical and deep effleurage, friction	20–30 min/Slow	No	Swedish massage	Pain VAS-10 Fatigue VAS-10 Well being VAS-10	↓ muscle soreness ↓ muscular fatigue ↑ well-being
Delextrat et al. (2013)	RCT	8 bsketball players	Main lower limb muscles and back	Effleurage, petrissage	15 min/leg	Yes	Massage Cold-water immersion	Overall fatigue VAS-10	↓ perceived fatigue

(Continued)

TABLE 2 | Continued

Author (year)	Study design	Sample	Massage intervention			Control	Others experimental groups	Outcome measures	Effects
			Targeted area	Technique	Treatment time and rate				
Jourdain (2015)	CT	11 young athletes	Main lower limb muscles	Longitudinal/transverse deep sliding pressures, kneading and circular friction	10 min/leg post 2 h	No	Massage 1 time/week over 5-weeks	HPHEES Scale	↓ perceived fatigue on waking NS change overall physical form
Visconti et al. (2015)	Pilot study	25 ultramarathon runners	Main lower limb muscles	Effleurage	20 min	No	Massage	Numeric pain rating scale Patient global impression of change	↓ muscle pain
Kargarfard et al. (2016)	RCT	30 male bodybuilders	Quadriceps	Effleurage, petrissage and vibration	30 min/post 2 h	Yes	Western massage group	Pain VAS-10	↓ muscle soreness from 24 h up to 72 h
Mori et al. (2004)	RC	29 healthy students	Lumbar and sacrum region	Effleurage, kneading and compression techniques	5 min between two sets	Yes	Massage	Fatigue VAS-10	↓ perceived fatigue
Robertson et al. (2004)	RC	9 healthy and recreationnaly active	Main lower limb muscles	Effleurage, kneading, picking up, wringing, rolling	20 min/post-active recovery 5 min	Yes	Massage	Fatigue index	↓ perceived fatigue
Sharpe et al. (2007)	RCT	54 elderly subjects (≥ 60 years)	Whole body	Swedish, neuromuscular, and myofascial techniques	50 min	No	Massage therapy Guided relaxation 2 times/week over 4-weeks	General well-being schedule Perceived stress scale	↓ anxiety, depression ↑ vitality, general health and positive well-being vs guided relaxation group
Ogai et al. (2008)	RC	11 healthy and active students	Main lower limb muscles	Petrissage	10 min between two sets	Yes	Massage	Perceived fatigue VAS-10	↑ perceived recovery between two high intensive exercises
Pinar et al. (2012)	RC	12 young healthy and recreationnaly active	Quadriceps, hamstrings	Effleurage, kneading, picking up, wringing, rolling	24 min	Yes	Massage Electrical muscle stimulation	Total quality of recovery Rating of perceived exertion	NS change psychological recovery after high intensity exercise
Nakano et al. (2019)	RC	12 elderly people (65 years old)	HandsFeet	Stroke	15 min	No	Hand massage Foot massage	Likert scale	Both groups ↑ pleasant, relaxed and refreshed feelings

CT, clinical trial; RCT, randomized controlled trial; RC, randomized crossover; VAS, visual analogue scale; NR, not reported; ↑ indicates increase; ↓ indicates decrease; NS, not significant.

**TABLE 3 |** The effects of MM on delayed-onset muscle soreness.

Author (year)	Study design	Sample	Massage intervention			Nature of the exercise	Control	Others experimental groups	Outcome measures	Effects
			Targeted area	Technique	Treatment time					
Mancinelli et al. (2006)	RCT	22 NCAA Division I basketball and volleyball players	Thigh	Effleurage, petrissage, vibration	17 min/post 48 h	Intense strength training and drills	Yes	Western massage	PPT in quadriceps femoris Muscle soreness VAS-10 Vertical jump	↓ DOMS ↑ tenderness ↑ vertical power
Kargarfard et al. (2018)	RCT	30 male bodybuilders	Quadriceps	Effleurage, petrissage and vibration	30 min/post 2 h	5 sets of squat until exhaustion at 75% of 1-RM	Yes	Western massage	Pain VAS-10 CMJ Blood sample Isometric torque pre- and post- T0, T+24, 48 and 72 h	Massage ↓ muscle soreness at 24, 48 and 72 h ↓ creatine kinase from 48 h ↑ vertical power and muscle strength at 48 h
Smith et al. (1994)	RCT	14 healthy but untrained subjects	Biceps, triceps	Effleurage, shaking, petrissage, cross-fibre	30 min/post 2 h	Biceps and triceps eccentric exercise	Yes	Sport massage Sham massage	Clarkson Scale Blood creatine kinase concentration pre- and post- T0, T+8, 24, 48, 72, 96, 120 h Blood analyses (neutrophils and cortisol) pre- and post- T0, T+8 h (30-minute intervals)	↓ DOMS intensity Peak DOMS at 24 h ↓ markers damage and inflammation (creatinase, cortisol) ↑ neutrophils activity
Tiidus and Shoemaker (1995)	CCT	9 healthy students	Quadriceps	Superficial and deep effleurage	10 min/post < 1 h	Quadriceps eccentric exercises	No	Leg massage Leg control	Numerical pain-rating scale Isometric and isokinetic knee extension pre- and post- T+15 min, T+24, 48, 72, 96 h	Tendency ↓ perception of DOMS from 48 h Peak DOMS at 24 h NS change muscle strength
Farr et al. (2002)	RCT	8 healthy and recreationnaly active	Main lower limb muscles	Effleurage, petrissage (no deep tissue massage)	30 min/post 2 h	40 min downhill treadmill walk loaded	No	Leg massage Leg control	Clarkson Scale PPT Isometric and isokinetic knee extension Vertical jump pre- and post- T0, T+24, 48, 72, 96, 120 h	Tendency ↓ DOMS magnitude ↓ muscle tenderness attenuate the decrease of strength and vertical power

(Continued)

TABLE 3 | Continued

Author (year)	Study design	Sample	Massage intervention			Nature of the exercise	Control	Others experimental groups	Outcome measures	Effects
			Targeted area	Technique	Treatment time					
Hilbert et al. (2003)	RCT	18 young and healthy subjects	Hamstrings	Effleurage, tapotement, petrissage	20 min/post 2 h	Hamstrings eccentric exercises	Yes	Swedish massage Placebo massage	Differential descriptor scale intensity of soreness Blood sample Eccentric hamstring contraction pre- and post- T0, T+2, 6, 24, 48 h	↓ perception of DOMS from 48 h Peak DOMS at 24 h NS change neutrophils, ROM and peak torque
Zainuddin et al. (2005)	RC	10 healthy subjects	Hand and main upper limb muscles	Effleurage, petrissage, friction	10 min/post 3 h	Elbow flexors eccentric exercises	No	Arm massage Arm control	Pain VAS-10 Isometric and isokinetic elbow flexor strength Blood sample pre- and post- T0, T+1, 2, 3, 4, 7, 10, 14 days	↓ DOMS magnitude for palpation and joint mobilization ↓ creatine kinase activity NS change muscle strength
Willems et al. (2009)	RCT	7 healthy and moderately active	Quadriceps	Effleurage, petrissage	25 min	20 min downhill treadmill walking at 25% decline	No	Leg massage Leg control	Quadriceps pain VAS-10 Single limb jumps pre- and post- T+24, 48, 72 h	↓ DOMS vastus lateralis and rectus femoris at 48 h ↑ vertical power at 48 h

CT, clinical trial; RCT, randomized controlled trial; RC, randomized crossover; CCT, controlled clinical trial; DOMS, delayed onset muscle soreness; NR, not reported; ↑ indicates increase; ↓ indicates decrease; NS, not significant.

that mechanical interventions mimicking MM could modulate inflammatory responses by local effects on interstitial fluid dynamics. The pressure exerted would induce a shear stress exertion on macrophages in situ, attenuating the phenomenon of muscle atrophy by a lymphatic and immune response (Saitou et al., 2018; Sakitani et al., 2019). In animal models, MM induces numerous neurophysiological changes. In fact, MM was associated with modulations in neural, lymphatic, and genetic responses (Lima et al., 2020). For example, abdominal massage improves transit in rats, i.e., reduced time to first fecal discharge in response to mechanical pressures. At the endocrine level, it was also shown that MM reduced the levels of gastrointestinal hormones, i.e., insulin, gastrin and somatostatin (Lima et al., 2020). MM also had modulatory effects at the neural level, since its analgesic effects were associated with changes in descending pain modulation circuits (Vigotsky and Bruhns, 2015). Nonetheless, the lack of consistency in the experimental findings in humans might be explained by a weak methodological rigor, as few protocols were reproduced and tested, hence supporting that there is no clear and precise design ensuring effectiveness of the intervention. The high variability of the studies is well-illustrated by the use of effleurage and petrissage techniques, while others also used friction, picking up, and shaking techniques. Likewise, the number of areas treated and the effective time of sport MM could fluctuate from 5 to 30 min (Brummitt, 2008; Poppendieck et al., 2016). Similarly, very few studies specified the intensity, the speed and the gestural frequency exerted by the therapist during the MM. Although these data are difficult to quantify, these parameters remain essential, as is the experience of the therapist, which has a main influence on MM effectiveness, and should be more rigorously controlled. Accordingly, Moraska (2007) provided evidence that therapist with 950 h of didactic training achieved significantly better results in muscle soreness than with 450 or 700 h of training. Although MM is an ancestral practice, this therapy, which is above all empirical, retains a certain number of gray areas, particularly in terms of sports massage, and the standardization of a sport MM protocol is warranted.

### Long-Term Intervention

To prepare the body for an intense exercise or to facilitate the post-exercise recovery, longer-term repeated MM interventions have extensively been administered within a span of 2–5 weeks. One to two weekly MM sessions of 20–30 min were found to reduce the level of stress and fatigue (Leivadi et al., 1999; Jourdain, 2015). After a long-term exercise, a difference was noticed by the athletes after receiving a one-sided manual leg massage. According to the participants, the perception of recovery of the side massaged was greater than the control (Dawson et al., 2004). With regards to well-being, it seems that a regular MM makes increase neck and shoulder ROM (Leivadi et al., 1999; Yang et al., 2012). MM finally contributed to decrease the level of salivary cortisol after a period of 5 weeks, after a design including two massages per week (Leivadi et al., 1999). These various effects concurred with increased relaxation resulting from the activation of the parasympathetic nervous system.

## Experimental Procedures

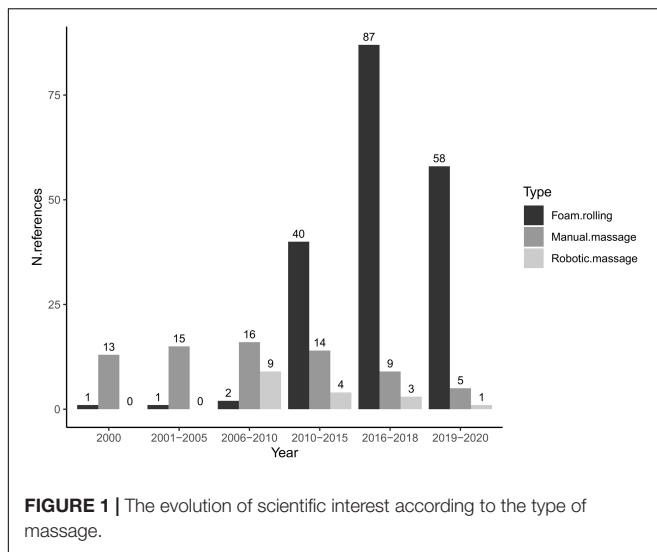
MM is universally appreciated. Classical guidelines emphasized the importance of dynamic movements for stimulating the soft tissues (e.g., vibration and tapotement). Slow gestures (e.g., effleurage, kneading, sliding pressure and friction) were recommended for well-being and relaxation. When the MM is designed to promote post-exercise recovery, effleurage and kneading should rather be preferred (Standley et al., 2010). Incorporating tapotements was further relevant to reduce DOMS and joint amplitude recovery, whereas vibration facilitated blood circulation and friction promoted relaxation (Standley et al., 2010). A cool-down MM routine using might last between 15 and 30 min to allow physiological changes (Standley et al., 2010). Despite guidelines, future experimental designs should consider and study the pressure levels and the gestural speed of the practitioner during MM to compensate for the lack of data.

## FOAM ROLLING

FR is a self-myofascial release technique requiring direct contact with the skin, where fingers or tools are used to slowly press the fascial tissue. FR have extensively been adopted in fitness and conditioning communities in recent years (Cheatham and Stull, 2018a,b). Because of its simplicity and measurable effects, FR is administered as part of warm-up and recovery routines (Fleckenstein et al., 2017). Practically, FR administered using a foam roller, a roller massager, sticks or balls with varying sizes and density, further became very popular to improve functional outcomes such as ROM and pain pressure threshold (PPT). The first technique consists in performing simple back and forth movements, thus exerting mechanical pressures on soft tissues via the weight of the body (or the force of the upper limbs). A second technique, called ischemic pressure, requires a static pressure during a 6–30 s period, below the individual pain tolerance threshold (Abels, 2013; Myers, 2013; Kalichman and Ben David, 2017). This complementary approach is designed to reduce pain felt and improve ROM, but requires greater expertise with FR (Kalichman and Ben David, 2017). For users, the goal is to get closer from MM practice of the physiotherapist, more specifically to reproduce the method of Rolfing.

Although the scientific literature addressing the effects of FR remains sparse, this research topic is currently gaining attention (Cheatham et al., 2015; Wiewelhove et al., 2019; **Figure 1**). There is an emerging consensus that FR positively affects athletic performances such as power, strength, agility, balance and flexibility (Schroeder and Best, 2015). FR also yielded beneficial effects in rehabilitation settings with elderly populations or patients suffering from locomotor disorder such as genu varus (Jafarnezhadgero et al., 2018; Lee and Lim, 2018), round shoulder posture (Choi, 2019), or spastic diplegia (Patole et al., 2019). In the same vein, recent FR studies investigated its potential effectiveness in the context of rehabilitation (i.e., tendinopathies, friction syndrome of the iliotibial band, fibromyalgia, myofascial pain syndrome, or postural correction) (Grieve et al., 2013; Aboodarda et al., 2015; Chan et al., 2015; Ceca et al., 2017; Lee et al., 2017; Jafarnezhadgero et al., 2018). The theoretical rationale





advanced as an account to the benefits of FR largely overlaps that for traditional MM.

## Dependent Variables

### Psychometric and Behavioral Assessments

As for MM, experimental designs seeking to assess the effectiveness of FR involved psychometric, behavioral and physiological measures. Subjective measures primarily consisted in standardized questionnaires and self-reports ratings on Likert-type scales to quantify pain and quality of life (Healey et al., 2014; Cavanaugh, 2016; Fleckenstein et al., 2017; **Table 4**). Researchers also used Borg scales or numerical ratings scale as means to collect perceived recovery (Healey et al., 2014; Peacock et al., 2015; Fleckenstein et al., 2017; Kalén et al., 2017; Rey et al., 2017; Beier et al., 2019; **Table 4**). Considering that pain is not objectively measurable, these different scales offer a simple solution to assess the quality and speed of recovery of DOMS (Jay et al., 2014; MacDonald et al., 2014; Romero-Moraleda et al., 2017, 2019; Naderi et al., 2019; **Table 5**). The algometer is also used to measure the PPT reliably, both at the muscular and joint levels, after FR routine. It is also used after exercise induced muscle damage and FR recovery (Pearcey et al., 2015; Correia, 2016; Casanova et al., 2017; Drinkwater et al., 2019; **Table 5**). Likewise, just like MM, functional tests, such as the sit-and-reach or weight-bearing lunge tests, are usual tools to assess the effectiveness of FR on ROM (Sullivan et al., 2013; Halperin et al., 2014; Grieve et al., 2015; Peacock et al., 2015; Škarabot et al., 2015; Kelly and Beardsley, 2016; Patel et al., 2016; Boguszewski et al., 2017; Grabow et al., 2017; Jung et al., 2017; Paz et al., 2017; Sağıroğlu, 2017; Garcia-Gutiérrez et al., 2018; Phillips et al., 2018; Guillot et al., 2019; Pathania and Muragod, 2019; Somers et al., 2019; Williams and Selkow, 2019; **Table 6**). Other clinical examinations, such as the Thomas test or the straight leg raise test, are also regularly used to quantify flexibility with manual or electric goniometers after FR (MacDonald et al., 2014; Mohr et al., 2014; Cho et al., 2015; Vigotsky et al., 2015; Su et al., 2017; Do et al., 2018; Killen et al., 2018; Madoni et al., 2018;

Guillot et al., 2019; Jeong et al., 2019; Kyranoudis et al., 2019; Lim and Park, 2019; Oranchuk et al., 2019; **Table 6**). Applied to FR research, goniometer/inclinometer index gains in terms of degrees of freedom of the joints (Peacock et al., 2015; Škarabot et al., 2015; Fairall et al., 2017; Le Gal et al., 2018; **Table 6**). In addition to such flexibility tests, evaluating the effects of FR on physical qualities such as muscular power/strength, agility, and muscular activation, remains crucial (Mikesky et al., 2002; Fama and Buetti, 2011; Healey et al., 2014; Peacock et al., 2014, 2015).

### Neurophysiological Evaluations

To this end, researchers used surface electromyography (EMGs) to appreciate whether muscle activation increase was associated with better performance, and further reduced the risk of injury (Macgregor et al., 2018). EMGs were recorded non-invasively by positioning electrodes directly on a shaved skin cleaned with alcohol (Ginszt et al., 2017; Romero-Moraleda et al., 2017; Hodgson et al., 2018; Madoni et al., 2018; Beier et al., 2019; Capobianco et al., 2019; Kim et al., 2019; Mazzei, 2019; Ye et al., 2019; **Table 7**). Recently, the development of tensiomyography allowed rapid and reliable non-invasive investigations of the contractile properties of the skeletal muscle (Martínez-Cabrera and Núñez-Sánchez, 2016; Murray et al., 2016; Schroeder et al., 2017; Macgregor et al., 2018; **Table 7**).

To complement the measurements made on the peripheral nervous system, other research was undertaken to increase the current understanding of the effects of FR to a more fundamental level. Researchers hypothesized that this technique was not limited to local changes in muscle tissues, but might also affect the vascular function. Some researchers collected blood analyses to measure concentrations of blood cortisol, lactate, oxytocin or even nitric oxide (Kim et al., 2014; Okamoto et al., 2014; D'Amico and Paolone, 2017; Kalén et al., 2017; **Table 7**). To overcome invasive constraints, they used an automatic blood pressure monitor, simple and quick to manipulate. This medical device consists of an inflatable cuff positioned on the arm. This device measures blood pressure by the oscillatory method, i.e., the heartbeats, pulse wave velocity, systolic and diastolic pressures (Okamoto et al., 2014; Lastova et al., 2018; **Table 7**). To achieve a more detailed analysis of both superficial and deep blood flow, ultrasound Doppler recordings were further used. This exploration is certainly more precise but requires specific knowledge in medical semiology as well as good adjustments of the device (Thistlethwaite et al., 2016; Hotfiel et al., 2017; **Table 7**). Formerly designed and reserved for the medical field, these advanced measurements are now gradually made available to applied research and extend current knowledge to FR. This recent spread comes in particular from a surge of recent interest from physiotherapists and rehabilitation professionals. Researchers therefore did not restrain their evaluation to functional tests for monitoring flexibility and muscle performance.

### Short-Term Effects

Positive short-term FR effects, measured at a single-session level, were found to substantially reduce muscle pain (Schroeder and Best, 2015), in particular after exercise-induced muscle damage (Jay et al., 2014; MacDonald et al., 2014; Pearcey et al., 2015;

**TABLE 4 |** The effects of foam rolling on psychological variables.

Author (year)	Study design	Sample	Foam rolling intervention				Control	Others experimental groups	Outcome measures	Effects
			Tool(s)	Targeted area	Treatment time and rate	Intensity				
Peacock et al. (2015)	RC	16 athletically trained adult	High density FR	Main lower limb muscles and lower back	1 × 30 s/muscle 10 bpm	NR	No	Sagittal plane FR Frontal plane FR	Borg scale	No change rate of perceived exhaustion
Kalén et al. (2017)	RC	12 surf lifeguards	High density FR	Main lower limb muscles per leg	2 × 60 s	7/10	Yes	Foam rolling Running Passive recovery	Borg CR-10 scale	No change rate of perceived exhaustion
Rey et al. (2017)	RCT	18 professional soccer players	High density FR	Main lower limb muscles	1 × 45 s/leg and muscle group 50 bpm	Much pressure as they could	Yes	Foam rolling	Total quality recovery scale Perceived muscle soreness VAS-7	↑ feelings of recovery ↓ perceived muscle soreness at 24 h post-training
Beier et al. (2019)	RC	11 resistance trained subjects	Stick massage	Rectus femoris and gluteus maximus	2 min/muscle	Heavy pressure	No	Foam rolling Dynamic warmup-up	Recovery scale-10	NS change perceived recovery
Healey et al. (2014)	RC	26 healthy college-aged and recreationally active	High density FR	Main lower limb muscles and upper back	1 × 30 s/muscles	Self-selected	Yes	Foam rolling Planking exercises	Borg CR-10 scale Fatigue VAS-10 Muscle soreness VAS-10 Palpating rating soreness scale	↓ fatigue NS difference muscle soreness
Cavanaugh (2016)	RC	12 healthy and recreationally active	Roller massager	Plantar flexors	3 × 30 s 15 bpm	7/100/10	Yes	Foam rolling ipsilateral leg (7/10) Foam rolling contralateral leg (7/10) Sham (0/10)	Pain VAS-10	↓ pain perception with heavy foam rolling
Cheatham et al. (2017)	RCT	45 healthy subjects	High density FR	Quadriceps	1 × 120 s	Moderate	Yes	Video-guided Live-instructed Self-guided foam rolling + knee mobilizations	Quadriceps PPT	All groups : ↑ muscle tenderness
Cheatham et al. (2019)	RCT	45 healthy and recreationally	Vibrating foam roller Non vibrating foam roller	Quadriceps	1 × 120 s	Moderate	Yes	Vibrating foam rolling (33 Hz) Non-vibrating foam rolling + knee mobilizations	Quadriceps PPT Passive knee flexion ROM	Both groups ↑ knee ROM ↑ muscle tenderness (vibrating > non-vibrating)
Cheatham and Baker (2017)	RCT	20 healthy subjects	High density FR	Quadriceps	1 × 120 s 1 inch per second	Moderate	No	Foam rolling leg Control leg + knee mobilizations	Quadriceps and hamstrings PPT	↑ muscle tenderness (crossover effect on contralateral quadriceps)

*(Continued)*

TABLE 4 | Continued

Author (year)	Study design	Sample	Foam rolling intervention				Control	Others experimental groups	Outcome measures	Effects
			Tool(s)	Targeted area	Treatment time and rate	Intensity				
Fleckenstein et al. (2017)	RCT	55 healthy and recreationally active	High density FR	Mam lower limb muscles	1 × 30 s/muscle 60 bpm	7/10	Yes	Prevention Regeneration	Fatigue VAS-10 Pain VAS-10	↓ perceived fatigue (regeneration > prevention)
Han et al. (2017)	RCT	30 students patients will trigger point	Vibrating FR Non-vibrating FR	Mam lower limb muscles	1 × 20 min	NR	No	Vibrating FR (62 Hz) Non-vibrating FR 3 times/week over 4-weeks	Iliotibial-band, gluteus, rectus femoris, hamstrings PPT	↑ muscle tenderness in ITB Trend ↑ for others muscles
Cheatham and Stull (2018a)	RCT	21 healthy subjects	High density FR	Quadriceps	1 × 120 s 1 inch per second	Moderate	No	Foam rolling leg Control leg + knee mobilizations	Quadriceps and hamstrings PPT	↑ muscle tenderness (crossover effect on contralateral quadriceps)
Cheatham and Stull (2018a)	RCT	36 healthy and recreationally active	Soft FR Medium FR Hard FR	Quadriceps	1 × 120 s 1 inch per second	NR	No	Soft density FR Medium density FR Hard density FR + knee mobilizations	Quadriceps PPT	Three groups ↑ muscle tenderness
Cheatham and Stull (2018b)	RCT	30 healthy and recreationally active	High density FR	Quadriceps	1 × 120 s 1 inch per second	NR	No	Foam rolling only Foam rolling + knee mobilizations	Quadriceps PPT	↑ muscle tenderness (foam rolling with knee mobilizations > foam rolling only)
Cheatham et al. (2019)	RCT	45 healthy and recreationally active	Vibrating FR Non vibrating FR	Quadriceps	1 × 120 s 1 inch per second	NR	Yes	Vibrating FR(33 Hz) Non-vibrating FR Static stretching	Quadriceps PPT	↑ muscle tenderness (vibrating > non-vibrating FR)

RC, randomized crossover; RCT, randomized controlled trial; FR: foam roller; NR, not reported; bpm, beats per minute: ↑ indicates increase; ↓ indicates decrease; VAS, visual analogue scale: PPT, pain pressure threshold; NS, not statistically significant.

**TABLE 5** | The effects of foam rolling on delayed-onset muscle soreness.

Author (year)	Study design	Sample	Foam rolling intervention					Nature of exercise	Control	Others experimental groups	Outcome measures	Effects
			Tool(s)	Targeted area	Treatment time and rate	Intensity	Experience					
Casanova et al. (2017)	RC	10 athletes	Roller massager	Plantar flexors	6 × 45 s 30 bpm	NR	1 test session	5 × 201-leg calf raise at BW	Yes	Foam rolling leg Control leg	Gastrocnemius PPT Ankle dorsiflexion Muscle morphology Muscle oxygenation Plantar flexion, dorsiflexion MVIC pre- and post-T0, T+1, 24, 48, 72 h	↑ muscle tenderness ↑ ankle ROM NS change muscle oxygenation (HHb concentration) NS change muscle morphology NS change muscle performance
Jay et al. (2014)	RCT	22 healthy untrained	Roller massager	Hamstring	1 × 10 min 15–30 bpm	Moderate	NR	10 × 10 stiff-legged deadlift up to 32 kg	Yes	Foam rolling leg Control leg	Pain VAS-10 Hamstrings PPT 1-leg sit-and-reach box test pre- and post- T0, T+10, 30, 60 min	↑ muscle tenderness up to 60 min ↓ muscle soreness up to 60 min ↑ ROM at 10 min  Controlateral effect ↓ muscle soreness Tend ↑ muscle tenderness Trend ↑ ROM
MacDonald et al. (2014)	RCT	20 healthy and recreationally active	High density FR	Main lower limb muscles	2 × 60 s/muscle	NR	1 test session	10 × 10 squat at 60% of 1-RM	Yes	Foam rolling	BS-11 NRS Modified kneeling lunge Physical test and contractile properties pre- and post-T0, T+48, 72h	↓ muscle soreness ↑ performances ↑ muscle activity
Pearcey et al. (2015)	RC	8 healthy and physically active	High density FR	Main lower limb muscles	2 × 45 s/muscle 50 bpm	Much pressure as they could	Yes	10 × 10 squat at 60% of 1-RM	Yes	Foam rolling	Quadriceps PPT Physical tests pre- and post-T+24, 48, 72 h	↑ muscle tenderness ↑ physical performance decrements
Correira (2016)	RC	10 healthy and recreationnaly active	Roller massager	Plantar flexors	6 × 45 s 30 bpm	Much pressure as they could	1 test session	5 × 20 1-leg calf raise at BW	Yes	Foam rolling	Plantar PPT Dorsiflexion ROM Plantar MVIC Muscle morphology Muscle oxygenation pre- and post- T0, T+1 h, 24, 48, 72 h	↑ muscle tenderness at T+24 h, 48 h, 72 h NS change ROM NS change muscular performance NS change morphology NS change muscle oxygenation

(Continued)

TABLE 5 | Continued

Author (year)	Study design	Sample	Foam rolling intervention					Nature of exercise	Control	Others experimental groups	Outcome measures	Effects
			Tool(s)	Targeted area	Treatment time and rate	Intensity	Experience					
Romero-Moraleda et al. (2017)	RCT	32 healthy and moderately active	High density FR	Quadriceps	5 × 60 s	Much pressure as they could	NR	5 × 20 0,5 m drop jumps	No	Neurodynamic mobilization Foam rolling	Numerical pain rating scale-10 Knee extension MVIC	Both groups : ↓ muscle pain Foam roller group ↑ muscle strength
Drinkwater et al. (2019)	RC	11 healthy young males	High density FR	Main lower limb muscles	1 × 180 s/muscle 60 bpm	Much pressure as they could	1 test session	6 × 25 eccentric knee extensors at 120°/s	Yes	Foam rolling post-T0 and before each testing point at T+24, 48, 72 h	PPT rectus femoris Mid-thigh circumference Knee flexion ROM CMJ MVIC right knee extensor	↑ muscle tenderness at T+48h NS change circumference NS change knee ROM ↑ vertical jump at 72 h NS change strength
Naderi et al. (2019)	RCT	80 healthy physically active male	High density FR	Quadriceps	4 × 120 s 30 bpm	Much pressure as they could	1 test session	4 × 25 eccentric knee extensors at 60°/s	Yes	Foam rolling post- T0, T+1, 24, 48, 72 h	Pain VAS-10 PPT Quadriceps muscle strength Joint position sense Isometric force sense pre- and post- T+1, T+24, 48, 72 h	↓ muscle pain ↑ muscle tenderness ↑ proprioception ↓ force decrements up to 48h
Romero-Moraleda et al. (2019)	RCT	38 healthy and moderately active	Vibrating FR Non-vibrating FR	Quadriceps	5 × 60 s	Much pressure as they could	NR	10 × 10 inertial flywheel eccentric squat	No	Foam rolling with vibrating roller (18Hz) Foam rolling with classic roller	Pain VAS-10 Quadriceps PPT Muscle oxygen saturation CMJ Active and passive hip extension ROM Knee flexion ROM	Vibrating > non-vibrating FR ↑ muscle tenderness ↓ pain perception ↑ passive hip extension  Both FR ↑ muscle oxygenation (SmO2) ↑ vertical power ↑ active hip and knee ROM

RC, randomized crossover; RCT, randomized controlled trial; FR, foam roller, BW, body weight; VAS, visual analogue scale; PPT, pressure pain threshold; NR, not reported; bpm, beats per minute; NS, not significant; ↑ indicates increase; ↓ indicates decrease.

**TABLE 6** | The effects of foam rolling on range of motion.

Author (year)	Study design	Sample	Foam rolling intervention				Expertise	Control	Others experimental groups	Outcome measures	Effects
			Tool(s)	Targeted area	Treatment time and rate	Intensity (VAS)					
Peacock et al. (2015)	RC	16 athletically trained	High density FR	Main muscle of the body	1 × 30 s/muscle 10 bpm	NR	NR	No	Mediolateral plan Anteroposterior plan	SBRT	Mediolateral FR plan ↑ lower back and hamstring flexibility
Škarabot et al. (2015)	RC	11 adolescents trained swimmers	High density FR	Plantar flexors	3 × 30 s	7/10 VAS	6-months	No	Static Stretching Foam rolling Foam rolling + Static stretching	WBLT	Ankle dorsiflexion ROM FR group : NS change SS group : ↑ Combination group : ↑
Fairall et al. (2017)	RCT	12 adult amateur softball players with shoulder ROM	Lacrosse ball	Infraspinatus	2 × 60 s	NR	No	No	Foam rolling alone Static stretching alone Foam rolling + Static stretching	Glenohumeral internal rotation	FR + SS and SS > FR ↑ shoulder ROM
Le Gal et al. (2017)	RCT	11 adolescent advanced tennis players	Tennis ball	Infraspinatus and pectoralis	3 × 60 s/muscle	Much pressure as they could	NR	Yes	Foam rolling 3 times/week over 5-weeks	Glenohumeral internal rotation	↑ shoulder ROM at 5-weeks
Sađirođlu (2017)	RC	22 well-trained soccer players	Vibrating FR Non vibrating FR	Main lower limb muscles	2 × 30 s/muscle 10 bpm	NR	No	No	Foam rolling with vibrating roller (38 Hz) Foam rolling with classic roller	SRBT	Both experimental groups : ↑ lower back and hamstring flexibility without no difference between
Guillot et al. (2019)	RCT	30 professional rugby players	High density FR	Main lower limb muscles	1 × 20–40 s/muscle 21 bpm	Much pressure as they could	1 test session	Yes	Foam rolling 1 set of 20 s 1 sets of 40 s 3 times/week over 5-weeks	Side split test Active SLR Modified Thomas test WBLT	Both FR groups : without S difference between FR groups ↑ hip ROM NS change knee ROM NS change dorsiflexion Perceived discomfort 40 s > 20 s
Oranchuk et al. (2019)	RC	22 female NCAA Division II lacrosse and soccer athletes	High density foam roller	Hamstrings	3 × 60 s 30 bpm	Much pressure as they could	1 test session	Yes	Foam rolling (FR) Superficial heating (SH) Superficial heating + Foam rolling	Passive SLR Likert scale (perceptions of efficacy)	SH, SH + FR > Control SH + FR > FR or SH ↑ hip flexion ROM  SH + FR > FR but not SH more effective perception

*(Continued)*

TABLE 6 | Continued

Author (year)	Study design	Sample	Foam rolling intervention				Expertise	Control	Others experimental groups	Outcome measures	Effects
			Tool(s)	Targeted area	Treatment time and rate	Intensity (VAS)					
Sullivan et al. (2013)	RCT	17 healthy and recreationnaly active	Roller-massager	Hamstrings	1–2 × 5–10 s 120 bpm	13 kg	No	Yes	Foam rolling 1 set of 5 s 2 sets of 5 s 1 set of 10 s 2 sets of 10 s	SRBT	↑ lower back and hamstring flexibility FR 10 s > FR 5 s
Halperin et al. (2014)	RC	14 healthy and recreationnaly active	Roller-massager	Plantarflexors	3 × 30 s 30 bpm	7/10 VAS	No	No	Foam rolling Static stretching	WBLT	Both groups ↑ ankle dorsiflexion ROM up to 10 min
Mohr et al. (2014)	RCT	40 subjects with less than 90° of passive hip-flexion	Bio-foam roller	Hamstrings	3 × 60 s 30 bpm	Much pressure as they could	1 test session	Yes	Foam rolling Static Stretching Combined techniques 3 times/week over 2-weeks	Passive SLR	↑ hip ROM Mixed group > FR and SS group > control
Cho et al. (2015)	RCT	50 subjects with hamstrings flexibility deficit	Wooden triangle-shaped pillow	Suboccipital	1 × 280 s	NR	NR	No	Suboccipital muscle inhibition	Finger-floor distance SLR Popliteal angle	↑ hamstrings flexibility
Grieve et al. (2015)	RCT	24 healthy subjects	Tennis ball	Sole	1 × 120 s/sole	Much pressure as they could	NR	Yes	Foam rolling	SRBT	↑ hamstring and lower back flexibility
Vigotsky et al. (2015)	RCT	23 healthy students	High density FR	Quadriceps	2 × 60 s/Slowly	NR	NR	No	Foam roller Static stretching	Modified Thomas test	↑ hip extension ROM NS change knee flexion NS change rectus femoris length
Kelly and Beardsley (2016)	RCT	26 healthy and recreationnaly active	High density FR	Plantar flexors	3 × 30 s 15 bpm	Much pressure as they could	1 test session	Yes	Foam rolling leg Control leg	WBLT pre- and post- T0, T+5, 10, 15, 20 min	↑ dorsiflexion ROM ipsilateral leg : up 20 min contraletral leg : up 10 min
Patel et al. (2016)	RCT	30 subjects with active knee extension deficit	Tennis ball	Sole	1 × 120 s/foot	Much pressure as they could	NR	Yes	Foam rolling	SRBT Active knee extension	↑ lower back and hamstring flexibility
Boguszewski et al. (2017)	RCT	37 healthy and recreationnaly active	Foam roller – not reported	Main lower limb muscles	1 × 20 min/muscle	NR	Yes	Yes	Foam rolling 2 times/week over 8-weeks	Single leg SRBT Functional Movement Screen (FMS)	↑ lower back and hamstring flexibility vs control group ↑ FMS score vs control group

(Continued)

TABLE 6 | Continued

Author (year)	Study design	Sample	Foam rolling intervention				Expertise	Control	Others experimental groups	Outcome measures	Effects
			Tool(s)	Targeted area	Treatment time and rate	Intensity (VAS)					
Garcia-Gutiérrez et al. (2017)	RCT	33 healthy and moderately active	Vibrating FR Non-vibrating FR	Plantar flexors – dominant leg	5 × 20 s 15 bpm	Much pressure as they could	1 test session	Yes	Vibrating foam roller (32 Hz) Non-vibrating foam roller	WBLT Maximal voluntary contraction plantar flexion/dorsiflexion Both legs	<b>Both groups</b> ↑ ankle ROM with a crossover effect NS difference between groups NS change strength
Grabow et al. (2017)	RCT	12 healthy and recreationnaly active	Foot roller	Sole	3 × 60 s 30 bpm	7/10 VAS	NR	No	Foam rolling leg Control leg	Modified SRBT WBLT	NS change dorsiflexion ROM NS change lower and hamstrings flexibility on ipsilateral and controlateral leg
Hsuan Su et al. (2017)	RC	30 college students physically active	High density FR	Quadriceps and hamstrings	3 × 30 s/muscle	Much pressure as they could	1 test session	Yes	Static stretching Foam rolling Dynamic stretching	SRBT Modified Thomas test	↑ quadriceps and hamstring flexibility
Jung et al. (2017)	RC	22 healthy subjects	Wooden stick	Suboccipital region, hamstrings and sole	1 × 4 min/muscle	NR	No	No	Foam rolling suboccipital Foam rolling hamstrings Foam rolling sole	SRBT	Thre groups ↑ lower and hamstrings flexibility
Do et al. (2018)	RCT	31 healthy and recreationnaly active	Micro foam roller	Plantar fascia	1 × 5 min	Much pressure as possible	NR	Yes	Foam rolling Sham group	Toe touch test Passive SLR	↑ lower back and hamstring flexibility
Killen et al. (2018)	RCT	23 healthy subjects	High density FR	Hamstrings	10 × 30 s 30 bpm	NR	1 test session	No	Static Stretching Foam rolling on dominant leg	SLR	Both groups ↑ contralateral hip ROM
Madoni et al. (2018)	RWS	22 healthy and recreationnaly active	High density FR	Hamstrings	3 × 30 s	Much pressure as they could	1 test session	Yes	Foam rolling	SLR	↑ hamstring flexibility
Phillips et al. (2018)	RC	24 healthy and recreationally active	Foam roller – not reported	Quadriceps, plantar flexors	1 × 60 s/muscle 10 bpm	Much pressure as they could	1 test session	Yes	Foam rolling : 60 s Foam rolling : 5 min Planking on a heating pad	Modified WBLT	↑ dorsiflexion ROM ↑ quadriceps flexibility 5 min > 60 s foam rolling
Jeong et al. (2019)	RC	30 young women	Massage ball	Hamstrings	3 × 30 s/zone	NR	NR	No	Foam rolling Self-stretching	90–90 SLR pre- and post-T+5, 30 min	Both groups ↑ ROM

(Continued)



TABLE 6 | Continued

Author (year)	Study design	Sample	Foam rolling intervention				Expertise	Control	Others experimental groups	Outcome measures	Effects
			Tool(s)	Targeted area	Treatment time and rate	Intensity (VAS)					
Lim and Park (2019)	RCT	20 healthy college students	Vibrating FR Non-vibrating FR	Hamstrings	5 × 60 s	NR	NR	No	Vibrating foam roller (32 Hz) Non-vibrating foam roller Static stretching	Active SLR Active knee extension test CMJ	Vibrating > non vibrating FR ↑ hamstrings flexibility NS change vertical power
Pathania and Muragod (2019)	RCT	45 elderly subjects with hamstring flexibility deficit (65–75 years of age)	High density FRM2T blade	Hamstrings	2–3 × 100–150 s	NR	NR	No	Foam rolling (FR) Static stretching (SS) Instrument assisted soft tissue mobilization (IASTM) 3 times/week over 4-weeks	Passive knee extension SRBT	↑ lower back and hamstring flexibility IASTM > FR > SS
Smith et al. (2019)	RCT	44 healthy and recreationnaly active	High density FR	Plantar flexors	3 × 30 s 60 bpm	NR	NR	No	Foam rolling Static Stretching Foma rolling + Static stretching	Ankle dorsifleixon ROM pre- and post-session 1, post- T+3, 6, 7 weeks	Three groups ↑ dorsiflexion ROM No synergic effect of FR and SS
Somers et al. (2019)	RCT	42 physical therapy students	Foam roller – not reported	Calves	2 × 60 s/Slowly	NR	NR	No	Foam rolling alone Dynamic stretch alone Foam rolling + dynamic stetch	WBLT	NS change in ankle ROM
Williams and Selkow (2019)	RC	15 healthy collegiate students	High density FR Lacrosse ball	Sole and hamstrings	1 × 120 s/muscle 60–90 bpm	As much pressure as they could	NR	No	Sole rolling Hamstrings foam Sole and hamstrings rolling	SRBT	Three techniques ↑ lower back and hamstring flexibility equally

RC, randomized crossover; RCT, randomized controlled trial; FR, foam roller; NR, not reported; bpm, beats per minute; ↑ indicates increase; ↓ indicates decrease; SRBT, sit-and-reach box test; WBLT, weightbearing lunge test; SLR, straigh leg raise; NS, not significant.

**TABLE 7** | The effects of foam rolling on neurophysiological and physiological variables.

Author (year)	Study design	Sample	Foam rolling intervention				Control	Others experimental groups	Outcome measures	Effects
			Tool(s)	Targeted area	Treatment time and rate	Intensity				
<b>Neurophysiological and physiological effects</b>										
Martínez-Cabrera and Núñez-Sánchez (2016)	RCT	7 professional soccer players	High density FR	Rectus femoris	4 × 15 s 30 bpm	NR	No	Foam rolling leg Control leg	Muscle contractile properties (TMG)	Maintains muscle contractile properties
Murray et al. (2016)	RC	12 squash players	High density FR	Quadriceps	1 × 60 s 30 bpm	NR	Yes	Foam rolling leg Control leg	Muscle contractile properties (TMG) Superficial temperature	NS change muscle contractile properties NS change skin temperature
Casanova et al. (2017)	RC	10 athletes	Roller massager	Plantar flexors	6 × 45 s 30 bpm	NR	Yes	Foam rolling leg Control leg	Muscle oxygenation (HHb concentration) Muscle morphology	NS change muscle oxygenation NS change muscle morphology
D'Amico and Paolone (2017)	RC	16 trained males	High density FR	Main lower limb muscles per leg	1 × 30 s/muscle 6 bpm	NR	Yes	Foam rolling	Blood sample VCO <sub>2</sub> pre- and post-each run	NS change blood lactate concentration NS change VCO <sub>2</sub>
Kalén et al. (2017)	RC	12 surf lifeguards	High density FR	Main lower limb muscles per leg	2 × 60 s	7/10	Yes	Foam rolling Running	Blood sample	Both groups ↑ blood lactate clearance
Beier et al. (2019)	RC	11 resistance trained subjects	Stick massage	Rectus femoris and gluteus maximus	1 × 120 s/muscle	Heavy pressure	No	Foam rolling Dynamic warm-up	Muscle activation (EMGs)	NS change muscle activation
Mazzei (2019)	RCT	15 NCAA Division I swimmers	Vibrating FR Non-vibrating FR	Plantar flexors	3 × 30 s 30 bpm	NR	No	Vibrating foam rolling (1200 to 3600 rpm) Non-vibrating foam rolling	Muscle activation (EMGs)	Both groups NS change muscle activation
Kim et al. (2014)	RCT	22 healthy subjects	FR-not reported	Main lower limb muscles and back	1 × 3–6 min	NR	Yes	Foam rolling	Blood sample	Both groups : ↓ cortisol

*(Continued)*

TABLE 7 | Continued

Author (year)	Study design	Sample	Foam rolling intervention				Control	Others experimental groups	Outcome measures	Effects
			Tool(s)	Targeted area	Treatment time and rate	Intensity				
Okamoto et al. (2014)	RC	10 healthy subjects	Polystyrene roller	Main lower limb muscles	20 repetition/muscle	NR	Yes	Foam rolling	Arterial stiffness Blood sample	↓ brachial-ankle pulse wave velocity ↑ vasoactive substance (↑ nitric oxide concentration)
Thistlethwaite et al. (2016)	Pilot test	6 subjects	PVC pipe	Iliotibial band, adductors, hamstrings, quadriceps)	1 × 180 s/muscle	NR	No	Foam rolling 3 times/week over 6 weeks	Endothelial function	↑ blood flow (↑ diameter of the femoral artery)
Ginszt et al. (2017)	Pilot test	20 healthy adults	High density FR	Right quadriceps	1 × 60 s	Much pressure as they could	No	Foam rolling leg Control leg	Muscle activation (EMGs)	↓ muscle fatigue
Hotfiel et al. (2017)	RCT	21 healthy students	High density FR	Iliotibial band	3 × 45 s	Much pressure as they could	No	Foam rolling	Arterial tissue perfusion post- T0, T+30 min	↑ arterial blood flow up to 30 min
Romero-Moraleda et al. (2017)	RCT	33 healthy and moderately active	High density FR	Quadriceps	5 × 60 s	More of their body weight	No	Foam rolling Neurodynamic mobilization	Muscle activation (EMGs) MVIC knee extension	Both interventions : ↑ muscle activation ↑ muscle strength
Schroeder et al. (2017)	RC	12 healthy and recreationally active	High density FR	Hamstrings, gluteus, lower back	3 × 60 s 15 bpm	40, 65, 75%	No	Weight training Stretching Foam rolling	Muscle contractile properties (TMG)	NS change muscle contractile properties
Hodgson et al. (2018)	RCT	23 healthy and recreationally active	Roller massager	Quadriceps and hamstrings	4 × 30 s/muscle 60 bpm	7/10	Yes	High frequencies (6 times /week) Low frequencies (3 times/week) over 4-weeks	Muscle activation (EMGs) Knee flexors, extensors MVIC	NS change muscle activation NS change muscle strength
Lastova et al. (2018)	RCT	15 healthy and recreationally active	High density FR	Main lower limb muscles and lower/upper back	1 × 40 s 15 bpm	NR	Yes	Foam rolling	Blood pressure Heart rate variability pre and post- T0, T+10, T+30 min	↓ blood pressure at 10 and 30 min ↓ sympathovagal balance at 30 min

(Continued)

TABLE 7 | Continued

Author (year)	Study design	Sample	Foam rolling intervention				Control	Others experimental groups	Outcome measures	Effects
			Tool(s)	Targeted area	Treatment time and rate	Intensity				
Macgregor et al. (2018)	RC	16 healthy recreationally active males	High density FR	Quadriceps	1 × 120 s 60 bpm	6/10	Yes	Foam rolling over 3 consecutive days	Muscle activation (EMGs) Muscle contractile properties (TMG)	↓ muscle activity ↑ muscle displacement
Madoni et al. (2018)	RCT	22 healthy and recreationally active	High density FR	Hamstrings	3 × 30 s	Much pressure as they could	Yes	Foam rolling	Muscle activation (EMGs) Maximal knee extension/flexion	NS change muscle activation NS change strength ratio
Capobianco et al. (2019)	RC	30 young and middle-aged adults	Therapy ball	Calf	3 × 60 s/leg 15 bpm	>5/10 (discomfort level)	No	Static stretching Foam rolling + static stretching	Muscle activation (EMGs) Subcutaneous tissue thickness	↑ muscle activation (foam rolling > static stretching) NS change subcutaneous tissue thickness
Kim et al. (2019)	RC	30 participants with neck pain (age: 65.9 ± 3.4 years)	Soft inflatable rubber ball Hard massage ball	Suboccipital region	1 × 10 secs	NR	Yes	Soft inflatable rubber ball Hard massage ball	Muscle activation (EMGs) Radiography (compressed soft tissue thickness and neck extension ROM)	Soft inflatable rubber ball vs hard massage ball Less muscle activity (less muscle tension) Less compressed soft tissue thickness
Ye et al. (2019)	RC	34 healthy and physically active	High density FR	Hamstrings	10 × 30 s 30 bpm	NR	Yes	Yes	Muscle activation (EMGs) Knee flexors MVIC	NS change muscle activity and strength

RC, randomized crossover; RCT, randomized controlled trial; FR, foam roller; NR, not reported; bpm, beats per minute; ↑ indicates increase; ↓ indicates decrease; MVIC, maximal voluntary isometric contraction; EMGs, surface electromyography; TMG, tensiomyography; NS, not significant.

Romero-Moraleda et al., 2017; **Table 5**). Regardless the tools' use, a foam roller, a massage stick, golf or tennis balls, the FR intervention yielded immediate flexibility and ROM gains (Cheatham et al., 2015; Grieve et al., 2015; Brengesjö and Lohaller, 2017; Monteiro et al., 2017, 2019). Foam roller and roller massager, for instance, were shown to elicit comparable increased ROM (Monteiro et al., 2017, 2019). This effect would be reinforced by few additional degrees with vibrating foam rollers. Frequencies between 33 and 62 Hz would guarantee higher ROM and PPT elevations, compared to a non-vibrating foam roller (Cheatham et al., 2017, 2019; Han et al., 2017; **Table 4**). In addition, ROM benefits would depend on a dose-response effect of FR (120 vs. 60 s) (Monteiro et al., 2017, 2019). More surprisingly, FR would also demonstrate the ability to have a delocalized effect. For example, FR of sole or hamstring muscles might positively influence lower back and hamstring flexibility by improving the sit-and-reach test scores, with a wooden stick or a tennis ball (Grieve et al., 2015; Jung et al., 2017; **Table 6**).

The most supported hypothesis to explain these changes would be a modification of the autonomic nervous system responses (Joshi et al., 2018; Dębski et al., 2019; Wiewelshove et al., 2019). The slow deep pressure would induce a decrease in the tone of related skeletal motor units by stimulating mechanoreceptors. This chain reaction would elicit a parasympathetic-dominant neurophysiological state, thus eliciting a greater relaxation (Schleip, 2003b). Mechanical pressure applied during FR would elicit similar effect. For example, in participants with rounded shoulder, both trapezius and pectoralis major muscles activity decreased after a FR intervention. This progress was accompanied by a reduction in shoulder height (Choi, 2019). These findings represent a useful source of information to guide FR practitioners. Indeed, local FR treatment therefore does not seem to be limited to a single element, but may impact all surrounding structures, even the whole body. This particularity represents a particular interest for physiotherapists to correct certain postural imbalances and/or muscular flexibility deficit.

Commonly used to improve ROM, FR has also been tested during warm-up to improve the physical qualities of athletes such as muscle power, strength or agility. However, unlike ROM, performance results obtained were not always clearly established (Burk et al., 2019; Hughes and Ramer, 2019; Skinner et al., 2020). Some studies recorded improvements in muscle power, strength or agility, after a single session of FR (D'Andrea, 2016; Sađirođlu, 2017; Stroiney et al., 2020). Other came to different conclusions. For example, FR was not shown to bring any significant improvement in performance (Burk et al., 2019). Few protocols have been tested and replicated enough to lead to real consensus. Indeed, between the protocols, many parameters differed such as outcome measures, FR tool, target muscles, type of population, participants' FR experience, and FR instructions (e.g., pressure level, duration and rate of treatment) (Burk et al., 2019; Dębski et al., 2019). It is likely that this experimental disparity justifies the heterogeneity of the results reported in the literature. Until a reliable consensus is reached, the use of FR for warm-up should certainly not be contraindicated. In fact, unlike static stretching, there was no loss of physical capacity

(Halperin et al., 2014; Bradley et al., 2016; Grabow et al., 2017; Su et al., 2017).

For the same reasons of reproducibility and the lack of sufficient data, effects of post-training FR on physiological markers remain inconclusive. In laboratory conditions, excluding physical exertion, first results revealed a decrease in brachial-ankle pulse wave velocity (from  $1202 \pm 105$  to  $1074 \pm 110$  cm/s) and an increase in plasma nitric oxide concentrations (from  $20.4 \pm 6.9$  to  $34.4 \pm 17.2$   $\mu\text{mol/L}$ ), reflecting an improvement in endothelial functions and arterial stiffness (Okamoto et al., 2014). Another study also observed an increase in the arterial blood flow. Compared to a baseline recording, the mean peak flow increased of 73.6% immediately after FR and 52.7% 30 min post-treatment (Hotfiel et al., 2017). The drop in blood pressure was also observed up to 30 min after FR, confirming the hypothesis of a positive effect of FR on cardiovascular protective effect and health (Lastova et al., 2018; **Table 7**). In training conditions, FR has been shown to be ineffective on the muscular re-oxygenation in the treated leg after a bilateral exercise inducing muscular damage (Casanova et al., 2017). Some indirect markers such as cortisol and lactate confirmed, by their fall, this positive influence of FR on blood circulation (Kim et al., 2014; Kalén et al., 2017). In conclusion, comparison of results between studies is delicate due to the singular nature of each experiment, increasing the difficulty of interpreting certain acute effects which are still undecided. Indeed, few protocols have been reproduced and sufficiently tested to establish a consensus and therefore an optimal FR program. In response to this uncertainty, two recent systematic reviews of literature proposed a framework to guide practitioners and researchers for future experiments (Dębski et al., 2019; Hendricks et al., 2019). According to these authors, acute effects identifiable by gains in ROM, increase in the PPT, reduction in DOMS, or even better vascular function, would be made possible by respecting certain rules of practice. It would therefore be wise for FR tool users to repeat each exercise 1–3 times at a rate of 20 bpm. A set of rolling should last between 30 and 120 s and followed by a 30 s recovery period. Pressure, on the other hand, has an individual character and a part of subjectivity. However, the application force should not exceed the pain tolerance threshold. On a pain scale, a 7/10 indicator or the following instruction, “*as large as possible*” is commonly used to guide practitioners for pressure (Dębski et al., 2019; Hendricks et al., 2019). FR tools, such as foam roller, roller massager or ball, should therefore be firm enough (Cheatham et al., 2015), and ischemic pressure is advised on sensitive areas until a feeling of release is obtained (Dębski et al., 2019; Hendricks et al., 2019). To complete this information, we argue that two additional parameters should be taken. To begin with, user experience in the practice of FR is required as FR requires some experience to master the level of pressure on the tool. Poor management can elicit excessive discomfort or pain, and bias the effects of FR technique. The second determining criterion is the number of areas treated. It seems that the effects of FR are short-lived, 10–20 min depending on the studies (MacDonald et al., 2013; Halperin et al., 2014; Jay et al., 2014; Škarabot et al., 2015; Kelly and Beardsley, 2016). It is therefore essential to ensure the effective duration of the routine so as not

to exceed this period and risk seeing the effects dissipate in the first target areas.

### Long-Term Interventions

The effects of FR were investigated within a span of several days or weeks. The paradigms either involved the follow-up of the effects of FR after a single session, or administered regular FR sessions along the intervention period. Protocols usually involved 2–5 sessions per week delivered within a span of 3–8 weeks. The use of a ball or foam roller demonstrated its usefulness for improving shoulder, knee, or ankle ROM (Le Gal et al., 2018; Smith et al., 2019), without harmful consequences on physical performance (Hodgson et al., 2019). Regular combination of FR and static stretching may have an additional effect for increasing ROM (Mohr et al., 2014; Škarabot et al., 2015). The effects of FR may be due to neural changes, the pressure exerting on the soft tissues increasing the tolerance to stretching, and therefore promoting performance gains (Škarabot et al., 2015).

With regard to vascular function, delayed beneficial effects were observed for a frequency of three FR sessions per week during a 6-week period (Thistlethwaite et al., 2016). A drop in blood pressure, heart rate variability, and sympathovagal balance, has also been reported (Chan et al., 2015; Lastova et al., 2018). Although this is premature to draw any firm conclusion, FR therefore appears effective to stimulate the organism and maintain better health.

### Procedures

FR techniques involve two main maneuvers which can be combined in a single routine. The pressure depends on the tool used, its density, and the target area (Miller and Rockey, 2006; Sullivan et al., 2013; Cheatham et al., 2015). Few studies recorded the pressure applied during FR with a specific designed constant pressure roller apparatus. Two experiments measured muscle strength and flexibility after a continuous pressure of 13 kg on the hamstrings (Sullivan et al., 2013), as well as 20 kg on the quadriceps, with roller massager (Bradbury-Squires et al., 2014). However, with a foam roller, these values usually range from 27 to 68% of the body weight, depending on the muscle and the position (e.g., bilateral, unilateral) of the participants (MacDonald et al., 2013; Murray et al., 2016; Macgregor et al., 2018; Baumgart et al., 2019). Research remains sparse on pressure level, and no specific value is recommended. However, the literature demonstrated the existence of a dose-dependent response to FR. Some authors reported a significant improvement between two treatments of different durations (Bradbury-Squires et al., 2014; Monteiro et al., 2017a; Phillips et al., 2018), whereas others did not corroborate an effect of the routine duration (Sullivan et al., 2013; Guillot et al., 2019; **Table 6**). Despite divergent results on its optimal use, FR practice systematically resulted in improved ROM and PPT (Jay et al., 2014; Cavanaugh, 2016; Kelly and Beardsley, 2016; Casanova et al., 2017; Cheatham and Baker, 2017; Garcia-Gutiérrez et al., 2018; Killen et al., 2018), trending approach consisting in the combination of active joint mobilization (e.g., knee flexion-extension movement) with FR practice (Cheatham and Baker, 2017; Cheatham et al., 2017, 2019; Cheatham and Kolber, 2018; Cheatham and Stull, 2018a,b;

**Table 4**). Such combination provided promising early effects on ROM gains (Cheatham et al., 2017; Han et al., 2017).

For safe and effective FR interventions, literature-driven guidelines should now be outlined and conceptualized. Quantifying the biomechanical workload applied through the FR routine is of critical importance. While higher mechanical compressions on the underlying tissues might be exerted using FR, compared to MMs, a potentially harmful impact on connective tissues, nerves, vessels and bones, should not be excluded. Deleterious effects must be controlled in future designs (Fleckenstein et al., 2017). External biomechanical loads should also be quantified to determine to which extent FR differs from MM in terms of pressures. Regular practice might be more suitable than longer session durations. Prolonged FR beyond 90 s of treatment in the same area might not bring any additional benefit (Monteiro et al., 2017a), and excess may even cause harmful effects. Eventually, practitioners should certainly adjust FR practice to their own sensations. For instance, PPT should never be exceeded to prevent injuries.

## MANUAL MASSAGE AND FOAM ROLLING AT THE SCOPE OF MOTOR CONTROL FRAMEWORKS

### From Resemblance to Dissimilarity

MM and FR are both likely to positively affect psychometric, behavioral and physiological variables. As mentioned in the previous sections, experimental data extensively confirmed their respective beneficial effects. The same organs and tissues are targeted by both techniques, which might account for the congruent pattern of beneficial results on well-being and motor performance. Furthermore, both techniques appeared to promote motor recovery, with similar body effects during warm-up and post-exercise recovery. They are associated with increased well-being and give the opportunity to temporarily improve ROM and PPT, without altering physical performance (i.e., power, strength, agility). In practice, however, MM and FR are highly distinct. During MM, athletes have no control over the massage parameters, whereas during FR, they produce voluntary movements to complete the routine, by regulating the level of pressure exerted and the speed of execution. While this may be considered an advantage inherent to the technique, the lack of standardization of FR protocols represents an obstacle to the development of clinical applications. Indeed, the few existing guidelines do not provide medical professionals the necessary levels of reproducibility and reliability for application of such routines in clinical populations (Cheatham et al., 2015; Schroeder and Best, 2015). Classically, a MM lasts between 15 and 30 min (Standley et al., 2010), compared to 30–120 s per muscle group for FR. This difference is explained by the more holistic approach of the body during MM. More muscle groups are manually massaged, and several techniques can be used in a single area, hence increasing the whole duration of treatment. Conversely, in most FR studies, one or two muscle groups are mainly involved for 30–120 s each (Dębski et al., 2019).

## Motor Control Implications

There is currently no hypothesis or conceptual approach that distinguishes MM from FR, even though a fundamental distinction between the two types of massaging interventions stems from the nature of their requirements in terms of motor control strategies. The person receiving a MM remains passive, lying on the massage table, usually in dorsal or ventral decubitus. The routine and the pressures derive from the physiotherapists' experience and available sensory feedback from the MM routine or provided by the patient. The gestures of the physiotherapist cannot be anticipated by the person, thus resulting in a retroactive mode of action control with an ongoing central integration of proprioceptive feedback (Hasegawa et al., 2001). Although the participant can adjust muscle tone at his convenience, he is primarily confronted with a retroactive mode of action control (Braver, 2012). Conversely, while performing FR, the person directly exerts pressures through voluntary actions to manipulate the massaging tool. FR thus requires a predominant proactive mode of action control, where proactive operations of forward and inverse modeling, which do not require sensory feedback from the periphery, are involved (Cervin et al., 2002). Although with tools such as balls or foam roller, where the individual simply uses the body weight to achieve the desired effects, it remains a comparable proactive mode of action control. If necessary, the person always has the possibility to use retroactive operations to adjust FR parameters. Contrary to MM, the sensory consequence of voluntary motor commands during FR can therefore be anticipated by means of the efferent copy derived from the forward model that associates motor commands with their sensory consequences. According to the dual mechanisms of motor control framework (Braver, 2012), MM and FR can thus be distinguished by the implementation of two distinct motor control strategies. These two interventions, with opposite modes of action, do not seem to offer any compromise. The user is unable to migrate from one mode of action to another. Interestingly, this limit could be easily resolved with technological advances and the appearance of collaborative robots. By its unique functionalities, this new generation of robot might conceptually reconcile the opposition of MM and FR. Indeed, the autonomy and real-time interaction capabilities of these robots with the user offer new perspectives in terms of motor control that have yet to be explored.

## ROBOTIC MASSAGE: AN EMERGING PARADIGM

### The Instrumentalization of Massage

To the best of our knowledge, there is yet no massage technique allowing for an actual combination of the retroactive and proactive modes of action control. The advent of intelligent robotic massage might contribute to integrate these two types of motor control within single massaging routines, and therefore provide a unique and complete approach to the massage experience. Spurred by an economic purpose, and to overcome limits of human faculties, several assisting devices

offering massage programs are already available in beauty salons and physiotherapists' offices (e.g., LPG endermologie®, H2O Body system®, wellsystem™). Such devices offer a relevant alternative to the MM, due to the fatigue of the physiotherapist, and the loss of efficiency resulting from repetitive practice. Accordingly, many professionals suffer from pathologies such as musculoskeletal disorder due to the amount of exposure to repeated uncomfortable postures, maneuvers and manipulations (Albert et al., 2008; Murali et al., 2014; Rossetini et al., 2016). Another strength of robotic devices delivering massages is the opportunity to homogenize massage techniques, such as the palpate-rolling in the context of anticellulite (Xiaoqin and Yonggen, 2010; Mezencevová et al., 2017). In the case of a purely robotic massage routine, participants for now remain in a passive situation, and thus exclusively engage retroactive modes of action control. Despite obvious advantages, first robotic devices failed to provide interactivity options of users toward the system, still requiring the presence and action of a physiotherapist, and remain somewhat expensive.

### The Limits of Standardization

Following pain and pathologies linked to the practice of MM for physiotherapist, a second wave of full automated systems has rapidly emerged. Although apparently similar, these tools were distinct by the substitution of the physiotherapist by a qualified operator specific to each machine. Unlike other devices, once turned on, some of these apparatus operate independently and therefore no longer required the intervention of a third person. Unfortunately, a standardized protocol was implemented without providing real adjustments to/by the user. Currently, several commercial devices, such as intermittent sequential pneumatic (Zelikovski et al., 1993), warm underwater water-jet massages (Viitasalo et al., 1995), and whole body vibrations (Edge et al., 2009), are thus available (Poppendieck et al., 2016). Unlike MM, during which the physiotherapist may encounter difficulties in applying constant pressures, techniques and durations, these devices providing whole body vibrations allow a deep control of vibration frequency, duration, and amplitude (Edge et al., 2009). In practice, these devices demonstrated limited effectiveness on physical performance (e.g., running performance, strength) and inconclusive results on recovery and physiological markers such as creatine kinase activity, pH, and lactate after intense effort (Zelikovski et al., 1993; Edge et al., 2009; Lau and Nosaka, 2011). We assume that individualization of the massage, incorporating morphology and expectations of the user, would certainly provide greater benefits. While some devices allow users to adjust few parameters of the massage, such modifications are not yet ergonomic (Golovin et al., 2018). Likewise, adjusting the program remains often impossible once the routine initiated. In all cases, the interaction between the user and the device therefore remains restricted to a retroactive motor control strategy for the user.

### The Challenges of Robotics

Advances in robotics gradually spread within the field of medicine (Petrescu et al., 2016). Like the da Vinci surgical robot and the ROSA™ spine robot, it is clearly established that robots can assist surgeons with precision during minimally invasive

procedures such as arthroscopy or laparoscopic splenectomy (Chapman et al., 2002; Lopez et al., 2013; Lefranc and Peltier, 2016). The increasing amount of robotic intervention should be considered within a broader framework. Indeed, once purely human, several medical interventions now seem to involve increasing amounts of robotic solutions. Massage interventions, for instance, could be envisioned as part of a continuum extending from purely robotic to purely human interventions. Nonetheless, robotic solutions remain insufficient and suffer from several limitations, particularly in terms of individualization, that hampers their therapeutic relevance in the absence of medical supervision. Due to the complexities and specificities of clinical interventions, it seems difficult to purely replace the massage delivered by a physiotherapist by a robot. There are multiple degree of adjustments to the patient's characteristics that remain difficult (not to say impossible) to implement in a robot. For these reasons, innovation in terms of robotic massages quickly spread to the field of wellness, less demanding and easier to reproduce. In this context, massage robots can be regarded as an important support, albeit emphasizing that the robot remains a tool, and not a possible avatar that could substitute actual human interventions.

Two similar projects, one Russian in 1998<sup>1</sup>, and a second in Israel, developed back massage robots, but failed to move from the project stage to commercial production (Nissim, 2001). In Japan, the Waseda University and Asahi Roentgen company developed the Waseda Asahi Oral-Rehabilitation Robot 1 (WAO-1) (Takanishi et al., 2008, 2009). This robotic device, originally designed to promote recovery of temporomandibular disorders, was highly technical, very expensive, and targeted a specific population. Experiments provided useful information on the pressure exerted on masseter and temporal muscles, with values ranging from 100 g to 1.5 kg (Koga et al., 2008; Ariji et al., 2009a,b, 2010; Ishii et al., 2009; Obokawa et al., 2009; Solis et al., 2009; Hiraiwa et al., 2013; **Table 8**). The most effective pressure inducing a better easy-mouth opening was 800 g on small facial muscles. This robot also increased perceived comfort of users, muscle pain management, increased perceived heat, and promoted functional motor recovery (e.g., mouth opening, blood circulation, saliva production, muscle thickness (Koga et al., 2008; Ariji et al., 2009a,b, 2010, 2015, 2016; Ishii et al., 2009; Obokawa et al., 2009; Solis et al., 2009; Hiraiwa et al., 2013; **Table 8**). Other similar robotics projects provided promising results with a drop in lumbar strain, heart rate and muscle activity (Peng et al., 2010; Luo and Chang, 2011; Hu et al., 2013; **Table 8**). Finally, a robotic massage system achieved attractive performance on relaxation by a respective decrease and increase of beta and alpha powers (Luo et al., 2016; **Table 8**). However, due to the small sample sizes and the complex study design, more experimental investigation remained needed to validate these results. A critical strength of these automated devices is the autonomy and the lack of external intervention of a physiotherapist, but they do still not allow individualizing the massage *per se*. For instance, the intensity of the massage did not integrate the pain threshold tolerated by the user and the preprogrammed trajectories did not really adapt to the morphology of each person. The available robotic massages

therefore positioned the user in a passive situation, once again favoring a retroactive control mode, similar to that elicited by the MM. Furthermore, by treating a single relatively restricted area, the robot ended up repeating the same trajectories. In view of these circumstances, the lack of human/robot interaction prevents from real anticipation of the massage maneuvers by the user, hence reducing a switch from a retroactive to a proactive control mode. For these reasons, and given the high cost of these solutions, such devices have not yet reached the market.

## The Perspectives of an Interactive and Autonomous Robotics

In this review, we shall consider a conceptual approach intended as a preamble to an original and timely research topic. Beyond a conceptual comparison, we question the possibility of an emerging solution to really match the two modes of control of the participant receiving the massage. Through incorporation of sensors into each axis, the last generation of devices, called collaborative robots, offer promising and innovative solutions which might definitively resolve the main issues mentioned previously. A Singaporean startup (AiTreat) developed since 2015 a device, called EMMA, specialized in the 'Tui Na' therapeutic massage. Although this massage robot uses some principles of artificial intelligence to customize massage trajectories, it is not entirely autonomous. The machine still requires the intervention of a health professional to identify the treatment areas and set the robot (Qiu et al., 2019). A Spanish company, Adamo Robot, then developed a physiotherapeutic robotic treatment solution since 2015. This device has the particularity of operating with compressed air, therefore without direct contact with the user (Jimenez, 2019). In the same massage robotic field, Massage Robotics, an American startup, developed a concept dedicated to massage centers, but the patent accompanying this project has been abandoned (Mackin, 2017). Indeed, based on a patent already existing in the field, their patent was refused after an analysis by a validation office, due to a lack of innovative character (Nissim, 2001). Finally, Capsix Robotics, a French startup, developed since 2016 a solution with a iYU® robot, intended for full autonomy and back muscle relaxation. The robotic device, equipped with a 3D sensor and coupled to its generic model, is expected to reproduce trajectories on any type of morphology (Eyssautier and Gibert, 2018). These different projects represent emerging solutions to make massages accessible to as many people as possible in the gym or workplace, for example. However, to our knowledge, no study has been carried out to demonstrate the effectiveness of massages provided by such collaborative robot. This issue may be critical in ageing population. Japan is the first concerned with the highest rates of aging (Anderson and Hussey, 2000; Koga et al., 2008), and the country anticipates an increased in needs for medical care (Koga et al., 2008). Robotic solutions are scalable and robotic devices allow non-therapeutic and therapeutic interventions with standardized routines, including automatic adaptation to the morphology of the person through preliminary configuration recordings. Interestingly, the most recent robotic solutions also allow for manual control to adjust the pressure applied by the device in real-time.

<sup>1</sup><http://medicalrobot.narod.ru/articles.html>



**TABLE 8** | Different acute effects of robotic massage.

Author (year)	Study design	Sample	Robotic massage intervention					Control	Others experimental groups	Test – outcome measures	Effects
			Robot	Targeted area	Techniques	Treatment time	Intensity				
Koga et al. (2008)	CCT	Head model 11 healthy subjects	WAO-1	Masseter and temporalis	Effleurage, petrissage (rotation and rubbing)	1 × 1–5 min/parotid gland	1–10 N	No	Robotic massage Manual massage	Level of force Saxon test Skin temperature Size of masseter muscle	Both groups Same force production ↑ production of saliva(doctor > robot) ↑ skin temperature ↑ size of muscle
Obokawa et al. (2009)	CCT	29 healthy subjects 26 subjects with TMJ disorders	WAO-1	Masseter and temporalis	Effleurage, petrissage (rotation and rubbing)	1 × 10 min	1–10 N	No	Robotic massage 1 ~ 2 N 6 ~ 8 N 10 N 6–10 N	Comfort VAS-10 Perceived warmth VAS-10 Easy-mouth opening VAS-10 Perceived lameness VAS-10	Four groups ↑ comfort ↑ perceived warmth 6–10 N : ↑ easy-mouth opening ↑ lameness muscle
Ishii et al. (2009)	CCT	18 healthy subjects	WAO-1	Masseter and temporalis	Effleurage, petrissage (rotation and rubbing)	1 × 120 s/parotid gland	1–15 N	No	Robotic massage Manual massage	Saxon test Skin temperature Width of masseter muscle	Both groups ↑ production of saliva ↑ fascial skin temperature ↑ width muscle
Ariji et al. (2009a)	CCT	6 healthy subjects 6 subjects with TMJ disorders	WAO-1	Masseter and temporalis	Effleurage, petrissage (rotation and rubbing)	7 × 60 s/muscle	1–12 N	No	Robotic massage 1 ~ 2 N 6 ~ 8 N 10 N 3 times/2 week over 6–22 weeks	Pain VAS-10 Impediments of daily life VAS-10 Perceived comfort VAS-10 Perceived warmth VAS-10 Easy-mouth opening VAS-10	↓ muscle pain ↑ daily life 6 ~ 8 N: ↑ comfort 6–10 N: ↑ warmth 10 N: ↑ easy-mouth opening
Ariji et al. (2009b)	CCT	16 healthy subjects 2 subjects with TMJ disorders	WAO-1	Masseter and temporalis	Effleurage, petrissage (rotation and rubbing)	7 × 60 s/muscle	1–12 N	No	1 ~ 2 N 6 ~ 8 N 8–10 N 10 N 3 times/2 weeks	Pain VAS-10 Easy-mouth opening VAS-10 Perceived comfort VAS-10 Masseter stiffness index	↓ muscle pain ↑ easy mouth opening 6–10 N: ↑ comfort 6–10 N: ↑ muscle stiffness index

(Continued)

TABLE 8 | Continued

Author (year)	Study design	Sample	Robotic massage intervention					Control	Others experimental groups	Test – outcome measures	Effects
			Robot	Targeted area	Techniques	Treatment time	Intensity				
Solis et al. (2009)	CCT	12 healthy subjects	WAO-1 WAO-1R	Masseter and temporalis	Effleurage, petrissage (rotation and rubbing)	1 × 60 s/muscle	8–12 N	No	Robotic massage WAO-1 WAO-1R	Time index Masseter thickness Mouth opening index Skin temperature	WAO-1R > WAO ↓ require time ↑ muscle thickness Trend ↑ mouth opening NS change skin temperature
Ariji et al. (2010)	CCT	15 subjects with single or bilateral TMJ disorders	WAO-1	Masseter and temporal	Effleurage, petrissage (rotation and rubbing)	7– 10 × 60 s/muscle	8–12 N		Unilateral robotic massage Bilateral robotic massage 3 times/week over 6-weeks	Masseter thickness Intramuscular sonographic appearance Pain VAS-10 Perceived comfort VAS-10 Perceived warmth VAS-10 Easy-mouth opening VAS-10	↓ muscle thickness for symptomatic side ↓ muscle pain ↓ anaerobic areas ↑ comfort ↑ warmth ↑ easy-mouth opening
Peng et al. (2010)	RCT	1 healthy man	Ronot – not reported	Back muscles	Pushing, picking-up and kneading	NR	NR	No	Robotic massage	Heart rate Breathing rate Skin temperature	↓ heart rate NS change breathing rate NS change skin temperature
Luo and Chang (2011)	RCT	5 healthy adults	Multi-finger robot hand	Shoulder	Grasp-kneading	1 × 10 min	1–20 N	Yes	Hand massage Robot hand massage	Muscle activity	Both groups ↓ muscle activity
Hiraiwa et al. (2013)	RCT	16 patients with myofascial pain 24 healthy subjects	WAO-1	Masseter and temporal	Effleurage, petrissage (rubbing movement)	7– 10 × 60 s/muscle	6–14 N	Yes	Patients 1 time/week or 2 weeks over 6–12 weeks	Masseter PPT Pain VAS-10 Impediments of daily life VAS-10 Perceived comfort VAS-10 Perceived warmth VAS-10 Easy-mouth opening VAS-10 every 3 sessions	↓ sensivity only in patients ↓ muscle pain ↑ comfort ↑ warmth ↑ easy-mouth opening

(Continued)

TABLE 8 | Continued

Author (year)	Study design	Sample	Robotic massage intervention				Control	Others experimental groups	Test – outcome measures	Effects	
			Robot	Targeted area	Techniques	Treatment time					Intensity
Lei Hu et al. (2013)	RCT	30 patients with lumbar muscle strain	NR	Latissimus dorsi and erector spinae	Rolling, thumb kneading, pinching, pressing and vibrating	3* techniques with interval about 5 min	NR	No	Robotic massage (based on the expert database)	Lumbar PPT Lumbar strain VAS-10	↓ lumbar sensitivity ↓ lumbar strain
Ariji et al. (2015)	RCT	41 patients with temporomandibular disorder	WAO-1	Masseter and temporalis	Effleurage, petrissage (rotation and rubbing)	7 × 60 s/muscle	6–14 N	No	Effective group Ineffective group 5 times/2 weeks over 12 weeks	Muscle thickness Pain VAS-10 Maximal mouth opening Impediments of daily life VAS-10 Perceived comfort VAS-10 Perceived warmth VAS-10 Easy-mouth opening VAS-10 all 3 sessions	↓ muscle thickness symptomatic ↓ muscle pain ↑ maximal mouth opening ↑ daily life ↑ comfort ↑ warmth ↑ easy-mouth opening
Ariji et al. (2016)	RCT	37 patients with TMJ disorders	WAO-1	Masseter and temporalis	Effleurage, petrissage (rotation and rubbing)	7 × 60 s/muscle	10 N	No	Effective group Ineffective group 5 times/2 weeks over a median duration of 9.5 weeks	Muscle thickness Pain VAS-10 Maximal mouth opening pre- and post-treatment T0, T+1, 5 weeks	↑ frequency of visibility of the distinct intramuscular echo genic bands ↓ elasticity index ratio ↑ maximal mouth opening
Luo et al. (2016)	RCT	7 healthy subjects	Robot – not reported	Back	Pressing, rubbing and stroking	1 × 10 min	NR	No	Massage robotic	Electrical activity of the brain pre- and post-treatment	↑ delta power ↓ alpha power (suggesting relaxation)

RCT, randomized controlled trial; CCT, controlled clinical trial; TMJ, temporomandibular joint; WAO1-R, Waseda Asahi Oral Rehabilitation Robot 1; N, Newton; NR, not reported; ↑ indicates increase; ↓, indicates decrease; NS, not significant.

To our knowledge, iYU<sup>®</sup> robot is the first device allowing users to implement such options, hence conceptually conciliating the proactive and retroactive modes of action control. From a conceptual viewpoint, such advent in robotic solutions might be a pioneering birth for a new kind of massages combining these two modes of action control. A major innovation of such devices would offer the opportunity to navigate from automated massage routines to user-controlled massage routines. When the robot operates based on a predetermined massage mode selected by the user, a primary retroactive motor control strategy would be engaged as long as the trajectories cannot be predicted by the participant, i.e., such as during a MM. By interacting with the machine and controlling the parameters of the massage with a remote-control device, the user could switch to a proactive mode of action control, such as during FR. This transition faculty, from one mode of control to the other, definitely represents an innovative conceptual approach in terms of human-machine interactions.

## Limits and Perspectives

To date, with the development of collaborative robotic massage, it is possible to see a novel stochastic sensorimotor user experience. These robots are now less expensive and provide multiple advantages for users such as increased precision, availability, privacy and user choices. The addition of a remote user control, as in the case of iYu<sup>®</sup> Pro, would complete the device and the whole extent of possible fields. In this context, an opportunity to interact with the device during the session would be offered, reconciling the two motor control strategies. Although these emerging solutions and the idea of conceptual bridge are attractive, extreme caution should be exercised and critical aspects questioning both users' safety and benefits of the massage are awaiting experimental investigation. This freedom of use certainly offers new perspectives, but also implies special attention to the level of autonomy granted, so as not to represent any risk for users. Pressure levels and/or trajectories cannot be randomly administered, and these parameters should be predetermined and supervised by a professional. Also, therapeutic massages require consideration of the histological structure and physiological processes occurring in the body (Lima et al., 2020). This aspect represents a major issue since these limits are different from one person to another, depending on the muscle mass, the habit of self-massage and the presence of dysfunctions requiring medical considerations. For both safety and individualization reasons, purely replacing therapeutic massage interventions classically administered by physiotherapists by a robotic device appears impossible. It is indeed necessary to obtain feedback during the massage routine, directly from the patient and as a result of palpation performed by the therapist. Nonetheless, new types of robotic massages should continue being tested in experimental studies, in particular to differentiate the effects of robotic massages in a so-called preventive/wellness context, from those encountered in a therapeutic context.

In addition, from an ethical standpoint, robotic replicates of MM could easily be considered an inappropriate substitute to actual human interventions. Nonetheless, this should not condemn the potential relevance of robotic solutions. These offer many advantages, particularly from a preventive viewpoint.

Considering the important workload for physiotherapists and frequent limited medical resources, robotic devices represent a solid alternative to provide *assistance* in their tasks (Golovin et al., 2018). They may alleviate part of the workload faced by medical professionals, and be used to administer simple and reproducible preliminary manipulations. A compound benefit would be allowing physiotherapists to focus on more complex and demanding interventions which cannot be performed by a robot (e.g., joint mobilization, stretching and strengthening exercises). For instance, a collaborative and intelligent robot could be an efficient tool to reduce the risk of musculoskeletal injuries associated with the lack of joint mobilization (e.g., thumb, wrist, shoulder, neck and low back pain). Robotic solutions would also provide an opportunity to democratize access to the practice of massage or self-massage, and thus contribute to improve well-being, health and therapeutic outcomes (Golovin et al., 2018).

Nonetheless, the use of a robotic device for curative massage interventions is questionable. It raises the issue of whether the actual experience of a physiotherapist can be robotized. Physiotherapists adjust their manipulations based on the reaction of their patient. Apart from the massage of scar tissue, MM requires intense and repetitive work by the practitioner. The fine adjustments derived from ongoing feedback, which are continuously available to the physiotherapist, remain essential to the treatment efficacy. MM remains, in this view, a specific form of human interaction that cannot be restricted to mechanical pressures, and robots remain, at this point, a tool at the disposal of medical practitioners.

Eventually, the presence of a remote control allowing to interact in real-time with the robotic device during the massage may hamper the benefits of the massage. For instance, in a clinical context, the patient could avoid the necessary amount of pain associated with pain in edema resorption routines. Also, each control command of the user on the remote requires cognitive operations. Requirements for cognitive control during the massage might preclude optimal states of relaxation. During MM, the user usually manages to detach himself from the effects of the routine by practicing the so-called "letting go" (Corner et al., 1995; Richards, 1998). Among the main unresolved questions, researchers still have to determine whether users are able to relax despite the cognitive mobilization required by the remote control and the interaction with the device. Researchers should also question whether a robotic massage may be perceived as being as effective as a MM performed by a physiotherapist for wellness purposes, whether its benefits are similar to those of FR or MM, and whether it may influence psychological (e.g., perceived relaxation, fatigue, pain) and physiological variables (e.g., decrease in perceived anxiety, decreased arousal) in a similar way. Resolving these issues will undoubtedly be an exciting focus of research in the coming years.

## AUTHOR CONTRIBUTIONS

YK, AG and FDR designed the conceptual background of the review and wrote the manuscript. YK, CE, AG, and FDR read, amended, and approved the final version.

## REFERENCES

- Abels, K. M. (2013). *The Impact of Foam Rolling on Explosive Strength and Excitability of the Motor Neuron Pool: Materials Science*. Austin, TX: The University of Texas at Austin.
- Aboodarda, S., Spence, A., and Button, D. C. (2015). Pain pressure threshold of a muscle tender spot increases following local and non-local rolling massage. *BMC Musculoskelet. Disord.* 16:265. doi: 10.1186/s12891-015-0729-5
- Abrantes, R., Nunes, S., Monteiro, E., Fiuza, A., Cesar Cunha, J., Ribeiro, M., et al. (2019). Massage acutely increased muscle strength and power force. *J. Exerc. Physiol. Online* 22, 100–109.
- Albert, W. J., Currie-Jackson, N., and Duncan, C. A. (2008). A survey of musculoskeletal injuries amongst Canadian massage therapists. *J. Bodywork Movement Ther.* 12, 86–93. doi: 10.1016/j.jbmt.2007.03.003
- Anderson, G. F., and Hussey, P. S. (2000). Population aging: a comparison among industrialized countries. *Health Aff* 19, 191–203. doi: 10.1377/hlthaff.19.3.191
- Andrade, C. K. (2013). *Outcome-Based Massage: Putting Evidence into Practice*. Philadelphia, PA: Lippincott Williams and Wilkins.
- Arabaci, R. (2008). Acute effects of pre-event lower limb massage on explosive and high speed motor capacities and flexibility. *J. Sports Sci. Med.* 7, 549–555.
- Arazi, H., Asadi, A., and Hoseini, K. (2012). Comparison of two different warm-ups (static-stretching and massage): effects on flexibility and explosive power. *Acta Kinesiol.* 6, 55–59.
- Ariji, Y., Katsumata, A., Hiraiwa, Y., Izumi, M., Iida, Y., Goto, M., et al. (2009a). Use of sonographic elastography of the masseter muscles for optimizing massage pressure: a preliminary study. *J. Oral Rehabil.* 36, 627–635. doi: 10.1111/j.1365-2842.2009.01977.x
- Ariji, Y., Katsumata, A., Hiraiwa, Y., Izumi, M., Sakuma, S., Shimizu, M., et al. (2010). Masseter muscle sonographic features as indices for evaluating efficacy of massage treatment. *Oral Radiol. Endodontol.* 110, 517–526. doi: 10.1016/j.tripleo.2010.05.003
- Ariji, Y., Katsumata, A., Ogi, N., Izumi, M., Sakuma, S., Iida, Y., et al. (2009b). An oral rehabilitation robot for massaging the masseter and temporal muscles: a preliminary report. *Oral Radiol.* 25, 53–59. doi: 10.1007/s11282-009-0014-0
- Ariji, Y., Nakayama, M., Nishiyama, W., Ogi, N., Sakuma, S., Katsumata, A., et al. (2015). Potential clinical application of masseter and temporal muscle massage treatment using an oral rehabilitation robot in temporomandibular disorder patients with myofascial pain. *CRANIO®* 33, 256–262. doi: 10.1179/2151090314Y.0000000030
- Ariji, Y., Nakayama, M., Nishiyama, W., Ogi, N., Sakuma, S., Katsumata, A., et al. (2016). Can sonographic features be efficacy predictors of robotic massage treatment for masseter and temporal muscle in patients with temporomandibular disorder with myofascial pain? *CRANIO®* 34, 13–19. doi: 10.1179/2151090314Y.0000000037
- Arroyo-Morales, M., Olea, N., Martínez, M. M., Hidalgo-Lozano, A., Ruiz-Rodríguez, C., and Díaz-Rodríguez, L. (2008). Psychophysiological effects of massage-myofascial release after exercise: a randomized sham-control study. *J. Alternat. Compl. Med.* 14, 1223–1229. doi: 10.1089/acm.2008.0253
- Baumgart, C., Freiwald, J., Kühnemann, M., Hotfiel, T., Hüttel, M., and Hoppe, M. W. (2019). Foam rolling of the calf and anterior thigh: biomechanical Loads and acute effects on vertical jump height and muscle stiffness. *Sports* 7:27. doi: 10.3390/sports7010027
- Beier, Z., Earp, I., and Korak, J. A. (2019). Self-myofascial release does not improve back squat range of motion, alter muscle activation, or aid in perceived recovery 24-hours following lower body resistance training. *Int. J. Exerc. Sci.* 12, 839–846.
- Best, T. M., Hunter, R., Wilcox, A., and Haq, F. (2008). Effectiveness of sports massage for recovery of skeletal muscle from strenuous exercise. *Clin. J. Sport. Med.* 18, 446–460. doi: 10.1097/jsm.0b013e31818837a1
- Boguszewski, D., Falkowska, M., Adamczyk, J. G., and Białoszewski, D. (2017). Influence of foam rolling on the functional limitations of the musculoskeletal system in healthy women. *Biomed. Hum. Kinet.* 9, 75–81. doi: 10.1515/bhk-2017-0012
- Bradbury-Squires, D. J., Nofall, J. C., Sullivan, K. M., Behm, D. G., Power, K. E., and Button, D. C. (2014). Roller-massager application to the quadriceps and knee-joint range of motion and neuromuscular efficiency during a lunge. *J. Athletic Train.* 49, 133–140. doi: 10.4085/1062-6050-49.5.03
- Bradley, J., Gomez, J., and Woods, T. (2016). The effect of foam rolling on subsequent exercise performance in man. *Sec. Biomed. Sci.* 185, S45–S45.
- Braver, T. S. (2012). The variable nature of cognitive control: a dual mechanisms framework. *Trends Cogn. Sci.* 16, 106–113. doi: 10.1016/j.tics.2011.12.010
- Brengešj, O., and Lohaller, J. (2017). Effects of foam rolling on ankle joint ROM and hamstring flexibility. *Open Orthop. J.* 9, 450–455.
- Brummitt, J. (2008). The role of massage in sports performance and rehabilitation: current evidence and future direction. *North Am. J. Sports Phys. Ther.* 3, 7–21.
- Burk, C., Perry, J., Lis, S., Dischiavi, S., and Bleakley, C. (2019). Can myofascial interventions have a remote effect on ROM? a systematic review and meta-analysis. *J. Sport Rehabil.* 1, 1–23. doi: 10.1123/jsr.2019-0074
- Calvert, R. N. (2002). *The History of Massage: An Illustrated Survey From Around the World*. Rochester: Inner Traditions-Bear and Co.
- Capobianco, R. A., Mazzo, M. M., and Enoka, R. M. (2019). Self-massage prior to stretching improves flexibility in young and middle-aged adults. *J. Sports Sci.* 37, 1543–1550. doi: 10.1080/02640414.2019.1576253
- Carcano, Y., Isembrand, B., Wiecezorek, G., and Boudjemaa, B. (2010). Le ressenti de sportifs lors d'un massage de récupération en termes de douleur et fatigue musculaires et de bien-être. *Rôle Place Bandages Adhésifs Actifs Coule.* 10, 46–50. doi: 10.1016/S1779-0123(10)74907-X
- Casanova, N., Reis, J. F., Vaz, J. R., Machado, R., Mendes, B., Button, D. C., et al. (2017). Effects of roller massager on muscle recovery after exercise-induced muscle damage. *J. Sports Sci* 36, 56–63. doi: 10.1080/02640414.2017.1280609
- Cavanaugh, T. (2016). *The Effects of Foam Rolling on Muscular Co-activation Around the Knee Joint. Master of Science in Kinesiology*. St. John's, NL: Memorial University of Newfoundland.
- Ceca, D., Elvira, L., Guzmán, J. F., and Pablos, A. (2017). Benefits of a self-myofascial release programme on health-related quality of life in people with fibromyalgia: a randomized controlled trial. *J. Sports Med. Phys. Fitness* 57, 993–1002.
- Cervin, A., Eker, J., Bernhardsson, B., and Årzén, K.-E. (2002). Feedback-feedforward Scheduling of control tasks. *Real Time Syst.* 23, 25–53. doi: 10.1023/A:1015394302429
- Chan, Y.-C., Wang, T.-J., Chang, C.-C., Chen, L.-C., Chu, H.-Y., Lin, S.-P., et al. (2015). Short-term effects of self-massage combined with home exercise on pain, daily activity, and autonomic function in patients with myofascial pain dysfunction syndrome. *J. Phys. Ther. Sci.* 27, 217–221. doi: 10.1589/jpts.27.217
- Chapman, W. H. H., Albrecht, R. J., Kim, V. B., Young, J. A., and Chitwood, W. R. (2002). Computer-assisted laparoscopic splenectomy with the da Vinci™ surgical robot. *J. Laparoend. Adv. Surg. Tech.* 12, 155–159. doi: 10.1089/10926420260188038
- Cheatham, S. W., and Baker, R. (2017). Differences in pressure pain threshold among men and women after foam rolling. *J. Bodywork Mov. Ther.* 21, 978–982. doi: 10.1016/j.jbmt.2017.06.006
- Cheatham, S. W., and Kolber, M. J. (2018). Does roller massage with a foam roll change pressure pain threshold of the ipsilateral lower extremity antagonist and contralateral muscle groups? An exploratory study. *J. Sport Rehabil.* 27, 165–169. doi: 10.1123/jsr.2016-0196
- Cheatham, S. W., Kolber, M. J., and Cain, M. (2017). Comparison of video-guided, live instructed, and self-guided foam roll interventions on knee joint range of motion and pressure pain threshold: a randomized controlled trial. *Int. J. Sports Phys. Ther.* 12, 242–249.
- Cheatham, S. W., Kolber, M. J., Cain, M., and Lee, M. (2015). The effects of self-myofascial release using a foam roll or roller massager on joint range of motion, muscle recovery, and performance: a systematic review. *Int. J. Sports Phys. Ther.* 10, 827–838.
- Cheatham, S. W., and Stull, K. R. (2018a). Comparison of three different density type foam rollers on knee range of motion and pressure pain threshold: a randomized controlled trial. *Int. J. Sports Phys. Ther.* 13, 474–482.
- Cheatham, S. W., and Stull, K. R. (2018b). Comparison of a foam rolling session with active joint motion and without joint motion: a randomized controlled trial. *J. Bodywork Movement Ther.* 22, 707–712. doi: 10.1016/j.jbmt.2018.01.011
- Cheatham, S. W., Stull, K. R., and Kolber, M. J. (2019). Comparison of a vibration roller and a nonvibration roller intervention on knee range of motion and Pressure pain threshold: a randomized controlled trial. *J. Sport Rehabil.* [Epub ahead of print]. doi: 10.1123/jsr.2017-0164
- Cho, S.-H., Kim, S.-H., and Park, D.-J. (2015). The comparison of the immediate effects of application of the suboccipital muscle inhibition and self-myofascial release techniques in the suboccipital region on short hamstring. *J. Phys. Ther. Sci.* 27, 195–197. doi: 10.1589/jpts.27.195

- Choi, J.-H. (2019). Effect of an exercise program using a foam roller on shoulder height and muscle activity in adults in their twenties with round shoulder. *Indian J. Public Health Res. Dev.* 10, 1112-1118. doi: 10.5958/0976-5506.2019.01220.8
- Corner, J., Cawley, N., and Hildebrand, S. (1995). An evaluation of the use of massage and essential oils on the wellbeing of cancer patients. *Int. J. Palliat. Nurs.* 1, 67-73. doi: 10.12968/ijpn.1995.1.2.67
- Correia, P. P. (2016). Effects of roller massager on muscle performance, morphology, and oxygenation after exercise-induced muscle damage. *J. Sports Sci* 36, 56-63.
- Crane, J. D., Ogborn, D. I., Cupido, C., Melov, S., Hubbard, A., Bourgeois, J. M., et al. (2012). Massage therapy attenuates inflammatory signaling after exercise-induced muscle damage. *Sci. Transl. Med.* 4:119ra13. doi: 10.1126/scitranslmed.3002882
- Cupido, C. (2010). *Effects of Massage Therapy After Exhaustive Endurance Exercise in Young Healthy Males*. Masters of Science in Kinesiology Thesis. Degree of Masters of Science in Kinesiology, McMaster University, Hamilton, ON.
- D'Amico, A., and Paolone, V. (2017). The effect of foam rolling on recovery between two eight hundred metre runs. *J. Hum. Kinet.* 57, 97-105. doi: 10.1515/hukin-2017-0051
- D'Andrea, J. (2016). *Foam Rolling as a Novel Warm-up Technique for Anaerobic Power activities*. Wayne, NJ: The William Paterson University of New Jersey.
- Dawson, L. G., Dawson, K. A., and Tiidus, P. M. (2004). Evaluating the influence of massage on leg strength, swelling, and pain following a half-marathon. *J. Sports Sci. Med.* 3:37.
- Dębski, P., Białas, E., and Gnat, R. (2019). The parameters of foam rolling, self-myofascial release treatment: a review of the literature. *Biomed. Hum. Kinet.* 11, 36-46. doi: 10.2478/bhk-2019-0005
- Delextrat, A., Calleja-González, J., Hippocrate, A., and Clarke, N. D. (2013). Effects of sports massage and intermittent cold-water immersion on recovery from matches by basketball players. *J. Sports Sci.* 31, 11-19. doi: 10.1080/02640414.2012.719241
- Do, K., Kim, J., and Yim, J. (2018). Acute effect of self-myofascial release using a foam roller on the plantar fascia on hamstring and lumbar spine superficial back line flexibility. *Phys. Ther. Rehabil. Sci.* 7, 35-40. doi: 10.14474/ptrs.2018.7.1.35
- Drinkwater, E. J., Latella, C., Wilsmore, C., Bird, S. P., and Skein, M. (2019). Foam rolling as a recovery tool following eccentric exercise: potential mechanisms underpinning changes in jump performance. *Front. Physiol.* 10:768. doi: 10.3389/fphys.2019.00768
- Drust, B., Atkinson, G., Gregson, W., French, D., and Binningsley, D. (2003). The effects of massage on intra muscular temperature in the vastus lateralis in humans. *Int. J. Sports Med.* 24, 395-399. doi: 10.1055/s-2003-41182
- Dupuy, O., Douzi, W., Theurot, D., Bosquet, L., and Dugué, B. (2018). An evidence-based approach for choosing post-exercise recovery techniques to reduce markers of muscle damage, soreness, fatigue, and inflammation: a systematic review with meta-analysis. *Front. Physiol.* 9:403. doi: 10.3389/fphys.2018.00403
- Edge, J., Mündel, T., Weir, K., and Cochrane, D. J. (2009). The effects of acute whole body vibration as a recovery modality following high-intensity interval training in well-trained, middle-aged runners. *Eur. J. Appl. Physiol* 105, 421-428. doi: 10.1007/s00421-008-0919-z
- Eriksson Crommert, M., Lacourpaille, L., Heales, L. J., Tucker, K., and Hug, F. (2015). Massage induces an immediate, albeit short-term, reduction in muscle stiffness. *Scand. J. Med. Sci. Sports* 25, e490-e496. doi: 10.1111/sms.12341
- Espí-López, G. V., Serra-Añó, P., Cuenca-Martínez, F., Suso-Martí, L., and Inglés, M. (2020). Comparison between classic and light touch massage on psychological and physical functional variables in athletes: a randomized pilot trial. *Int. J. Ther. Massage Bodywork* 13, 30-37. doi: 10.3822/ijtmb.v13i3.551
- Eyssautier, F., and Gibert, G. (2018). *Device for Managing the Movements of a Robot, and Associated Treatment Robot*. U.S. Patent No Patent No FR3067957. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Fairall, R. R., Cabell, L., Boergers, R. J., and Battaglia, F. (2017). Acute effects of self-myofascial release and stretching in overhead athletes with GIRD. *J. Bodywork Mov Ther.* 21, 648-652. doi: 10.1016/j.jbmt.2017.04.001
- Fama, B. J., and Buetti, D. R. (2011). *The Acute Effect of Self-Myofascial Release on Lower Extremity Plyometric Performance*. Limoges: IRFSS.
- Farr, T., Nottle, C., Nosaka, K., and Sacco, P. (2002). The effects of therapeutic massage on delayed onset muscle soreness and muscle function following downhill walking. *J. Sci. Med. Sport* 5, 297-306. doi: 10.1016/S1440-2440(02)80018-4
- Field, T., Grizzle, N., Scafidi, F., Abrams, S., Richardson, S., Kuhn, C., et al. (1996). Massage therapy for infants of depressed mothers. *Infant Behav. Dev.* 19, 107-112. doi: 10.1016/S0163-6383(96)90048-X
- Field, T., Hernandez-Reif, M., Diego, M., Schanberg, S., and Kuhn, C. (2005). Cortisol decreases and serotonin and dopamine increase following massage therapy. *Int. J. Neurosci.* 115, 1397-1413. doi: 10.1080/00207450590956459
- Fleckenstein, J., Wilke, J., Vogt, L., and Banzer, W. (2017). Preventive and regenerative foam rolling are equally effective in reducing fatigue-related impairments of muscle function following exercise. *J. Sports Sci. Med.* 16, 474-479.
- García-Gutiérrez, M., Guillén-Rogel, P., Cochrane, D., and Marin, P. (2018). Cross transfer acute effects of foam rolling with vibration on ankle dorsiflexion range of motion. *J. Musculoskeletal Neuronal Interact.* 18, 262-267.
- Gaullier, J. (2015). *Effets du massage sportif sur la performance et la récupération entre croyances et preuves scientifiques*. Limoges: Institut Régional de Formation Sanitaire et Sociale du Limousin.
- Ginszt, M., Gawda, P., Smolka, J., Skublewska-Paszowska, M., Łukasiak, E., and Paeko, M. (2017). The immediate effect of self-myofascial release using a foam roller on electromyographic muscle activity. *Pol. J. Sports Med.* 33, 209-213.
- Golovin, V., Samorukov, A., Arkhipov, M., and Kocherevskaya, L. (2018). Robotic restorative massage to increase working capacity. *Altern. Integr. Med.* 7:2. doi: 10.4172/2327-5162.1000261
- Grabow, L., Young, J. D., Byrne, J. M., Granacher, U., and Behm, D. G. (2017). Unilateral rolling of the foot did not affect non-local range of motion or balance. *J. Sports Sci. Med.* 16, 209-218.
- Grieve, R., Barnett, S., Coghill, N., and Cramp, F. (2013). Myofascial trigger point therapy for triceps surae dysfunction: a case series. *Man. Ther.* 18, 519-525. doi: 10.1016/j.math.2013.04.004
- Grieve, R., Goodwin, F., Alfaki, M., Bourton, A.-J., Jeffries, C., and Scott, H. (2015). The immediate effect of bilateral self myofascial release on the plantar surface of the feet on hamstring and lumbar spine flexibility: a pilot randomised controlled trial. *J. Bodywork Mov. Ther.* 19, 544-552. doi: 10.1016/j.jbmt.2014.12.004
- Guillot, A., Kerautret, Y., Queyrel, F., Schobb, W., and Di Rienzo, F. (2019). Foam rolling and joint distraction with elastic band training performed for 5-7 weeks respectively improve lower limb flexibility. *J. Sports Sci. Med.* 18, 160-171.
- Guimberteau, J. C. (2004). *Promenades sous la peau*. Amsterdam: Elsevier Masson.
- Guimberteau, J. C., Findley, T. W., Kapandji, A. I., and Armstrong, C. (2016). *L'architecture du corps humain vivant: Le monde extracellulaire, les cellules et la fascia révélés par l'endoscopie intratissulaire*. Available online at: <https://books.google.fr/books?id=I9n4DAEACAAJ>
- Halperin, I., Aboodarda, S. J., Button, D. C., Andersen, L. L., and Behm, D. G. (2014). Roller massager improves range of motion of plantar flexor muscles without subsequent decreases in force parameters. *Int. J. Sports Phys. Ther.* 9, 92-102.
- Han, S., Lee, Y., and Lee, D. (2017). The influence of the vibration form roller exercise on the pains in the muscles around the hip joint and the joint performance. *J. Phys. Ther. Sci.* 29, 1844-1847. doi: 10.1589/jpts.29.1844
- Hasegawa, Y., Ootsuka, T., Fukuda, T., Arai, F., and Kawaguchi, M. (2001). "A relaxation system adapting to user's condition-identification of relationship between massage intensity and heart rate variability," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Brisbane, 3195-3200. doi: 10.1109/ROBOT.2001.933110
- Healey, K. C., Hatfield, D. L., Blanpied, P., Dorfman, L. R., and Riebe, D. (2014). The effects of myofascial release with foam rolling on performance. *J. Strength Condition. Res.* 28, 61-68. doi: 10.1519/jsc.0b013e3182956569
- Hemmings, B., Smith, M., Graydon, J., and Dyson, R. (2000). Effects of massage on physiological restoration, perceived recovery, and repeated sports performance. *Br. J. Sports Med.* 34:109. doi: 10.1136/bjbm.34.2.109
- Hendricks, S., Hill, H., Hollander, S. D., Lombard, W., and Parker, R. (2019). Effects of foam rolling on performance and recovery: a systematic review of the literature to guide practitioners on the use of foam rolling. *J. Bodywork Mov. Ther.* 24, 151-174. doi: 10.1016/j.jbmt.2019.10.019

- Hilbert, J. E., Sforzo, G. A., and Swensen, T. (2003). The effects of massage on delayed onset muscle soreness. *Br. J. Sports Med.* 37:72. doi: 10.1136/bjsm.37.1.72
- Hinds, T., McEwan, I., Perkes, J., Dawson, E., Ball, D., and George, K. (2004). Effects of massage on limb and skin blood flow after quadriceps exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* 36, 1308–1313. doi: 10.1249/01.mss.0000135789.47716.db
- Hiraiwa, Y., Arijji, Y., Kise, Y., Sakuma, S., Kurita, K., and Arijji, E. (2013). Efficacy of massage treatment technique in masseter muscle hardness: robotic experimental approach. *CRANIO®* 31, 291–299. doi: 10.1179/crn.2013.31.4.007
- Hodgson, D. D., Lima, C. D., Low, J. L., and Behm, D. G. (2018). Four weeks of roller massage training did not impact range of motion, pain pressure threshold, voluntary contractile properties or jump performance. *Int. J. Sports Phys. Ther.* 13, 835–845. doi: 10.26603/ijsp20180835
- Hodgson, D. D., Quigley, P. J., Whitten, J. H. D., Reid, J. C., and Behm, D. G. (2019). Impact of 10-minute interval roller massage on performance and active range of motion. *J. Strength Condition. Res.* 33, 1512–1523. doi: 10.1519/JSC.0000000000002271
- Hotfiel, T., Swoboda, B., Krinner, S., Grim, C., Engelhardt, M., Uder, M., et al. (2017). Acute effects of lateral thigh foam rolling on arterial tissue perfusion determined by spectral doppler and power doppler ultrasound. *J. Strength Cond. Res.* 31, 893–900. doi: 10.1519/jsc.0000000000001641
- Hu, L., Wang, Y., Zhang, J., Zhang, J., Cui, Y., Ma, L., et al. (2013). A massage robot based on chinese massage therapy. *Industr. Robot Int. J.* 40, 158–172. doi: 10.1108/01439911311297775
- Hughes, G. A., and Ramer, L. M. (2019). Duration of myofascial rolling for optimal recovery, range of motion, and performance: a systematic review of the literature. *Int. J. Sports Phys. Ther.* 14, 845–859. doi: 10.26603/ijsp20190845
- Ishii, H., Koga, H., Obokawa, Y., Solis, J., Takanishi, A., and Katsumata, A. (2009). Development and experimental evaluation of oral rehabilitation robot that provides maxillofacial massage to patients with oral disorders. *Int. J. Robot. Res.* 28, 1228–1239. doi: 10.1177/0278364909104295
- Iwamoto, K., Mizukami, M., Asakawa, Y., Yoshio, M., Ogaki, R., and Takemura, M. (2016). Effects of friction massage of the popliteal fossa on dynamic changes in muscle oxygenation and ankle flexibility. *J. Phys. Ther. Sci.* 28, 2713–2716. doi: 10.1589/jpts.28.2713
- Jafarnehadgero, A. A., Majlesi, M., Etemadi, H., and Robertson, D. G. E. (2018). Rehabilitation improves walking kinematics in children with a knee varus: randomized controlled trial. *Ann. Phys. Rehabil. Med.* 61, 125–134. doi: 10.1016/j.rehab.2018.01.007
- Jakeman, J. R., Byrne, C., and Eston, R. G. (2010). Efficacy of lower limb compression and combined treatment of manual massage and lower limb compression on symptoms of exercise-induced muscle damage in women. *J. Strength Condition. Res.* 24, 3157–3165. doi: 10.1519/jsc.0b013e3181e4f80c
- Jay, K., Sundstrup, E., Søndergaard, S. D., Behm, D., Brandt, M., Særvoll, C. A., et al. (2014). Specific and cross over effects of massage for muscle soreness: Randomized controlled trial. *Int. J. Sports Phys. Ther.* 9, 82–91.
- Jeong, Y., Park, J., Yu, J., Lee, S., Ha, J., Choo, Y., et al. (2019). Immediate effects of release ball massage and self-stretching exercise on hamstring's temperature, range of motion and strength in 20's women. *J. Int. Acad. Phys. Ther. Res.* 10, 1739–1745. doi: 10.20540/JIAPTR.2019.10.1.1739
- Jimenez, G. F. C. (2019). *Sistema robótico para tratamientos fisioterapéuticos, mediante robot manipulador colaborativo y aire comprimido*. U.S. Patent No ES1222864Y. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Joshi, D. G., Balthillaya, G., and Prabhu, A. (2018). Effect of remote myofascial release on hamstring flexibility in asymptomatic individuals – a randomized clinical trial. *J. Bodywork Mov. Ther.* 22, 832–837. doi: 10.1016/j.jbmt.2018.01.008
- Jourdain, C. (2015). “Étude des effets d'une séance de massage hebdomadaire sur la perception des douleurs musculaires et des perceptions de la récupération globale chez des jeunes athlètes de haut niveau,” in *Proceedings of the Direction Régionale de la Jeunesse, des Sports et de la Cohésion sociale*, Paris.
- Jung, J., Choi, W., Lee, Y., Kim, J., Kim, H., Lee, K., et al. (2017). Immediate effect of self-myofascial release on hamstring flexibility. *Phys. Ther. Rehabil. Sci.* 6, 45–51. doi: 10.14474/ptrs.2017.6.1.45
- Kaada, B., and Torstein, O. (1989). Increase of plasma  $\beta$ -endorphins in connective tissue massage. *Gen. Pharmacol. Vascu. Syst.* 20, 487–489. doi: 10.1016/0306-3623(89)90200-0
- Kalén, A., Pérez-Ferreiros, A., Barcala-Furelos, R., Fernández-Méndez, M., Padrón-Cabo, A., Prieto, J. A., et al. (2017). How can lifeguards recover better? A cross-over study comparing resting, running, and foam rolling. *Am. J. Emerg. Med.* 35:5. doi: 10.1016/j.ajem.2017.06.028
- Kalichman, L., and Ben David, C. (2017). Effect of self-myofascial release on myofascial pain, muscle flexibility, and strength: a narrative review. *J. Bodywork Mov. Ther.* 21, 446–451. doi: 10.1016/j.jbmt.2016.11.006
- Kargarfard, M., Lam, E. T. C., Shariat, A., Shaw, I., Shaw, B. S., and Tamrin, S. B. M. (2016). Efficacy of massage on muscle soreness, perceived recovery, physiological restoration and physical performance in male bodybuilders. *J. Sports Sci.* 34, 959–965. doi: 10.1080/02640414.2015.1081264
- Kelly, S., and Beardsley, C. (2016). Specific and cross-over effects of foam rolling on ankle dorsiflexion range of motion. *Int. J. Sports Phys. Ther.* 11, 544–551.
- Kett, A. R., and Sighting, F. (2020). Sedentary behaviour at work increases muscle stiffness of the back: why roller massage has potential as an active break intervention. *Appl. Ergon.* 82:102947. doi: 10.1016/j.apergo.2019.102947
- Killen, B. S., Zelizney, K. L., and Ye, X. (2018). Crossover effects of unilateral static stretching and foam rolling on contralateral hamstring flexibility and strength. *J. Sport Rehabil.* 28, 1–27. doi: 10.1123/jsr.2017-0356
- Kim, K., Park, S., Goo, B.-O., and Choi, S.-C. (2014). Effect of self-myofascial release on reduction of physical stress: a pilot study. *J. Phys. Ther. Sci.* 26, 1779–1781. doi: 10.1589/jpts.26.1779
- Kim, Y., Hong, Y., and Park, H.-S. (2019). A soft massage tool is advantageous for compressing deep soft tissue with low muscle tension: therapeutic evidence for self-myofascial release. *Complement. Ther. Med.* 43, 312–318. doi: 10.1016/j.ctim.2019.01.001
- Koga, H., Usuda, Y., Matsuno, M., Ogura, Y., Ishii, H., Solis, J., et al. (2008). “Development of the oral rehabilitation robot WAO-1,” in *Proceedings of the 2008 2nd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics*, Scottsdale, AZ, 556–561.
- Kong, P. W., Chua, Y. H., Kawabata, M., Burns, S. F., and Cai, C. (2018). Effect of post-exercise massage on passive muscle stiffness measured using myotonometry—A double-blind study. *J. Sports Sci. Med.* 17, 599–606.
- Kyranoudis, A., Arsenis, S., Ispyrilidis, I., Chatzinikolaou, A., Gourgoulis, V., Kyranoudis, E., et al. (2019). The acute effects of combined foam rolling and static stretching program on hip flexion and jumping ability in soccer players. *J. Phys. Educ. Sport* 19, 1164–1172. doi: 10.7752/jpes.2019.02169
- Lastova, K., Nordvall, M., Walters-Edwards, M., Allnutt, A., and Wong, A. (2018). Cardiac autonomic and blood pressure responses to an acute foam rolling session. *J. Strength Condition. Res.* 32, 2825–2830. doi: 10.1519/jsc.0000000000002562
- Lau, W. Y., and Nosaka, K. (2011). Effect of vibration treatment on symptoms associated with eccentric exercise-induced muscle damage. *Am. J. Phys. Med. Rehabil.* 90, 648–657. doi: 10.1097/phm.0b013e3182063ac8
- Le Gal, J., Begon, M., Gillet, B., and Rogowski, I. (2018). Effects of self-myofascial release on shoulder function and perception in adolescent tennis players. *J. Sport Rehabil.* 27, 1–6. doi: 10.1123/jsr.2016-0240
- Lee, C.-H., Lai, C.-L., Sung, Y.-H., Lai, M. Y., Lin, C.-Y., and Lin, L.-Y. (2017). Comparing effects between music intervention and aromatherapy on anxiety of patients undergoing mechanical ventilation in the intensive care unit: a randomized controlled trial. *Qual. Life Res.* 26, 1819–1829. doi: 10.1007/s1136-017-1525-5
- Lee, H.-I., and Lim, B.-O. (2018). Effects of self myofascial release, elastic band, and stretching exercises on lower extremity alignment and gait in female genu varum. *Korean J. Sport Biomech.* 28, 207–211. doi: 10.5103/KJSB.2018.28.4.207
- Lefranc, M., and Peltier, J. (2016). Evaluation of the ROSATM Spine robot for minimally invasive surgical procedures. *Exp. Rev. Med. Dev.* 13, 899–906. doi: 10.1080/17434440.2016.1236680
- Leivadi, S., Hernandez-Reif, M., Field, T., O'Rourke, M., D'Arienzo, S., Lewis, D., et al. (1999). Massage therapy and relaxation effects on university dance students. *J. Dance Med. Sci.* 3, 108–112.
- Lim, J.-H., and Park, C.-B. (2019). The immediate effects of foam roller with vibration on hamstring flexibility and jump performance in healthy adults. *J. Exerc. Rehabil.* 15, 50–54. doi: 10.12965/je.1836560.280
- Lima, C. R., Martins, D. F., and Reed, W. R. (2020). Physiological responses induced by manual therapy in animal models: a scoping review. *Front. Neurosci.* 14:430. doi: 10.3389/fnins.2020.00430

- Lopez, E., Kwok, K., Payne, C. J., Giataganas, P., and Yang, G. (2013). "Implicit Active Constraints for robot-assisted arthroscopy," in *Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Karlsruhe, 5390-5395. doi: 10.1109/ICRA.2013.6631350
- Luo, R. C., and Chang, C. C. (2011). "Electromyographic evaluation of therapeutic massage effect using multi-finger robot hand," in *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Shanghai, 2431-2436. doi: 10.1109/ICRA.2011.5980147
- Luo, R. C., Hsu, C.-W., and Chen, S.-Y. (2016). "Electroencephalogram signal analysis as basis for effective evaluation of robotic therapeutic massage," in *Proceedings of the 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Daejeon, 2940-2945. doi: 10.1109/IROS.2016.7759455
- MacDonald, G. Z., Button, D. C., Drinkwater, E. J., and Behm, D. G. (2014). Foam rolling as a recovery tool after an intense bout of physical activity. *Med. Sci. Sports Exerc.* 46, 131-142. doi: 10.1249/mss.0b013e3182a123db
- MacDonald, G. Z., Penney, M. D. H., Mullaley, M. E., Cuconato, A. L., Drake, C. D. J., Behm, D. G., et al. (2013). An acute bout of self-myofascial release increases range of motion without a subsequent decrease in muscle activation or force. *J. Strength Condition. Res.* 27, 812-821. doi: 10.1519/jsc.0b013e31825c2bc1
- Macgregor, L. J., Fairweather, M. M., Bennett, R. M., and Hunter, A. M. (2018). The effect of foam rolling for three consecutive days on muscular efficiency and range of motion. *Sports Med. Open* 4:26. doi: 10.1186/s40798-018-0141-4
- Mackin, C. (2017). *Robotic Massage Machine and Method of Use*. U.S. Patent No US2017266077. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Madoni, S. N., Costa, P. B., Coburn, J. W., and Galpin, A. J. (2018). Effects of foam rolling on range of motion, peak torque, muscle activation, and the hamstrings-to-quadriceps strength ratios. *J. Strength Condition. Res.* 32, 1821-1830. doi: 10.1519/jsc.0000000000002468
- Mancinelli, C. A., Davis, D. S., Aboulhosn, L., Brady, M., Eisenhofer, J., and Foutty, S. (2006). The effects of massage on delayed onset muscle soreness and physical performance in female collegiate athletes. *Phys. Ther. Sport* 7, 5-13. doi: 10.1016/j.ptsp.2005.10.004
- Martinez-Cabrera, F. I., and Núñez-Sánchez, F. J. (2016). Acute effect of a foam roller on the mechanical properties of the rectus femoris based on tensiomyography in soccer players. *Int. J. Hum. Mov. Sports Sci.* 4, 26-32. doi: 10.13189/saj.2016.040203
- Mazzei, B. G. (2019). *Different effects of static and vibrating foam rollers on ankle plantar flexion flexibility and neuromuscular activation*. Thesis in Exercise Science. Statesboro: Georgia Southern University.
- McKechnie, G. J., Young, W. B., and Behm, D. G. (2007). Acute effects of two massage techniques on ankle joint flexibility and power of the plantar flexors. *J. Sports Sci. Med.* 6, 498-504.
- Mezencevová, V., Torok, J., Czánová, T., and Zajac, J. (2017). Endermologie new approach in the medicine treatment. *Technol. Eng.* 14, doi: 10.1515/teen-2017-0008
- Mikesky, A. E., Bahamonde, R. E., Stanton, K., Alvey, T., and Fitton, T. (2002). Acute effects of the stick on strength, power, and flexibility. *J. Strength Condition. Res.* 16, 446-450. doi: 10.1519/00124278-200208000-00017
- Miller, J. K., and Rockey, A. M. (2006). Foam rollers show no increase in the flexibility of the hamstring muscle group. *J. Undergraduate Res.* 9, 9-14.
- Mohr, A. R., Long, B. C., and Goad, C. L. (2014). Effect of foam rolling and static stretching on passive hip-flexion range of motion. *J. Sport Rehabil.* 23, 296-299. doi: 10.1123/JSR.2013-0025
- Monteiro, E. R., Cavanaugh, M. T., Frost, D. M., and Novaes, J. D. S. (2017). Is self-massage an effective joint range-of-motion strategy? A pilot study. *J. Bodywork Mov. Ther.* 21, 223-226. doi: 10.1016/j.jbmt.2016.10.003
- Monteiro, E. R., da Silva Novaes, J., Cavanaugh, M. T., Hoogenboom, B. J., Steele, J., Vingren, J. L., et al. (2019). Quadriceps foam rolling and rolling massage increases hip flexion and extension passive range-of-motion. *J. Bodywork Mov. Ther.* 23, 575-580. doi: 10.1016/j.jbmt.2019.01.008
- Monteiro, E. R., Škarabot, J., Vigotsky, A. D., Brown, A. F., Gomes, T. M., and Novaes, J. D. S. (2017a). Acute effect of different self-massage volumes on the FMSTM overhead deep squat performance. *Int. J. Sports Phys. Ther.* 12, 94-104.
- Monteiro, E. R., Škarabot, J., Vigotsky, A. D., Brown, A. F., Gomes, T. M., and Novaes, J. D. S. (2017b). Maximum repetition performance after different antagonist foam rolling volumes in the inter-set rest period. *Int. J. Sports Phys. Ther.* 12, 76-84.
- Moraska, A. (2007). Therapist education impacts the massage effect on posttrace muscle recovery. *Med. Sci. Sports Exerc.* 39, 34-37. doi: 10.1249/01.mss.0000240320.16029.d2
- Mori, H., Ohsawa, H., Tanaka, T. H., Taniwaki, E., Leisman, G., and Nishijo, K. (2004). Effect of massage on blood flow and muscle fatigue following isometric lumbar exercise. *Med. Sci. Monit.* 10, 173-178.
- Murali, S., Shanmugam, S. V., Prasaad, G. A., Kumar, M. S., Manoharan, C., Devadasan, S. R., et al. (2014). Fatigue mitigation through the optimization of ergonomic positional parameters in massage therapy using virtual instrumentation. *Int. J. Adv. Manufact. Technol.* 70, 173-184. doi: 10.1007/s00170-013-5259-4
- Murray, A. M., Jones, T. W., Horobeanu, C., Turner, A. P., and Sproule, J. (2016). Sixty seconds of foam rolling does not affect functional flexibility or change muscle temperature in adolescent athletes. *Int. J. Sports Phys. Ther.* 11, 765-776.
- Myers, T. W. (2013). *Anatomy Trains E-Book: Myofascial Meridians for Manual and Movement Therapists*. Amsterdam: Elsevier Health Sciences.
- Naderi, A., Rezvani, M. H., and Degens, H. (2019). Foam rolling and muscle and joint proprioception after exercise-induced muscle damage. *J. Athletic Train.* 55, 58-64. doi: 10.4085/1062-6050-459-18
- Nakano, H., Kodama, T., Ueda, T., Mori, I., Tani, T., and Murata, S. (2019). Effect of hand and foot massage therapy on psychological factors and EEG activity in elderly people requiring long-term care: a randomized cross-over study. *Brain Sci.* 9:54. doi: 10.3390/brainsci9030054
- Nissim, E. (2001). *Human Touch Massager*. U.S. Patent No US2001014781. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Obokawa, Y., Solis, J., Ishii, H., Koga, H., Takanishi, A., and Katsumata, A. (2009). "Clinical massage therapy with the oral-rehabilitation robot in patients with temporomandibular joint disorders," in *Proceedings of the 2009 9th International Conference on Information Technology and Applications in Biomedicine*, Larcana, 1-4.
- Ogai, R., Yamane, M., Matsumoto, T., and Kosaka, M. (2008). Effects of petrissage massage on fatigue and exercise performance following intensive cycle pedaling. *Br. J. Sports Med.* 42, 834-838. doi: 10.1136/bjism.2007.044396
- Okamoto, T., Masuhara, M., and Ikuta, K. (2014). Acute effects of self-myofascial release using a foam roller on arterial function. *J. Strength Condition. Res.* 28, 69-73. doi: 10.1519/jsc.0b013e31829480f5
- Oranchuk, D. J., Flattery, M. R., and Robinson, T. L. (2019). Superficial heat administration and foam rolling increase hamstring flexibility acutely; with amplifying effects. *Phys. Ther. Sport* 40, 213-217. doi: 10.1016/j.ptsp.2019.10.004
- Patel, D. G., Vyas, N. J., and Sheth, M. S. (2016). Immediate effect of application of bilateral self myo-fascial release on the plantar surface of the foot on hamstring and lumbar spine flexibility: a quasi experimental study. *Int. J. Ther. Appl.* 32, 94-99. doi: 10.20530/IJTA\_32\_94\_99
- Pathania, T., and Muragod, A. R. (2019). Comparative effect of foam roller and M2T blade on hamstring flexibility in elderly population: a randomized control trial. *Indian J. Health Sci. Biomed. Res.* 12:160. doi: 10.4103/kleuhj.kleuhj\_118\_18
- Patole, S., Sayyad, S., and Palekar, T. J. (2019). To compare the effect of myofascial release technique versus foam rolling on hamstring spasticity in spastic Diplegia: pilot study. *Int. J. Yoga Physiother. Phys. Educ.* 4, 65-70.
- Paz, G., Maia, M., Santana, H., Silva, J., and Lima, V. (2017). Electromyographic analysis of muscles activation during sit-and-reach test adopting self-myofascial release with foam rolling versus traditional warm. *J. Athlet. Enhance.* 4, 26-28. doi: 10.4172/2324-9080.1000248
- Peacock, C. A., Krein, D. D., Antonio, J., Sanders, G. J., Silver, T. A., and Colas, M. (2015). Comparing acute bouts of sagittal plane progression foam rolling vs. Frontal plane progression foam rolling. *J. Strength Condition. Res.* 29:2310-2315. doi: 10.1519/jsc.0000000000000867
- Peacock, C. A., Krein, D. D., Silver, T. A., Sanders, G. J., and Von Carlowitz, K.-P. A. (2014). An acute bout of self-myofascial release in the form of foam rolling improves performance testing. *Int. J. Exerc. Sci.* 7:202.
- Pearcey, G. E. P., Bradbury-Squires, D. J., Kawamoto, J.-E., Drinkwater, E. J., Behm, D. G., and Button, D. C. (2015). Foam rolling for delayed-onset muscle soreness and recovery of dynamic performance measures. *J. Athletic Train.* 50, 5-13. doi: 10.4085/1062-6050-50.1.01
- Peng, C.-C., Hwang, T.-S., Lin, C.-J., Wu, Y.-T., Chang, C.-Y., and Huang, J.-B. (2010). "Development of intelligent massage manipulator and reconstruction of



- massage process path using image processing technique,” in *Proceedings of the 2010 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, Singapore, 551–556. doi: 10.1109/RAMECH.2010.5513135
- Petrescu, R. V., Aversa, R., Apicella, A., and Petrescu, F. I. (2016). Future medicine services robotics. *Am. J. Eng. Appl. Sci.* 9, 1062–1087. doi: 10.3844/ajeassp.2016.1062.1087
- Phillips, J., Diggin, D., King, D. L., and Sforzo, G. A. (2018). Effect of varying self-myofascial release duration on subsequent athletic performance. *J. Strength Condition. Res.* [Epub ahead of Print],
- Pinar, S., Kaya, F., Bicer, B., Erzeybek, M., and Cotuk, H. (2012). Different recovery methods and muscle performance after exhausting exercise: comparison of the effects of electrical muscle stimulation and massage. *Biol. Sport* 29, 269–275. doi: 10.5604/20831862.1019664
- Poppendieck, W., Wegmann, M., Ferrauti, A., Kellmann, M., Pfeiffer, M., and Meyer, T. (2016). Massage and performance recovery: a meta-analytical review. *Sports Med.* 46, 183–204. doi: 10.1007/s40279-015-0420-x
- Qiu, C., Zhang, Y., and Kai, L. (2019). *Massage apparatus*. [https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?FT=D&date=20190411andDB=andocale=fr\\_EPandCC=WOandNR=2019070198A1andKC=A1andND=1](https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?FT=D&date=20190411andDB=andocale=fr_EPandCC=WOandNR=2019070198A1andKC=A1andND=1).
- Rapaport, M. H., Schettler, P., and Bresee, C. (2010). A preliminary study of the effects of a single session of swedish massage on hypothalamic–pituitary–adrenal and immune function in normal individuals. *J. Alternat. Compl. Med.* 16, 1079–1088. doi: 10.1089/acm.2009.0634
- Rey, E., Padrón-Cabo, A., Costa, P. B., and Barcala-Furelos, R. (2017). The effects of foam rolling as a recovery tool in professional soccer players. *J. Strength Condition. Res.* 33, 2194–2201.
- Richards, K. (1998). Effect of a back massage and relaxation intervention on sleep in critically ill patients. *Am. J. Crit. Care* 7, 288. doi: 10.4037/ajcc1998.7.4.288
- Rinder, A. N., and Sutherland, C. J. (1995). An investigation of the effects of massage on quadriceps performance after exercise fatigue. *Compl. Ther. Nurs. Midwif.* 1, 99–102. doi: 10.1016/S1353-6117(05)80048-4
- Rivera, M., Eberman, L., Games, K., and Powden, C. J. (2019). Comparison of myofascial release techniques on pectoralis minor length, glenohumeral total arc of motion, and skin temperature: a pilot study. *J. Sport Rehabil.* 24, 1–5. doi: 10.1123/jsr.2018-0130
- Robertson, A., Watt, J. M., and Galloway, S. D. R. (2004). Effects of leg massage on recovery from high intensity cycling exercise. *Br. J. Sports Med.* 38:173. doi: 10.1136/bjism.2002.003186
- Romero-Moraleda, B., González-García, J., Cuéllar-Rayó, Á., Balsalobre-Fernández, C., Muñoz-García, D., and Morencos, E. (2019). Effects of vibration and non-vibration foam rolling on recovery after exercise with induced muscle damage. *J. Sports Sci. Med.* 18, 172–180.
- Romero-Moraleda, B., La Touche, R., Lerma-Lara, S., Ferrer-Peña, R., Paredes, V., Peinado, A. B., et al. (2017). Neurodynamic mobilization and foam rolling improved delayed-onset muscle soreness in a healthy adult population: a randomized controlled clinical trial. *PeerJ* 5:18. doi: 10.7717/peerj.3908
- Rossetini, G., Rondoni, A., Schiavetti, I., Tezza, S., and Testa, M. (2016). Prevalence and risk factors of thumb pain in Italian manual therapists: an observational cross-sectional study. *Work* 54, 159–169.
- Sağiroğlu, Y. (2017). Acute effect of applied local vibration during foam roller exercises on lower extremity explosive strength and flexibility performance. *Eur. J. Phys. Educ. Sport Sci.* 3, 20–30. doi: 10.5281/zenodo.89696
- Saitou, K., Tokunaga, M., Yoshino, D., Sakitani, N., Maekawa, T., Ryu, Y., et al. (2018). Local cyclical compression modulates macrophage function in situ and alleviates immobilization-induced muscle atrophy. *Clin. Sci.* 132, 2147–2161. doi: 10.1042/CS20180432
- Sakitani, N., Maekawa, T., Saitou, K., Suzuki, K., Murase, S., Tokunaga, M., et al. (2019). Application of consistent massage-like perturbations on mouse calves and monitoring the resulting intramuscular pressure changes. *JoVE* 151:e59475. doi: 10.3791/59475
- Schleip, R. (2003b). Fascial plasticity – a new neurobiological explanation Part 2. *J. Bodywork Mov. Ther.* 7, 104–116. doi: 10.1016/S1360-8592(02)00076-1
- Schleip, R. (2003a). Fascial plasticity – a new neurobiological explanation: Part 1. *J. Bodywork Mov. Ther.* 7, 11–19. doi: 10.1016/S1360-8592(02)00067-0
- Schroeder, A. N., and Best, T. M. (2015). Is self myofascial release an effective preexercise and recovery strategy? A literature review. *Curr. Sports Med. Rep.* 14, 200–208. doi: 10.1249/jsr.0000000000000148
- Schroeder, J., Renk, V., Braumann, K.-M., and Hollander, K. (2017). Acute foam rolling effects on contractile properties of the m. Biceps femoris. *German J. Exerc. Sport Res.* 47, 294–300. doi: 10.1007/s12662-017-0467-y
- Sharp, V. (2012). *A Comparative Study Between Self Myofascial Release and Emmett Technique Effectiveness in the Management of fascial (Iliotibial band) Tightness*. Queen University Dissertation. Belfast: Stranmillis University College.
- Sharpe, P. A., Williams, H. G., Granner, M. L., and Hussey, J. R. (2007). A randomised study of the effects of massage therapy compared to guided relaxation on well-being and stress perception among older adults. *Compl. Ther. Med.* 15, 157–163. doi: 10.1016/j.ctim.2007.01.004
- Škarabot, J., Beardsley, C., and Štirn, I. (2015). Comparing the effect of self-myofascial release with static stretching on ankle range-of-motion in adolescent athletes. *Int. J. Sports Phys. Ther.* 10, 203–212.
- Skinner, B., Moss, R., and Hammond, L. (2020). A systematic review and meta-analysis of the effects of foam rolling on range of motion, recovery and markers of athletic performance. *J. Bodywork Mov. Ther.* 24, 105–122. doi: 10.1016/j.jbmt.2020.01.007
- Smith, J. C., Washell, B. R., Aini, M. F., Brown, S., and Hall, M. C. (2019). Effects of static stretching and foam rolling on ankle dorsiflexion range of motion. *Med. Sci. Sports Exerc.* 51, 1752–1758. doi: 10.1249/mss.0000000000001964
- Smith, L., Keating, M. N., Holbert, D., Spratt, D. J., McCammon, M. R., Smith, S. S., et al. (1994). The effects of athletic massage on delayed onset muscle soreness, creatine kinase, and neutrophil count: a preliminary report. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.* 19, 93–99. doi: 10.2519/jospt.1994.19.2.93
- Solis, J., Obokawa, Y., Ishii, H., Koga, H., Takamishi, A., and Katsumata, A. (2009). “Development of oral rehabilitation robot WAO-1R designed to provide various massage techniques,” in *Proceedings of the IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, (Kyoto: IEEE), 457–462.
- Somers, K., Aune, D., Horten, A., Kim, J., and Rogers, J. (2019). Acute effects of gastrocnemius/soleus self-myofascial release versus dynamic stretching on closed-chain dorsiflexion. *J. Sport Rehabil.* 29, 1–28. doi: 10.1123/jsr.2018-0199
- Standley, R. A., Miller, M. G., and Binkley, H. (2010). Massage’s effect on injury, recovery, and performance: a review of techniques and treatment parameters. *StrengthCondition. J.* 32, 64–67. doi: 10.1519/ssc.0b013e3181c33918
- Stroiney, D. A., Mokris, R. L., Hanna, G. R., and Ranney, J. D. (2020). Examination of self-myofascial release vs. Instrument-assisted soft-Tissue mobilization techniques on vertical and horizontal power in recreational athletes. *J. Strength Condition. Res.* 34, 79–88. doi: 10.1519/JSC.0000000000002628
- Su, H., Chang, N.-J., Wu, W.-L., Guo, L.-Y., and Chu, I.-H. (2017). Acute effects of foam rolling, static stretching, and dynamic stretching during warm-ups on muscular flexibility and strength in young adults. *J. Sport Rehabil.* 26, 469–477.
- Sullivan, K. M., Silvey, D. B., Button, D. C., and Behm, D. G. (2013). Roller-massager application to the hamstrings increases sit-and-reach range of motion within five to ten seconds without performance impairment. *Int. J. Sports Phys. Ther.* 8, 228–236.
- Suzuki, M., Tatsumi, A., Otsuka, T., Kikuchi, K., Mizuta, A., Makino, K., et al. (2010). Physical and psychological effects of 6-week tactile massage on elderly patients with severe dementia. *Am. J. Alzheimers Dis. Other Dement.* 25, 680–686. doi: 10.1177/1533317510386215
- Takanishi, A., Katsumata, A., Koga, H., Ishii, H., Solis, J., and Obokawa, Y. (2009). *Massage Robot and Control Program Thereof*. U.S. Patent No WO2009118933. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Takanishi, A., Katsumata, A., Usuda, Y., Koga, H., Matsuno, M., Ogura, Y., et al. (2008). *Massage Robot, Control Program Therefor, and Robot for Specifying Portion of Human Body*. U.S. Patent No WO2008041457. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Thistlethwaite, J., Vonderhaar, R., Hockenberry, K., Rindler, L., Cayot, T., and Nelson, B. (2016). The effects of foam-rolling on femoral endothelial function. *Med. Sci. Sports Exerc.* 48:1070. doi: 10.1249/01.mss.0000488219.26597.5b
- Thomson, D., Gupta, A., Arundell, J., and Crossbie, J. (2015). Deep soft-tissue massage applied to healthy calf muscle has no effect on passive mechanical properties: A randomized, single-blind, cross-over study. *BMC Sports Sci. Med. Rehabil.* 7:21. doi: 10.1186/s13102-015-0015-8
- Tiidus, P., and Shoemaker, J. (1995). Effleurage massage, muscle blood flow and long-term post-exercise strength recovery. *Int. J. Sports Med.* 16, 478–483. doi: 10.1055/s-2007-973041

- Vigotsky, A. D., and Bruhns, R. P. (2015). The role of descending modulation in manual therapy and its analgesic implications: a narrative review. *Pain Res. Treat.* 2015, 1-11. doi: 10.1155/2015/292805
- Vigotsky, A. D., Lehman, G. J., Contreras, B., Beardsley, C., Chung, B., and Feser, E. H. (2015). Acute effects of anterior thigh foam rolling on hip angle, knee angle, and rectus femoris length in the modified Thomas test. *PeerJ* 3:e1281. doi: 10.7717/peerj.1281
- Viitasalo, J. T., Niemelä, K., Kaappola, R., Korjus, T., Levola, M., Mononen, H. V., et al. (1995). Warm underwater water-jet massage improves recovery from intense physical exercise. *Eur. J. Appl. Physiol. Occupat. Physiol.* 71, 431-438. doi: 10.1007/BF00635877
- Visconti, L., Capra, G., Carta, G., Forni, C., and Janin, D. (2015). Effect of massage on DOMS in ultramarathon runners: a pilot study. *J. Bodywork Mov. Ther.* 19, 458-463. doi: 10.1016/j.jbmt.2014.11.008
- Weerapong, P., Hume, P. A., and Kolt, G. S. (2005). The mechanisms of massage and effects on performance, muscle recovery and injury prevention. *Sports Med.* 35, 235-256. doi: 10.2165/00007256-200535030-00004
- White, G. E., West, S. L., Caterini, J. E., Battista, A. P. D., Rhind, S. G., and Wells, G. D. (2020). Massage therapy modulates inflammatory mediators following sprint exercise in healthy male athletes. *J. Funct. Morphol. Kinesiol.* 5:9. doi: 10.3390/jfmk5010009
- Wiewelhove, T., Döweling, A., Schneider, C., Hottenrott, L., Meyer, T., Kellmann, M., et al. (2019). A meta-analysis of the effects of foam rolling on performance and recovery. *Front. Physiol.* 10:376. doi: 10.3389/fphys.2019.00376
- Willems, M. E., Hale, T., and Wilkinson, C. S. (2009). Effect of manual massage on muscle-specific soreness and single leg jump performance after downhill treadmill walking. *Med. Sport.* 13, 61-66. doi: 10.2478/v10036-009-0011-8
- Williams, W., and Selkow, N. M. (2019). Self-myofascial release of the superficial back line improves sit-and-reach distance. *J. Sport Rehabil.* 1, 1-5.
- Wiltshire, E. V., Poitras, V., Pak, M., Hong, T., Rayner, J., and Tschakovsky, M. E. (2010). Massage impairs postexercise muscle blood flow and lactic acid removal. *Med. Sci. Sports Exerc.* 42, 1062-1071.
- Xiaoqin, Y., and Yonggen, X. (2010). "Design and simulation of Chinese massage robot based on parallel mechanism," in *Proceedings of the 2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering*, 2512-2515. doi: 10.1109/MACE.2010.5535326
- Yang, J., Chen, S., Hsieh, C.-L., and Lin, J. (2012). Effects and predictors of shoulder muscle massage for patients with posterior shoulder tightness. *BMC Musculoskelet. Disord.* 13:46. doi: 10.1186/1471-2474-13-46
- Ye, X., Killen, B. S., Zelizney, K. L., Miller, W. M., and Jeon, S. (2019). Unilateral hamstring foam rolling does not impair strength but the rate of force development of the contralateral muscle. *PeerJ* 7:e7028. doi: 10.7717/peerj.7028
- Zainuddin, Z., Newton, M., Sacco, P., and Nosaka, K. (2005). Effects of massage on delayed-onset muscle soreness, swelling, and recovery of muscle function. *J. Athlet. Train.* 40, 174-180.
- Zelikovski, A., Kaye, C. L., Fink, G., Spitzer, S. A., and Shapiro, Y. (1993). The effects of the modified intermittent sequential pneumatic device (MISPD) on exercise performance following an exhaustive exercise bout. *Br. J. Sports Med.* 27:255. doi: 10.1136/bjism.27.4.255 doi: 10.1136/bjism.27.4.255

**Conflict of Interest:** CE was employed by the company Capsix Robotics.

The remaining authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Copyright © 2020 Kerautret, Di Rienzo, Eyssautier and Guillot. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC BY). The use, distribution or reproduction in other forums is permitted, provided the original author(s) and the copyright owner(s) are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms.

## **CHAPITRE 2 : CADRE MÉTHODOLOGIQUE**

Ce chapitre a pour objectif de décrire le cadre méthodologique qui entoure ce projet de thèse. Pour ce faire, nous allons présenter les variables dépendantes et les outils d'évaluations qui nous ont servi au cours de nos expérimentations. Dans un premier temps, nous aborderons les variables dépendantes neurophysiologiques avant de décrire les variables comportementales et psychométriques. Pour finir, ce chapitre sera l'occasion de décrire le système de massage robotisé, autonome et interactif que nous avons testé.

## A. LES VARIABLES DÉPENDANTES

Comme nous l'avons présenté dans la revue de littérature, il existe de nombreuses méthodes exploratoires permettant d'évaluer objectivement et subjectivement les effets du massage. Il nous est donc possible d'étayer notre approche conceptuelle innovante du contrôle moteur par des données objectives. Les indicateurs sélectionnés présentent le double intérêt d'être indolores et non-invasifs. De plus, bien que certains instruments demeurent onéreux, la majorité reste simple d'utilisation et peu coûteuse.

### 1. Les variables neurophysiologiques

Les outils d'explorations neurophysiologiques ont pour objet l'étude des fonctions du système nerveux, depuis le niveau moléculaire jusqu'aux réseaux neuronaux. Ces méthodes d'évaluation enregistrent les activités bioélectriques du cerveau, de la moelle épinière, des nerfs périphériques ou encore des muscles, que ce soit de manière spontanée ou consécutivement à des stimulations. Une nouvelle fois, nous précisons que dans le cadre de ces travaux de recherche les méthodes exploratoires utilisées sont indolores et non-invasives. Au cours des

diverses expériences, nous avons recueilli l'électroencéphalographie, l'activité électrodermale et la variabilité de la fréquence cardiaque.

### **a) L'électroencéphalographie de surface**

#### *Mesures et méthodes*

L'électroencéphalographie (EEG) est une méthode médicale non-invasive d'enregistrement de l'activité électrique oscillatoire du cerveau. Son enregistrement s'effectue à la surface du cuir chevelu au moyen d'électrodes et d'un milieu conducteur (pâte conductrice, gel conducteur) (Abhang et al., 2016). Elle représente une mesure directe de l'activité électrique produite par les cellules nerveuses, notamment i) des potentiels évoqués par une stimulation externe et ii) des mesures d'activités oscillatoires induites par la quantification, par exemple, de la puissance des différents rythmes cérébraux. Afin de mesurer les potentiels évoqués, une stimulation externe est nécessaire. On distingue les potentiels évoqués visuels, auditifs, sensitifs, cognitifs et moteurs, selon la nature de la stimulation. La caractérisation des potentiels évoqués est fonction de leur polarité, du délai d'apparition en millisecondes, de la localisation au niveau du scalp (Abhang et al., 2016). En l'absence de stimulation, les rythmes cérébraux sont dits spontanés et permettent d'identifier des patrons d'activité neuronale caractéristiques d'états de conscience. Les ondes cérébrales sont des tensions électriques dans le cerveau. Elles ne mesurent que quelques millionimes de volt et présentent la particularité d'être oscillantes (Abhang et al., 2016). Cinq ondes cérébrales de base sont reconnues avec des fréquences bien définies chez l'homme (Figure 12). Chaque individu étant différent, il est important de retenir qu'il existe autant de modèles d'ondes cérébrales que d'individu et sont fonction du type

d'activité effectuée par une personne. En effet, chez un même individu le rythme cérébral diffère si l'on compare la lecture à un moment de détente. Le rythme cérébral représente une information utile pour connaître le niveau de santé et l'état d'esprit d'un individu (Abhang et al., 2016). Comme il est possible de le constater, les ondes delta sont les plus lentes chez l'être humain et sont évocatrices des plus profonds niveaux de relaxation et de sommeil. Tout comme chez les nourrissons et les jeunes enfants, la production de cette onde est fondamentale pour l'adulte pour aider l'organisme à récupérer. Elles sont régulièrement assimilées à un état de méditation (Wallace, 1970; Abhang et al., 2016). Les ondes theta, également lentes, sont particulièrement impliquées dans les rêves et le sommeil. Lorsque la production est optimale, les ondes theta suscitent la créativité et la relaxation. Comme les ondes alpha, les ondes theta sont synonymes de sommeil réparateur. En revanche, une insuffisance peut conduire à du stress et de l'anxiété (Schacter, 1977; Awang et al., 2011; Abhang et al., 2016, voir Figure 12). Proches des ondes theta, les ondes alpha favorisent elles aussi les sensations de relaxation profonde. Son défaut conduit le plus souvent à un sentiment d'anxiété, de stress et peut être à l'origine d'insomnie (Abhang et al., 2016; Schwabedal et al., 2016, voir Figure 12). Enfin, les ondes beta et gamma reflètent respectivement un état d'éveil et d'hyper vigilance. Ce sont des ondes cérébrales dites de « hautes fréquences ». Les ondes beta, notamment sur la plage de fréquences basses (12-15Hz), sont particulièrement impliquées dans la pensée logique et consciente. Les fréquences moyennes (15-20Hz) ont un effet stimulant sur le cerveau et favorisent la concentration et la mémorisation. En revanche, la plage de fréquences hautes (18-40Hz) induit des effets indésirables comme l'incapacité à se détendre, allant jusqu'à de l'anxiété (Abhang et al., 2016; Hsu et al., 2017; Ribas et al., 2018, voir Figure 12). Les dernières ondes référencées sont les ondes gamma, ce sont les ondes les plus rapides. Les ondes gamma stimulent les fonctions cognitives comme la mémorisation, l'apprentissage et le traitement de

l'information. Un déséquilibre de ces ondes peut induire de l'anxiété, du stress lorsqu'elles sont trop importantes. Dans le cas contraire, un niveau trop faible conduit à des déficits de l'attention (Oathes et al., 2008; Abhang et al., 2016, voir Figure 12)

Rythme cérébral (bande de fréquence)	Delta ( $\delta$ ) (0,5 - 4 Hz)	Theta ( $\theta$ ) (4 à 8 Hz)	Alpha ( $\alpha$ ) (8 à 12 Hz)	Beta ( $\beta$ ) (12 à 35 Hz)	Gamma ( $\gamma$ ) (> 35 Hz)
Influence sur le corps	Sommeil	Profondément détendu	Très détendu	Anxiété, actif, attention externe	Concentration

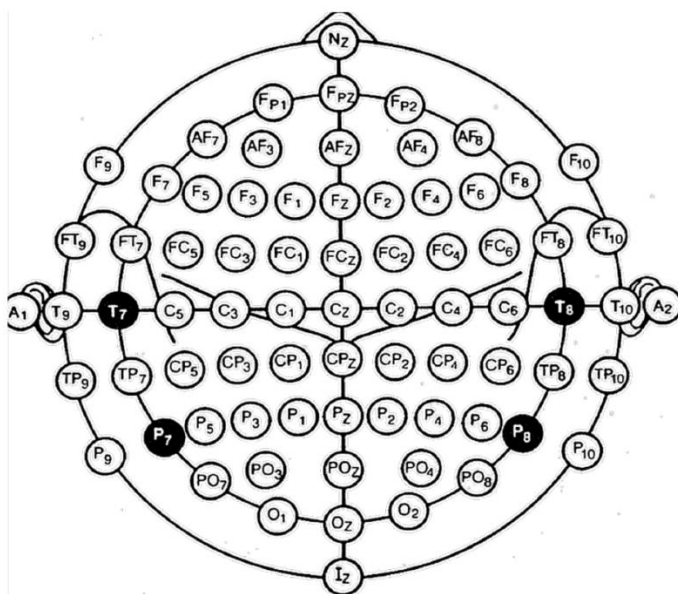
**Figure 12.** Caractéristiques des cinq ondes cérébrales de base et de leur influence

issue des livres de Abhang et al. (2016).

### *Matériels et protocole*

Le recueil de l'activité EEG se réalise au moyen d'un casque en lycra placé sur le cuir chevelu et muni d'électrodes en chlorure d'argent (AgCl). Selon le matériel utilisé et l'objet de l'étude, il est possible de réaliser un montage allant de 16 à 256 canaux placés selon le système international 10/20 (Homan et al., 1987, voir Figure 13). Ce montage peut être effectué de manière monopolaire ou bipolaire. Le montage monopolaire, aussi appelé montage référentiel, est constitué d'une série de dérivations monopolaires comprenant une électrode dite « nulle » (référentiel) et d'une seconde électrode dite « explorative » (active). Le potentiel électrique mesuré par ces deux électrodes est ensuite comparé deux à deux pour obtenir un tracé appelé dérivation. Dans le cadre d'un montage bipolaire le principe reste le même, i.e., de mesurer la différence de potentiel entre deux électrodes. Cependant, chaque série de dérivation bipolaire se compose deux électrodes actives : le montage en ligne longitudinale aussi appelé antéro-postérieur et le montage transversal (Collura, 1993; Acharya et al., 2016). Pour chaque électrode, il convient d'utiliser une pâte conductrice ou d'un gel électro-conducteur pour assurer

la transmission du signal électrique entre la peau et les électrodes (Chabance et al., 2016). Ce type de solution saline permet de diminuer la résistance au passage d'un courant électrique. Pour ces raisons, nous avons choisi d'utiliser pour ce volet expérimental un gel électroconducteur (MLAE11, ADInstrument, Dunedin, New Zealand) qui présente l'avantage d'être hypoallergénique et non-irritant. Autre avantage, ce gel est hydrosoluble, ce qui permet de nettoyer rapidement les électrodes avec de l'eau après chaque utilisation (Chabance et al., 2016).



**Figure 13.** Illustrations du positionnement des électrodes dans le système international 10/20.

Les signaux EEG sont de faible amplitude, i.e., de 0.5 à 100 microvolts, ce qui nécessite l'utilisation d'un amplificateur. L'activité cérébrale n'est pas le seul signal enregistré par les électrodes qui peuvent compte tenu de leur haute sensibilité capter également le signal électrique musculaire, le clignement des yeux et le bruit électromagnétique. De ce fait, il est conseillé d'utiliser une cage de Faraday et de demander aux participants de limiter les clignements des paupières et tout mouvement parasitant le signal. Le bruit étant généralement



plus élevé, il est toutefois possible de filtrer le signal EEG de deux manières différentes : un filtre dit passe-haut pour atténuer les basses fréquences ou un filtre passe-bas permettant d'éliminer les variations rapides de hautes fréquences du signal analogique avant d'être converti en signal numérique. Pour des raisons matérielles et de mise en place, nous avons fait le choix d'utiliser un montage EEG bipolaire à seize canaux tout en respectant la norme internationale 10/20. Notre système d'acquisition se composait d'un Power Lab 16/35 (PL3516, Power Lab 16/35, ADInstrument, Dunedin, New Zealand) et de deux Octal Bio Amp (FE238, Octal Bio Amp, ADInstrument, Dunedin, New Zealand) (Figure 14).



**Figure 14.** Illustrations du matériel d'acquisition EEG.

**A.** Power Lab 16/35 (PL3516). **B.** Octal Bio Amp (FE238).

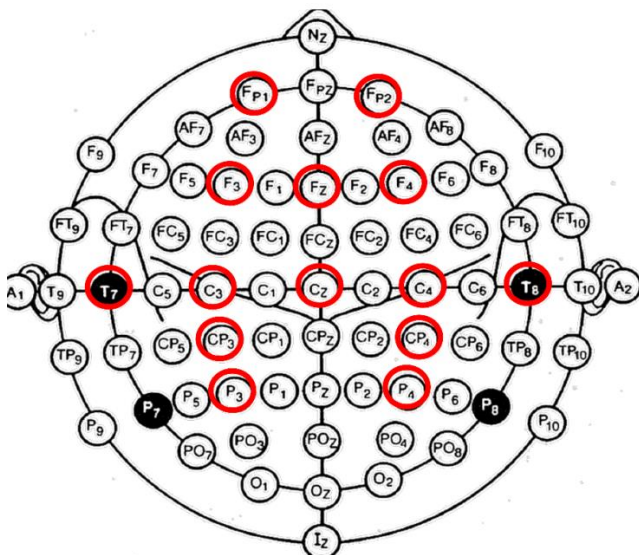
Comme les participants ne présentaient pas la même circonférence de tête, nous avons utilisé deux tailles différentes de casque, i.e., medium et large (MLAEC2 système électro-cap2, ADInstrument, Dunedin, New Zealand) (Figure 14).



**Figure 15.** Illustrations des consommables pour la méthode exploratoire EEG.

**A.** Electro-gel. **B.** Casque étirable en lycra (taille medium et large). **C.** Kit de seringues et aiguilles. **D.** Pack de 100 disques d'éponge jetables.

Nous avons équipé le casque de disques d'éponge autocollants jetables pour chaque participant (MLAE6, pack de 100 de disques d'éponge jetables, ADInstrument, Dunedin, New Zealand) (Figure 15). Ces disques d'éponge étaient positionnés sur les électrodes F3, F4, Fz, FP1, FP2, C3, Cz, C4, TP7, CP3, CP4, TP8, P3 et P4 (Figure 16).



**Figure 16.** Illustrations de notre montage bipolaire sur la base du système international 10/20.

Deux électrodes supplémentaires ont été placées comme points de référence pour faciliter l'identification des artefacts, sur le canthus interne droit et sur l'acromion droit. Une fois le casque et le harnais posés, nous avons administré l'électro-gel dans chaque électrode pour faciliter le contact avec le cuir chevelu au moyen d'une seringue munie de son aiguille (MLAE78b, kit seringue et aiguille, ADInstrument, Dunedin, New Zealand) (Figure 15). Chaque participant avait ensuite pour consigne de rester assis face au mur et de regarder une cible à hauteur des yeux. Les consignes étaient les mêmes pour tous les participants en pré-test et post-test, i.e., limiter les clignements des paupières et tout mouvement du corps ou oculaire. L'acquisition nécessitait le logiciel LabChart Pro (ADInstrument, Dunedin, New Zealand).

## **b) L'activité électrodermale**

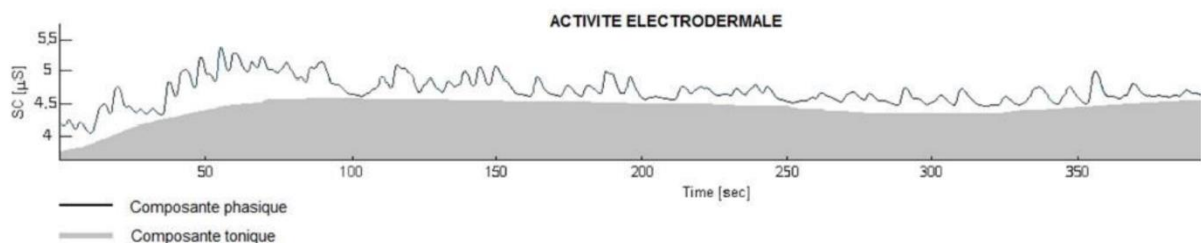
### *Mesures et méthodes*

L'activité électrodermale (AED) est une manifestation électrophysiologique reflétant la variation des propriétés électriques biologiques à la surface de la peau. L'AED est le reflet de l'activité des glandes sudorales eccrines responsables de la sudation froide. Pour enregistrer ces fluctuations, il est possible d'utiliser deux méthodes d'enregistrements. La première consiste à étudier le potentiel électrodermal ou cutané, au moyen d'un enregistrement endosomatique, i.e., sans application de courants extérieurs. Son principe réside sur la mesure de la différence de potentiel entre deux électrodes à partir d'une électrode active et d'une seconde électrode dite passive ou inactive. Un second type d'enregistrement implique de délivrer un courant électrique constant indolore d'environ 0.5 V. Il s'agit d'un enregistrement dit « exosomatique ». Il repose sur la mesure d'impédance entre deux électrodes et permet d'apprécier la résistance qu'offre la

peau au passage du courant (ou sa capacité à le conduire). On parle alors respectivement de résistance (en  $k\Omega$ ) et de conductance cutanée (en  $\mu S$ ).

### *Analyse*

L'analyse des variations de l'AED se fait à travers l'observation des modulations du niveau tonique et par l'examen des activités phasiques. L'activité phasique s'apprécie par les réponses observées consécutivement à une stimulation externe ou interne : le signal marque une rupture de pente puis se caractérise par des variations rapides de faible amplitude, avant de revenir à l'état initial. On parle alors de réponse électrodermale (RED). Visuellement, cette RED se manifeste donc par une inflexion brutale et de courte durée du signal, qui provient d'une libération de sueur dans le canal excrétoire des glandes sudorales. Les variations du niveau tonique renvoient pour leur part aux variations lentes du signal, dites spontanées, en l'absence de toute stimulation (Collet et al., 2011, Figure 17).



**Figure 17.** Composantes tonique et phasique exprimées en conductance de l'activité électrodermale avec l'accord de Droulers et al. (2013).

## *Matériels et protocole*

Dans le cadre notre volet expérimental, nous avons fait le choix d'utiliser un dispositif compatible avec le matériel EEG. Nous avons donc branché en série à notre Power Lab 16/35 un amplificateur GSR (FE116, Amplificateur GSR, ADInstrument, Dunedin, New Zealand) (Figure 18). Les participants ont été équipés d'électrodes GSR au niveau des phalanges médianes de l'index et du majeur droit en prenant soin d'appliquer du gel électrolytique (MLT116F, Electrodes GSR Ag/AgCl, ADInstrument, Dunedin, New Zealand) (Figure 18). L'adjonction de ce gel avait pour but de faciliter la continuité électrique entre la peau et l'électrode. Une fois le participant équipé et confortablement installé en position assise, nous avons procédé au début de l'enregistrement endosomatique, i.e., sans application de courants extérieurs.

**A**



**B**



**Figure 18.** Illustrations du matériel d'acquisition AED.

**A.** Amplificateur GSR (FE116). **B.** Electrodes GSR (MLT116F).

### **c) La variabilité de la fréquence cardiaque**

#### *Mesures et méthodes*

La variabilité de la fréquence cardiaque (VFC) est une mesure non invasive, simple et reproductible (Marsac, 2013). La VFC est le terme utilisé pour décrire les variations des intervalles de temps entre les battements cardiaques consécutifs, et dépend principalement de la régulation intrinsèque de la fréquence cardiaque (Rajendra Acharya et al., 2006). Contrairement à la fréquence cardiaque qui peut être stable, la durée entre deux battements cardiaques peut être très variable. Selon le domaine, temporel, fréquentiel ou non linéaire, la VFC se mesure en millisecondes ou à partir de la fréquence à laquelle la longueur de l'intervalle R-R change (Mansier et al., 1996; Billman et al., 2015). La VFC est censée correspondre à l'équilibre entre les influences sympathique et parasympathique sur le rythme intrinsèque du noeud sino-auriculaire. La VFC reflète donc la fonction du système nerveux autonome (SNA) (Billman, 2011; Marsac, 2013). De ce fait, la VFC est considérée comme un indicateur pertinent pour suivre la charge et l'état de fatigue chez le sportif (Buchheit et al., 2011; Stanley et al., 2013; Plews et al., 2014). Dans les sciences du sport, les données de VFC de repos ou à l'effort peuvent être analysées (Buchheit, 2014; Schmitt et al., 2015). Elle peut être mesurée à partir des variations des intervalles R-R sur un électrocardiogramme ou un oxymètre de pouls car son analyse au fil du temps révèle l'existence de microvariations entre chaque battement cardiaque (Schäfer and Vagedes, 2013).

## *Analyse*

Indépendamment du domaine d'analyse (temporel, fréquentiel ou non-linéaire), la VFC offre des informations complexes et précises sur l'activité de notre SNA. Sur la base de précédentes études, nous avons décidé d'utiliser une analyse fréquentielle (Diego et al., 2004; Guan et al., 2014). Il est donc nécessaire d'effectuer une analyse spectrale par transformée de Fourier pour mesurer la fluctuation cyclique des intervalles R-R, et évaluer ainsi l'activité cardiaque par le SNA (Marsac, 2013; Li et al., 2019). Découlent de cette analyse, deux paramètres. La puissance spectrale de la bande de basses fréquences, *Low Frequency* (LF : 0.04 à 0.15 Hz), reflète à la fois l'influence du tonus vagale et l'influence du système nerveux sympathique comme les oscillations de la pression artérielle. Le second paramètre couramment utilisé est la puissance spectrale de la bande de hautes fréquences, *High Frequency* (HF : 0.15 à 0.50 Hz), représentant un témoin de la modulation du tonus vagal, de l'activité parasympathique (Marsac, 2013; Li et al., 2019). En complément de ces deux indicateurs, il est possible d'utiliser le ratio LF/HF reflétant la réactivité du SNA et de la balance sympatho-vagale (Marsac, 2013; Li et al., 2019). Ce ratio signale la prédominance de l'activité sympathique lorsque les valeurs obtenues sont hautes (Pagani et al., 1986; Marsac, 2013; Li et al., 2019). Lors d'une analyse spectrale d'autres indicateurs sont disponibles : la puissance spectrale de la bande de fréquences très basses, *Very Low Frequency* (VLF : 0.07 à 0.04 Hz), et la puissance totale, *Total power*, qui correspond à la somme des quatre bandes spectrales, i.e. de la variance totale des intervalles RR (Marsac, 2013; Li et al., 2019). Cependant, pour notre expérimentation, nous avons décidé de ne pas les utiliser.

## *Matériels et protocole*

Pour sa simplicité d'utilisation et du fait qu'aucune tâche nécessitant les mains n'était demandée dans nos expérimentations, nous avons préféré utiliser un transducteur d'impulsions piézoélectrique compatible avec le dispositif EEG et GSR (TN1012/ST, transducteurs d'impulsions piézoélectrique, ADInstrument, Dunedin, New Zealand). Ce capteur était positionné au niveau du pouce droit de chaque participant, permettant de se défaire des contraintes des ceintures traditionnelles (Figure 19). Cet enregistrement se réalisait donc de manière simultanée aux autres mesures EEG et GSR puisqu'il était relié une fois de plus au même PowerLab. Cette centralisation du montage présentait l'intérêt de faciliter l'analyse post-traitement des données neurophysiologiques.



**Figure 19.** Illustration du matériel d'acquisition VFC, un transducteur d'impulsions piézoélectrique (TN1012/ST).

### 2. Les variables comportementales

Une mesure comportementale est un outil d'observation objectif car elle permet avant tout d'évaluer des changements. Toutefois, ces variables conservent une part de subjectivité car



relatives aux comportements du participant (Magerotte and Willaye, 2010). De ce fait, il nous est possible d'inclure dans cette catégorie les mesures de puissance, la charge de travail totale, les tests de flexibilité ainsi que la tâche de calcul mental. Dans le premier cas, nous nous intéressons aux changements aigus de flexibilité et du niveau de vigilance des participants dans le second cas.

### **a) La puissance musculaire**

#### *Méthode*

Il est connu que la production de force représente une qualité importante dans de nombreux sports. Néanmoins, les sciences du sport ont également démontré que la performance au plus haut niveau est essentiellement déterminée par la capacité à produire des niveaux de puissance élevée (Loturco et al., 2019). Dans certaines disciplines comme le Crossfit<sup>®</sup>, suivant les épreuves, les déterminants de la performance sont partagés de la puissance anaérobie à la capacité aérobie (Bellar et al., 2015). De ce fait, la résistance musculaire apparaît comme un élément incontournable pour performer dans cette discipline. Pour ces raisons, nous avons cherché à mesurer cette puissance musculaire de sortie au moyen d'un accéléromètre (Myotest PRO, Sion, Switzerland, 250 Hz) (Figure 20). Accroché à la barre d'haltérophilie au cours d'un squat nuque, cet outil nous permet de mesurer l'accélération de la barre (Comstock et al., 2011; Banyard et al., 2017). Une étude précédente démontrait la fiabilité de ces mesures comparativement à celles obtenues à partir d'une plateforme de force (Crewther et al., 2011).



**Figure 20.** Illustration de l'accéléromètre MyotestPro.

### *Protocole*

Une fois l'appareil fixé à la barre d'haltérophilie, les participants étaient invités à réaliser un protocole de fatigue composé de squat nuque (mouvement de flexion et extension des membres inférieurs). Une fois en place, l'expérimentateur actionnait l'appareil qui dictait au participant un tempo d'exécution de 2111 pour réaliser cet exercice. Autrement dit, les participants devaient réaliser la phase excentrique sur 2 secs, maintenir sur 1 sec la phase d'isométrie en position accroupie avant d'exécuter la phase concentrique en 1 sec et maintenir la seconde position d'isométrie 1 sec avant de repartir sur une nouvelle répétition. Pour chaque série complétée dans son entièreté, l'appareil indiquait la puissance de sortie moyenne. L'expérimentateur aidait le participant à replacer la barre sur son support et réinitialisait l'appareil de mesure avant la série suivante.

## **b) La charge de travail totale**

### *Méthode*

La mesure de la charge de travail totale, aussi appelée tonnage, est utilisée pour mesurer le volume d'entraînement et consiste à multiplier le nombre total de répétition par le poids en kilogrammes déplacer au cours d'un exercice, ici le squat nuque. Il convient d'effectuer la formule suivante :

### *Charge de travail totale :*

*(Nombre de série × Nombre de répétition par série) × La charge (en kg)*

### *Protocole*

Avant tout destiné au suivi des athlètes, cette mesure a pour but de réduire les risques de surentrainement et de blessures (Margonis et al., 2007). Dans notre étude, nous avons utilisé cette mesure sur nos deux conditions à des fins de comparaison sur les capacités de résistance musculaire. Pour chaque intervention, le poids était identique. Pour les comparer, nous avons totalisé le nombre de répétition pour obtenir la charge de travail totale. L'expérimentateur devait vérifier la qualité d'exécution de chaque répétition pour chaque série. Seules les répétitions respectant les critères de réalisation, établies au préalable, étaient comptabilisées (Kerautret et al., 2021).

### **c) Les performances cognitives**

#### *Méthode*

Parmi les différents tests mesurant les performances cognitives il existe des tâches de calcul mental (Caviola et al., 2017). Ce type de test est simple, rapide et présente l'intérêt d'avoir déjà été utilisé dans le cadre du massage manuel afin de mesurer le niveau de vigilance et d'alerte (Diego et al., 2004). Une grille et un chronomètre sont les deux outils nécessaires pour mener à bien ce test (Annexe 2). Au préalable, les participants sont invités à lire les consignes de la tâche en complément des indications de l'examineur.

#### *Protocole*

Pour évaluer l'effet des différentes modalités de massage au cours de nos études, nous avons fait le choix d'utiliser une tâche de calcul mental sous la forme d'une soustraction à partir du chiffre 7. Après avoir donné un exemple au participant pour contrôler sa bonne compréhension de l'exercice à suivre, l'examineur indiquait un nombre aléatoire compris entre 500 et 1 000. Au même moment, le participant devait écrire ce nombre sur la grille dans la case en gras prévue à cet effet tandis que l'examineur lançait un décompte de 120 secs avec le chronomètre. Durant le temps imparti, le participant devait tenter de réaliser le maximum d'opérations en inscrivant ses réponses de haut en bas dans la suite de la grille prévue à cet effet. Les participants avaient pour consigne de faire le moins d'erreur possible.

Exemple :

Nombre tiré au sort : 507

Réponses attendues : 500 – 493 – 486 – 479 etc.

Si une erreur était constatée mais que les réponses reprenaient la même logique de calcul dans les réponses suivantes, une seule était comptabilisée.

Exemple :

Nombre tiré au sort : 507

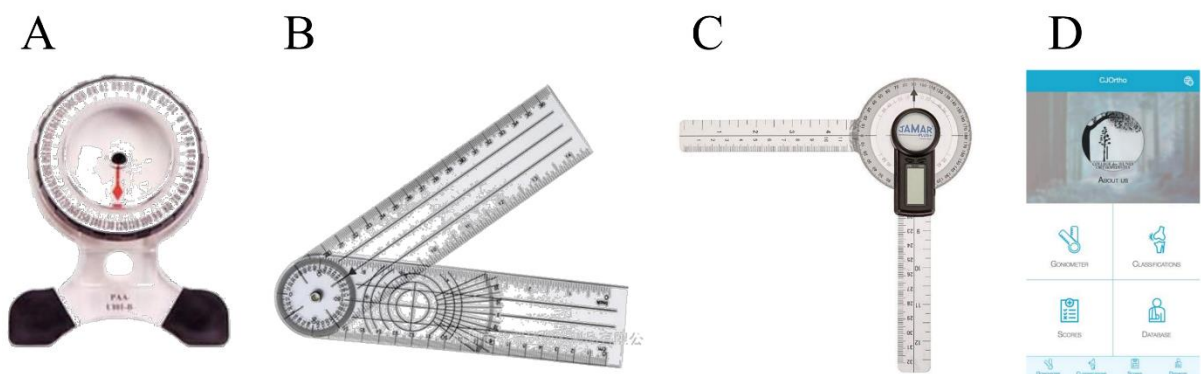
Réponses comprenant une erreur : 500 – 494 – 487 – 480 etc.

#### **d) Le test de Duncan-Ely**

##### *Méthode*

Le test de Duncan-Ely, aussi appelé le test d'Ely, est avant tout utilisé pour évaluer la spasticité et la flexibilité du muscle droit fémoral (Marks et al., 2003; Peeler and Anderson, 2008; Lee et al., 2015). Le participant peut être installé sur une table de massage, mais un tapis de gymnastique permet de réaliser ce test au sol. Tandis que le sujet se trouve en position de décubitus ventral, l'examineur saisit la cheville de la jambe testée afin de réaliser une flexion passive du genou. Le test s'arrête lorsque ce dernier ressent une résistance musculaire. A des fins de reproductibilité, l'examineur doit donc veiller à ne pas créer de surpression sur la jambe fléchie afin de ne pas biaiser le test. Aussi, pour garantir la bonne réalisation de ce test, le bassin devait être maintenu pour éviter toute compensation posturale, i.e. une élévation du

membre inférieur et du bassin. La mesure s'effectue ensuite de deux manières différentes. La première solution consiste à utiliser un inclinomètre digital. L'outil doit être positionné sur la face médiale du tibia juste en dessous de l'articulation de la cheville (Cheatham et al., 2017a; Cheatham and Stull, 2018a, 2018b). La seconde requiert l'usage d'un goniomètre médical. Cet appareil ancien permet de mesurer l'angle des amplitudes articulaires (Petitdant, 2016). Cet outil comporte deux parties : un rapporteur qui peut être circulaire, i.e., de 360°, ou demi-circulaire, i.e., 180°, ainsi que deux branches. Une de ces branches est solidaire du rapporteur tandis que l'autre est porteuse d'un repère indiquant la mesure sur le rapporteur. De ce fait, de nombreuses versions existent, e.g., goniomètre dit de Cochin (Petitdant, 2016). Toutefois, les progrès techniques permettent désormais l'utilisation de goniomètres digitaux ou encore plus récemment des applications sur smartphone (Carey et al., 2010; Petitdant, 2016; Reina et al., 2018; Reina, 2019, Figure 21).



**Figure 21.** Illustrations d'un inclinomètre, de goniomètres et d'une application smartphone.

**A.** Inclinomètre. **B.** Goniomètre universel. **C.** Goniomètre digital. **D.** Application smartphone CJOrtho.

## *Protocole*

Dans notre projet d'étude, nous avons fait le choix d'utiliser le goniomètre numérique de l'application mobile CJOrtho sur le système d'exploitation iOS (Apple, Cupertino, CA). Cette application développée par le Collège des Jeunes Orthopédistes possède plusieurs fonctions dont un goniomètre numérique. Elle est donc destinée avant tout aux chirurgiens orthopédistes et aux professionnels de la santé traitant les troubles musculo-squelettiques (Reina et al., 2018; Reina, 2019). Cette application permet de mesurer les angles à partir d'une image enregistrée sur le smartphone ou d'une photo prise avec l'appareil photo. L'utilisateur doit ensuite placer trois points de référence sur l'image ou la photo réalisée. Afin de garantir une reproductibilité des mesures, trois marqueurs de couleur ont été directement positionnés sur chaque participant à leur arrivée. En effet, nous avons placé une pastille à même la peau sur chacun des trois repères anatomiques/osseux par palpation afin de réaliser une mesure efficace et reproductible (Royer and Cecconello, 2004). Pour ce faire, les participants étaient en sous-vêtement ou tenue permettant la visibilité des repères. Le centre articulaire, qui est également le centre de rotation dans cette situation, a été positionné au niveau de l'épicondyle latéral du genou droit. Les deux autres repères osseux ont ensuite été collés au niveau du grand trochanter et de la malléole latérale de la même jambe (Frenot, 2012). Une fois équipés, des clichés photos furent capturés au moyen d'un iPhone 7. Le smartphone était ensuite installé sur un support pour le maintenir vertical et à une distance standardisée de 200 cm des participants. Cette distance était nécessaire pour avoir suffisamment de recul et ainsi observer les différentes pastilles de couleur. L'examineur enclenchait l'appareil photo et son retardateur réglé à 15 secs pour retourner auprès de son participant et réaliser le test. Enfin, nous reportions les trois repères numériques sur l'application pour obtenir l'angle de flexion du genou.

### e) Le test de sit-and-reach

#### *Méthode et protocole*

Le test de sit-and-reach est utilisé pour mesurer la souplesse rachidienne et des muscles ischio-jambiers (Wells and Dillon, 1952). Ce test offre la possibilité d'être effectué de manière bilatérale ou unilatérale (Miñarro et al., 2007; Mayorga-Vega et al., 2014). Une nouvelle fois, la mise en place de ce test est simple et le matériel peu coûteux. En effet, l'équipement nécessaire se compose uniquement d'une boîte graduée. Cette dernière doit être posée sur un sol plat et calée contre un mur pour éviter qu'elle ne glisse. Une fois le matériel en place, le participant est invité à retirer ses chaussures et s'asseoir sur le sol. La consigne est de poser la plante des pieds à plat contre l'extrémité de la boîte avec les jambes tendues. L'écartement des pieds ne doit pas excéder 20 cm. Pour effectuer la mesure, le participant doit ensuite se pencher vers l'avant avec les bras tendus et les mains l'une sur l'autre, le but étant d'essayer de les faire glisser le plus loin possible sur l'échelle de mesure située sur le dessus de la boîte. L'examineur doit alors veiller à ce que les pieds restent bien à plat contre la boîte et que les genoux ne se fléchissent pas. Pour valider la bonne réalisation, ce test doit se réaliser à vitesse lente, sans à-coups. De même, le participant doit également maintenir sa position au moins 6 secs (Ayala et al., 2012). A noter que la valeur de référence zéro se situe au niveau des orteils et seul le meilleur des trois essais est retenu. L'usage de rubans de couture permet une évaluation précise au 0.1 cm.



## **f) Le test de toe touch**

### *Méthode*

Comme nous allons le voir, ce test de toe touch permet également d'évaluer la souplesse rachidienne et des muscles ischio-jambiers (Fieldman, 1968). Le seul matériel dont nous avons besoin est une boîte munie d'un système de mesure millimétrique. Néanmoins, ce test se distingue du sit-and-reach. En effet, le participant est invité à monter sur la boîte et se mettre dans la position standardisée. Le participant doit se tenir debout au bord de la boîte pieds nus au niveau du système de mesure millimétrique. Les pieds sont parallèles et un écartement maximal de 20 cm doit être respecté. Lentement, le participant doit réaliser une flexion du buste en enroulant la colonne de haut en bas, i.e., les vertèbres cervicales tout d'abord, puis progressivement les vertèbres thoraciques et enfin les vertèbres lombaires. Ce dernier est donc penché sur l'avant comme s'il cherchait à toucher ses orteils. Durant toute cette procédure, les jambes ainsi que les bras et les doigts doivent être maintenus tendus. Aucun rebond, aucuns à-coups ne sont autorisés. Le participant doit utiliser la gravité et tenir la position basse sans bouger durant au moins 2 secs. Cette dernière particularité permet de mettre en évidence la principale différence entre les tests de toe touch et de sit-and-reach. En effet, bien qu'une flexion du tronc soit également à l'origine du mouvement, la position finale du toe touch est dite passive. En effet, sur le sit-and-reach pour aller le plus loin possible et tenir la position finale 6 secs, les participants sollicitent les différents muscles de l'abdomen en contraction isométrique, ce n'est pas le cas du toe touch (Gajdosik and Lusin, 1983; Chung and Yuen, 1999; Ayala et

al., 2012). De ce fait, le test de toe touch est donc un test que l'on peut qualifier de semi-actif contrairement au sit-and-reach qui est entièrement actif (Holt et al., 1999; Ayala et al., 2012). L'examineur est autorisé à maintenir les genoux pour éviter toute flexion. Seul le meilleur des trois essais est alors retenu avec un niveau de précision de l'ordre de 0.1 cm. Aussi, semblable au sit-and-reach, la valeur de référence zéro se situe au niveau des orteils. De ce fait, les personnes ne parvenant pas à atteindre le bout des doigts de pieds obtiennent une note négative, ce qui nécessite une mesure manuelle avec un second ruban de mesure de la part de l'examineur. Les participants qui sont en mesure d'aller plus bas que les orteils obtiennent un score positif.

### 3. Les variables psychométriques

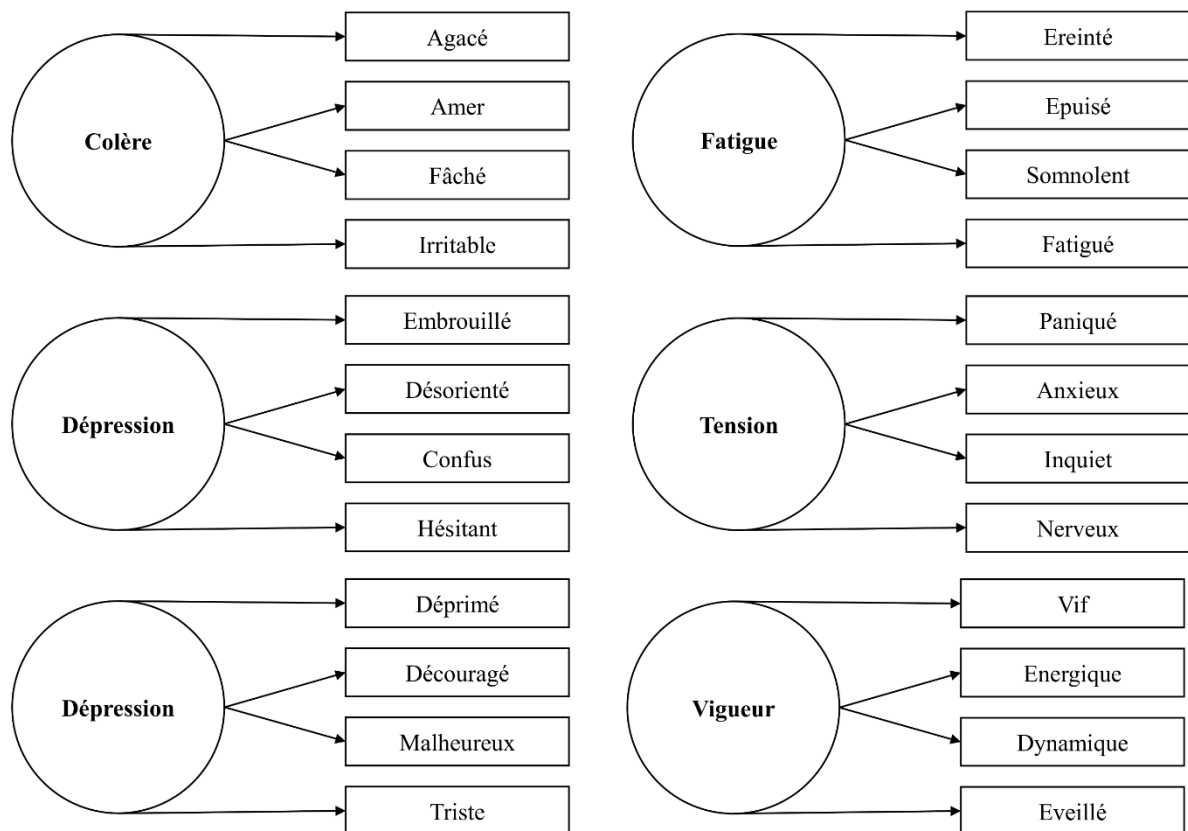
Les mesures psychométriques sont relatives à la psychométrie, qui est elle-même une « branche de la psychologie consacrée aux tests, à leur construction et à leur utilisation » (Petit Larousse Illustré, 2020). Ces outils sont donc utilisés pour mesurer les traits psychologiques de manière standardisée. Ces tests permettent d'étudier les caractéristiques et les différences entre des individus ou des groupes d'individus selon une approche statistique objective. Nous avons utilisé des questionnaires déjà éprouvés par la littérature pour mesurer notamment les états d'humeur des individus avec le test de BRUMS (Brunel Mood Scale), et la charge de travail au moyen du test NASA Task Load index (NASA – TLX) (Hart and Staveland, 1988; Byers et al., 1989; Terry et al., 1999, 2003). De même nous avons fait l'usage d'échelles subjectives, des échelles visuelles analogiques et des échelles numériques pour estimer les sensations des participants.

## a) Le test de Brunel Mood Scale (BRUMS)

### *Méthode*

Avant d'être appelé Brunel Mood Scale (BRUMS), ce test s'appelait Profile of Mood States-adolescents (POMS-A)(Terry et al., 1999, 2003). Sa simplicité et sa reproductibilité lui ont valu une validation et de nombreuses traductions (Cañadas et al., 2017). Le BRUMS se compose de 24 items évaluant six sous-échelles que sont la colère, la confusion, la dépression, la fatigue, la tension et la vigueur (Annexe 3). Cet outil permet d'évaluer les états d'humeur des participants qui sont invités à répondre à la question de référence : « Comment vous sentez-vous en ce moment ? ». Pour chaque item, le participant s'auto-évalue suivant une échelle de Likert de 5 points (0 = « Pas du tout », 1 = « Un peu », 2 = « Modérément », 3 = « Beaucoup », 4 = « Extrêmement »). Il est primordial de répondre de manière spontanée sur l'instant présent et non en fonction de ses sensations habituelles.

Les 24 items se répartissent en six sous-échelles, qui comportent à leur tour quatre descripteurs d'humeur (Figure 22). La somme des scores de ces derniers permet d'obtenir un score entre 0 et 16 pour chaque sous-échelle. Toutes ces informations ont été répertoriées dans notre tableau de données.



**Figure 22.** Illustration des six sous échelles du BRUMS

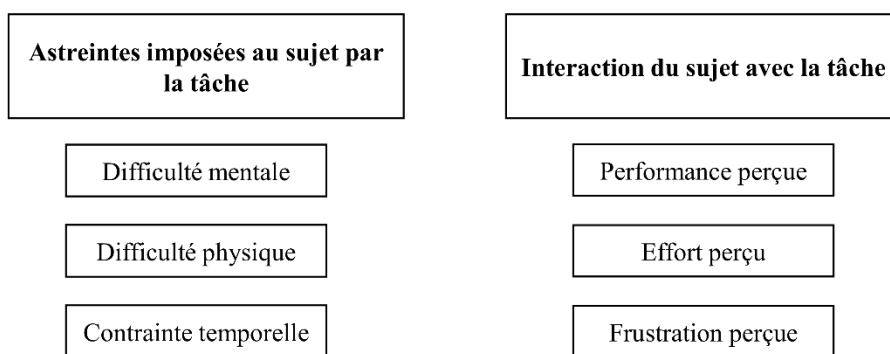
issue des travaux de Terry et al. (2003).

## b) Le test NASA TLX

### *Méthode*

Le NASA TLX est un questionnaire multidimensionnel validé qui permet d'évaluer la charge mentale subjective (Hart and Staveland, 1988) (Annexe 4). Plusieurs traductions sont disponibles (Cegarra and Morgado, 2009). Cette méthode a notamment été utilisée en laboratoire dans le cadre d'exercices d'imagerie motrice et de tâches de calcul mental (Rubio et al., 2004; Raisbeck et al., 2015). Les six échelles sont décomposées en deux catégories : les

trois premières dimensions représentent les contraintes imposées au sujet par la tâche, i.e., difficulté mentale, physique et contrainte temporelle ; les trois autres estiment des interactions du sujet avec la tâche, i.e., la performance, l'effort et la frustration perçue (Figure 23). Chaque échelle est codée. Elles se composent d'un axe gradué et de deux extrémités portant les mentions « Très faible » et « Très élevé ». Ce sont des échelles dites « bipolaires ». Sur cet axe le participant choisit une graduation plus ou moins proche de l'une des deux extrémités. De la sorte, les participants ne sont pas en mesure de connaître la valeur numérique assimilée.



**Figure 23.** Illustration des six sous échelles et des deux catégories du NASA-TLX issue des travaux de Hart et Staveland (1988).

### *Analyse*

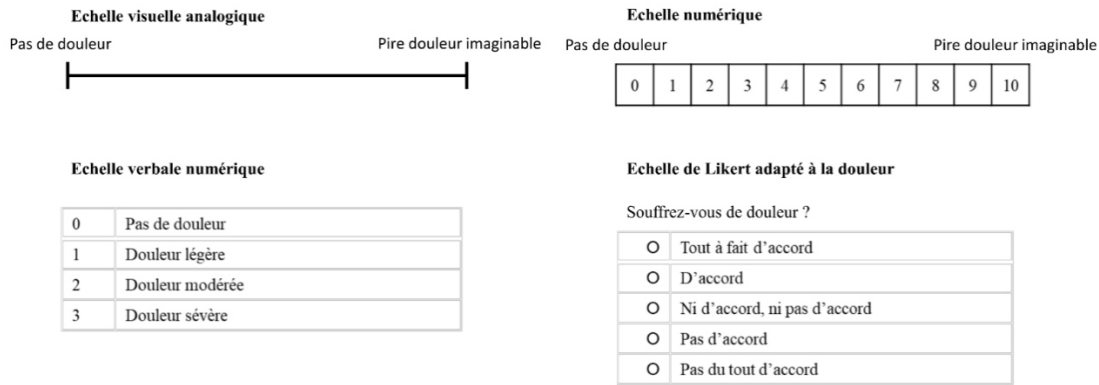
Ces échelles bipolaires comptent 21 graduations de 5 points (Annexe 4). La première graduation attribue un score de 0 tandis que la dernière un score de 100. Dans sa version simplifiée, il n'est pas nécessaire d'effectuer de pondérations (Byers et al., 1989). La charge de travail est calculée par moyennage des scores obtenus pour chacun des six critères d'astreinte.

### c) Les échelles subjectives

#### *Méthode*

Pour évaluer les sensations perçues par les participants sur le terrain, comme en condition expérimentale, plusieurs types d'échelles subjectives sont disponibles. En effet, il est possible de distinguer les échelles visuelles analogiques (EVA), les échelles numériques (EN), les échelles verbales simples (EVS) et l'échelle de Likert. Ces échelles ont pour point commun la mesure du niveau de douleur (Hjermstad et al., 2011). Néanmoins, dans certaines circonstances, ces outils sont également profitables pour l'évaluation d'autres sensations subjectives (Cella and Perry, 1986; de Boer et al., 2004; Parker et al., 2004). Les EVA consistent à utiliser une ligne de 10 centimètres. Elles sont dites bipolaires en raison de la présence de deux adjectifs situés à chaque extrémité de la ligne. Pour des raisons de précision, la mesure millimétrique, i.e., de 0 à 100 mm, est privilégiée à la mesure centimétrique, i.e., de 0 à 10 cm (Williamson and Hoggart, 2005, Figure 24). Les EN sont, quant à elles, le plus souvent présentées dans des boîtes afin de différencier chaque niveau de discrimination. De ce fait, plusieurs échelles existent. La version la plus commune se décompose en 11 niveaux échelonnés des chiffres 0 à 10 (Williamson and Hoggart, 2005, Figure 24). Les EVS se rapprochent parfois des EN à 11 niveaux. Cependant, elles existent également sous la forme de 4 niveaux. Ces échelles présentent la particularité d'accorder à chaque niveau un adjectif (Williamson and Hoggart, 2005, Figure 24). Enfin, l'échelle de Likert se caractérise par un nombre impair de degrés, i.e., 3, 5 ou 7. Chaque degré correspond à une déclaration afin d'enregistrer le niveau d'accord ou de désaccord du participant face à une proposition. Elle se

présente sous la forme bipolaire et possède une déclaration neutre (Joshi et al., 2015, Figure 24).



**Figure 24.** Illustrations des différentes échelles subjectives de la douleur.

### *Analyse*

Nous avons privilégié les EVA à mesure millimétrique et les EN pour évaluer la douleur perçue par les participants avant et après chaque intervention. Ces mêmes échelles ont également servi à recueillir d'autres sensations perçues comme l'état de forme, la chaleur, la détente musculaire, la relaxation, l'anxiété, la souplesse ou encore l'amplitude articulaire (Annexe 5). Enfin, des échelles EVA ont été utilisées pour enregistrer des données sur le kinésithérapeute. En effet, le professionnel devait compléter un questionnaire avant et après chaque massage. Le praticien devait donc s'auto-évaluer sur ses sensations de fatigue, de tension, d'efficacité, de pression exercée, de fréquence et d'amplitude gestuelle (Annexe 6).

## B. La solution iYU<sup>®</sup> Pro

Après avoir décrit les différentes variables dépendantes étudiées au sein de ce volet expérimental, nous présentons ci-dessous la solution iYU<sup>®</sup> Pro développée par la société Capsix Robotics que nous avons utilisé dans l'expérimentation comparative. iYU<sup>®</sup> Pro est un système de massage robotisé, autonome et interactif destiné à la détente. Le système repose sur la communication permanente de deux éléments clés : le dispositif matériel, appelé « hardware » et le logiciel informatique, appelé « software ». Pour mieux comprendre son fonctionnement, il nous semble opportun de présenter le déroulé d'une séance avec la solution iYU<sup>®</sup> Pro telle que vécue par l'utilisateur en entreprise à ce jour :

- L'utilisateur réserve le créneau de la séance qu'il souhaite sur une plateforme Web prévue à cet effet et gérée par Capsix Robotics. La plateforme génère un code d'identification à 4 chiffres.

- Il vient à l'heure et au jour dit dans la salle réservée à cet usage.

- Il renseigne son code à 4 chiffres sur la borne d'accueil pour s'identifier.

- Il interagit avec la borne d'accueil qui le guide dans les différentes étapes de sa séance.

Il choisit le protocole qu'il souhaite vivre, et sélectionne l'ambiance musicale.

- Il s'installe sur la table de massage, et un écran sous la table prend le relais du guidage.

- Il utilise la télécommande pour interagir durant sa séance à tout moment (augmentation/ diminution de la pression exercée, lancement/arrêt de la séance).



- En fin de séance, il retourne vers la borne d'accueil qui le guide afin de clôturer l'expérience.

Notons que la solution iYU<sup>®</sup> Pro est développée de manière itérative. La version qui a été utilisée lors de notre expérimentation sur la période de Juin à Juillet 2020 au CHU de Saint-Etienne ne disposait pas encore de borne d'accueil indépendante. L'écran d'interaction était positionné directement à côté du bras robotisé, sur le support robot. Par ailleurs, à la différence des utilisateurs en entreprises, des aménagements ont été réalisés dans le cadre de l'expérimentation. Ainsi, les participants de cette étude n'ont pas eu à réserver leur séance via la plateforme Web. A des fins d'organisation, nous avons décidé nous-même de l'attribution de ces créneaux. De même, les participants n'ont pas eu le loisir de choisir le protocole de massage. Pour des raisons de reproductibilité cette fois, le protocole avait été déterminé lors de la conception de cette expérimentation et devait être le même pour tous. Nous présentons ci-dessous les éléments composant le « hardware » et le « software » qui constituaient la solution iYU<sup>®</sup> Pro en date de l'expérimentation. Pour ce faire, nous allons tout d'abord décrire les différents éléments composant ce « hardware », avant de nous intéresser au fonctionnement du « software ».

## 1. Le matériel

Le terme matériel fait aussi référence au terme « hardware » en informatique (Petit Larousse Illustré, 2020). De ce fait, la partie « hardware » de la solution iYU<sup>®</sup>Pro est composée des éléments suivants : le robot LBR Med 14 R820, le support robot qui fait également fonction d'armoire électrique, le PC, le contrôleur du robot, le capteur 3D, la télécommande, la table de massage motorisée, l'écran tactile et enfin la main de massage. Le schéma du montage

électrique permet de mieux comprendre l'agencement et les interactions des différents éléments qui composent la solution iYU<sup>®</sup> Pro. Dans le cadre de la solution iYU<sup>®</sup> Pro développée par la société Capsix Robotics, le robot utilisé est un robot collaboratif LBR Med (LBR Med R820, KukaRobotics, Augsburg, Allemagne). Cette version de robot LBR Med est destinée avant tout au domaine médical. Elle se compose d'un bras robotique pesant 32.3 kg qui s'accompagne d'un contrôleur Kuka Sunrise Cabinet Med de 23 kg et d'une télécommande munie d'un écran, appelée smartPAD. Ce bras peut embarquer une charge maximale de 14 kg sur une portée de 820 mm. Il présente la particularité de bénéficier de sept axes, ce qui permet au roboticien de programmer le déplacement du bras en évitant les positions singulières. Il est également en mesure de détecter des influences extérieures et les éventuelles collisions grâce à un système de capteurs de couple ultra-sensibles. Ces capteurs sont redondants (i.e. doublés, avec une vérification permanente de leur cohérence), ce qui permet d'utiliser leurs informations comme conditions de sécurité. Ce modèle bénéficie également d'une répétabilité de position de l'ordre de  $\pm 0.15$  mm et d'une précision de vitesse spécifique aux axes de  $\pm 2\%$  à vitesse maximale. En mode collaboratif, la vitesse maximale de ce robot ne peut excéder les 250mm/s. Le LBR Med peut, comme de nombreux bras collaboratifs, restreindre son espace de travail de manière sécurisée. Enfin, ce bras peut être piloté en mode « souple » : le bras se déplace dans l'espace vers le point demandé, tout en prenant en compte d'éventuelles forces extérieures appliquées sur l'effecteur. En cas de présence d'obstacle, le bras applique une force continue en direction du point visé, selon une raideur réglable par le programmeur.

Ces spécificités lui confèrent de nombreux avantages, notamment celui de rendre possible la collaboration homme-robot. Pour répondre aux exigences des applications médicales, ce robot est également muni d'une bride d'alimentation, Inside electrical Med, lui

permettant de fixer l'effecteur avec une connexion électrique invisible, ne laissant apparaître aucun câble. La polyvalence de cette bride permet des connexions électriques de puissance ainsi que des signaux d'entrées et de sorties. Le contrôleur est également muni de connexions d'entrées et de sorties qui permettent d'installer divers dispositifs comme un bouton d'arrêt d'urgence, caractéristique obligatoire sur tout système robotisé.

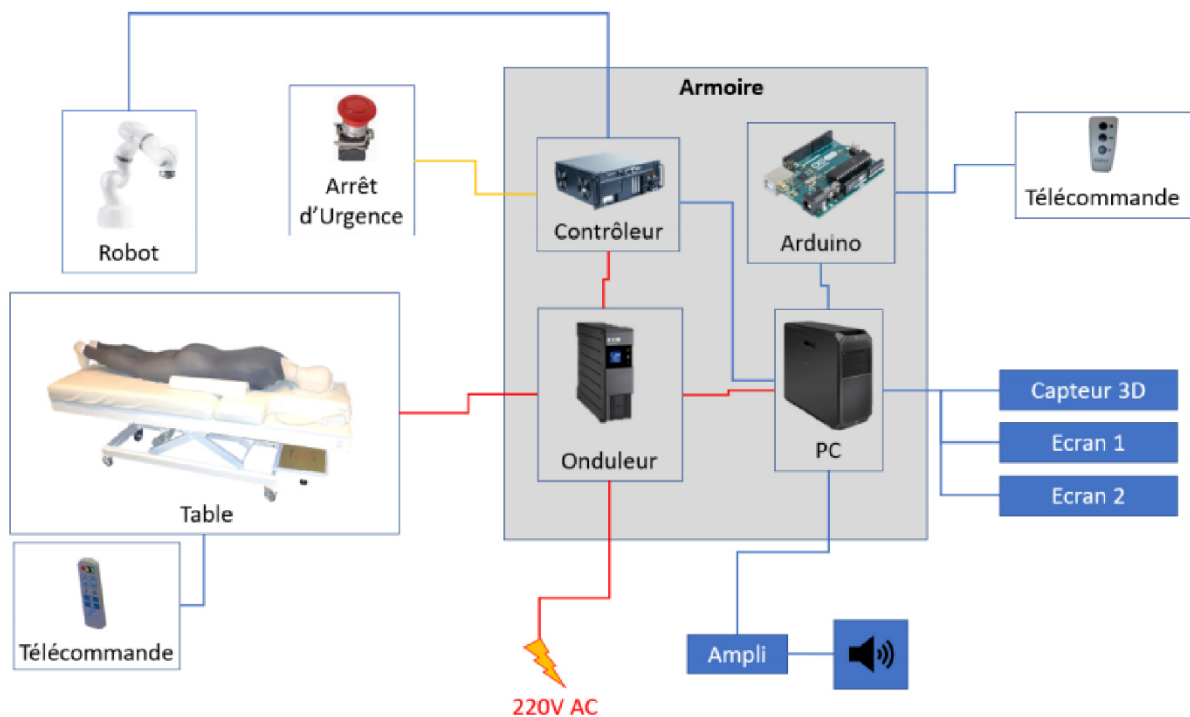
### **a) Le support robot**

Le robot LBR Med comprend un système de fixation sous son socle lui permettant d'être mis en place sur de nombreux supports. Le support robot créé par la société Capsix Robotics intègre également un mât de fixation du capteur 3D situé au-dessus de la table de massage, un second mât présentant l'écran tactile à usage de l'utilisateur, ainsi qu'un bouton d'arrêt d'urgence. À l'intérieur du support, sont intégrés des éléments permettant le fonctionnement de la solution (onduleur, PC, contrôleur du robot et divers automates permettant le pilotage de la table, la gestion de la télécommande et d'autres systèmes).

### **b) L'onduleur**

L'onduleur a pour vocation de protéger les équipements informatiques de perturbations électriques en fournissant une tension régulière grâce à une batterie supplémentaire, même lors de coupures de courant de l'ordre de quelques minutes. Au sein de ce dispositif, l'onduleur (5P 650i R, Eaton, Dublin, Irlande) est destiné au PC, au contrôleur du robot et à la table de massage (voir schéma électrique, Figure 25). Dans le cas d'une coupure de courant intempestive, cet élément offre donc au robot la possibilité de continuer à fonctionner pour lui permettre de

s'arrêter de manière contrôlée et d'éviter ainsi que le robot ne s'arrête brutalement au cours d'une manœuvre de massage sur l'utilisateur.



**Figure 25.** Schéma électrique simplifié de la solution iYU® Pro.

### c) Le PC

Le « personal computer » (PC) est un autre élément majeur de ce dispositif situé dans l'armoire électrique du dispositif iYU® Pro. Ce PC permet notamment le bon fonctionnement du logiciel est relié à l'ensemble des autres composants. Il est donc en mesure de communiquer avec le robot et de recueillir les données du capteur 3D ainsi que des automates de gestion des artefacts ou de la télécommande. De même, par l'intermédiaire d'un amplificateur mini hi-fi de 30 W (MAMP-215, Pronomic, Schongau, Allemagne) et d'un haut-parleur encastrable de 30

W (DL-10, Visaton, GmbH & Co. KG, Haan, Allemagne), le PC permet de délivrer du son ou de la musique.

#### **d) Le contrôleur du robot**

Le contrôleur du robot (Kuka Sunrise Cabinet Med, KukaRobotics, Augsburg, Allemagne) est un élément garantissant le pilotage du bras, la commande de la sécurité, la commande logique et la commande de processus de l'ensemble du système (Figure 25). Le fabricant revendique des facultés d'automatisation presque illimitées à l'aide de ce contrôleur.

#### **e) Le capteur 3D**

Afin de garantir un ajustement à la morphologie individuelle, la solution iYU<sup>®</sup> Pro intègre une caméra vidéo couleur RVB de 12 MP (Azure Kinect DK, Microsoft, Washington, Etats-Unis). Ce capteur intègre également un système d'estimation de la profondeur de 1 MP basée sur la technologie Time of Flight (ToF, [https://en.wikipedia.org/wiki/Time-of-flight\\_camera](https://en.wikipedia.org/wiki/Time-of-flight_camera)), permettant de scanner le corps des usagers allongés sur la table de massage (Figure 25). À ce titre, nous lui privilégierons le terme de capteur 3D à celui de caméra. Du fait de ses dimensions compactes (12.6\*10.3\*3.9 cm), ce capteur 3D est installé au bout d'un mâtdans le but de surplomber la table de massage et son occupant. Son bon ajustement est essentiel pour garantir la bonne réalisation du massage. Les ingénieurs utilisent les données extraites de l'accéléromètre et du gyroscope (IMU) intégré au dispositif. Une fois installé, le système peut alors procéder au scan de la personne, puis à l'adaptation du protocole de massage à sa morphologie au moyen d'un modèle générique et de la vision par ordinateur. Au moment des expérimentations rapportées dans ce travail, l'adaptation à la morphologie était réalisée par

un opérateur humain, sur la base des données du capteur et du système logiciel. Cette prouesse technologique est une partie intégrante de la technologie i&Bot<sup>®</sup> sous-jacente au système iYU<sup>®</sup> Pro et fera l'objet d'une description plus poussée dans le manuscrit (cf. partie logicielle).

#### **f) La table de massage motorisée**

Pour garantir le confort de ses utilisateurs, iYU<sup>®</sup> Pro utilise une table de massage motorisée de 197x74 cm. Cette table présente la particularité d'avoir une tête de 16x13 cm et un matelas d'une épaisseur de 12 cm. Toutefois, pour parfaire la solution, quelques modifications ont été apportées par la société Capsix Robotics. En effet, un écran a été intégré sous la table de massage pour offrir un visuel aux utilisateurs et améliorer leur expérience de massage. Sur cet écran, plusieurs informations pratiques sont transmises : consignes, informations de début et de fin de massage notamment. L'interface propose également une jauge servant de feedback aux utilisateurs lorsqu'ils modifient la pression du massage à l'aide de la télécommande. Ce retour est utile pour estimer le niveau de pression produit et offrir un aperçu de la marge de manœuvre encore disponible.

#### **g) La main de massage**

Cette solution iYU<sup>®</sup>Pro, avec ses équipements et ses capteurs, ne serait rien sans l'effecteur de massage développé par la société Capsix Robotics (Figure 26).



**Figure 26.** Illustrations de la main de massage de la solution iYU® Pro avec son système articulé et sa chaussette en silicone.

Comme évoqué précédemment, la bride d'alimentation intégrée au robot collaboratif offre l'opportunité d'alimenter l'effecteur et donc cette main de massage motorisée. Schématiquement, cette main se rapproche d'une main humaine dont les doigts seraient collés. La partie arrière est fixe et représente le talon de la main, tandis que l'autre est mobile comme la paume de la main. Chez l'humain, cette paume de main se compose d'une structure osseuse avec le carpe et le métacarpien entourés par les muscles éminences thénar et hypothénar. La paume de la main est donc une partie peu mobile mais présente une surface épaisse de peau. À l'inverse, la seconde partie de la main, constituée des cinq doigts, est beaucoup plus mobile. En effet, elle comprend une structure osseuse composée de phalanges proximales, médianes et distales, aussi appelée 1<sup>ère</sup>, 2<sup>nd</sup> et 3<sup>ème</sup> phalange. Seul l'hallux (le pouce), ne possède pas de phalange médiane. Ces doigts présentent la particularité de contenir uniquement les tendons des différents muscles intrinsèques et extrinsèques de la main. Néanmoins, la face palmaire de ces doigts possède un tissu aréolaire important formant de véritables coussinets, aussi appelés pulpe des doigts. Avec une architecture proche de celle d'une main réelle, il est aisé de comprendre que ces deux parties vont être sollicitées à tour de rôle, en fonction des manœuvres voulues par le masseur-kinésithérapeute. La paume est particulièrement utilisée pour les manœuvres à forte

pression (pression statique, pression glissée légère ou profonde). Les doigts présentent une surface de toucher plus réduite, permettant une meilleure précision de la pression. De même, les articulations qui la composent lui confèrent une mobilité élevée. Au moyen de ses doigts, le masseur-kinésithérapeute est en mesure d'épouser les formes de la personne massée. Cette particularité est d'autant plus importante sur les manœuvres englobantes (i.e. l'effleurage, la pression glissée légère ou profonde) et de palpation comme le pétrissage. De ce fait, le talon de cette main de massage se situe à l'aplomb de la partie distale du robot. De cette manière, il est possible de garantir la bonne application des pressions profondes avec la zone rigide. Son épaisseur, spécialement conçue pour cet usage, offre un compromis entre résistance aux déformations et mobilité de la partie avant. Pour ces raisons, le talon est renforcé. La main de massage est articulée pour reproduire au plus près le comportement de la main humaine. Au-delà de la partie rigide, la structure de la main permet des mouvements de flexion et d'extension. Pour finir, une socquette en silicone spécialement étudiée à cet usage recouvre la main. Ce silicone présente la particularité de se rapprocher au plus près du toucher humain. En effet, ce dernier est doux et limite fortement l'aspect de friction. Les caractéristiques de cette main de massage lui permettent de résister à des pressions importantes et d'épouser les formes/courbures des usagers en fonction de leur morphologie de manière assez proche des gestes du praticien.

## 2. Le logiciel

Le robot LBR Med est un outil qui a des capacités mais pas d'application dédiée. Il n'est donc pas destiné spécifiquement à effectuer du massage. Ce sont les concepteurs de solutions robotisées de soins qui définissent l'application visée, et qui développent les systèmes logiciels nécessaires au pilotage du robot pour réaliser cette application. Dans le cas de la solution iYU®



Pro la partie logicielle constitue le « software » (Petit Larousse Illustré, 2020). Ici, nous présenterons les spécificités du côté numérique de la solution iYU<sup>®</sup> Pro, avant de nous intéresser plus particulièrement au fonctionnement de la technologie i&Bot<sup>®</sup> sur laquelle se base la solution iYU<sup>®</sup> Pro.

### **a) L'application de massage iYU<sup>®</sup>**

Développée par la société Capsix Robotics, la solution iYU<sup>®</sup> est conçue spécifiquement pour des massages comprenant des interactions utilisateurs. Ce système de massage robotisé, autonome et interactif permet, en amont de la séance, le choix par l'utilisateur de plusieurs caractéristiques de la séance de massage. Pour ce faire, les utilisateurs ont à disposition un écran tactile pour suivre les consignes de préparation de la séance, renseigner leur état avant séance, déterminer le protocole de massage voulu et l'ambiance sonore. Lors de l'expérimentation, le protocole n'était pas au choix et les consignes données à l'oral. Seule la musique était laissée à discrétion de l'utilisateur. Une fois sur la table de massage, l'utilisateur retrouve cette même interface sous la tête avec un écran additionnel. Il est alors en mesure de suivre les consignes pour le début et la fin de séance et pour ajuster le niveau de pression par l'affichage d'une jauge numérique. En effet, en cas de besoin, l'usager peut augmenter ou diminuer la pression à sa convenance à tout moment avec une télécommande de contrôle et de la même manière, arrêter ou lancer la séance.

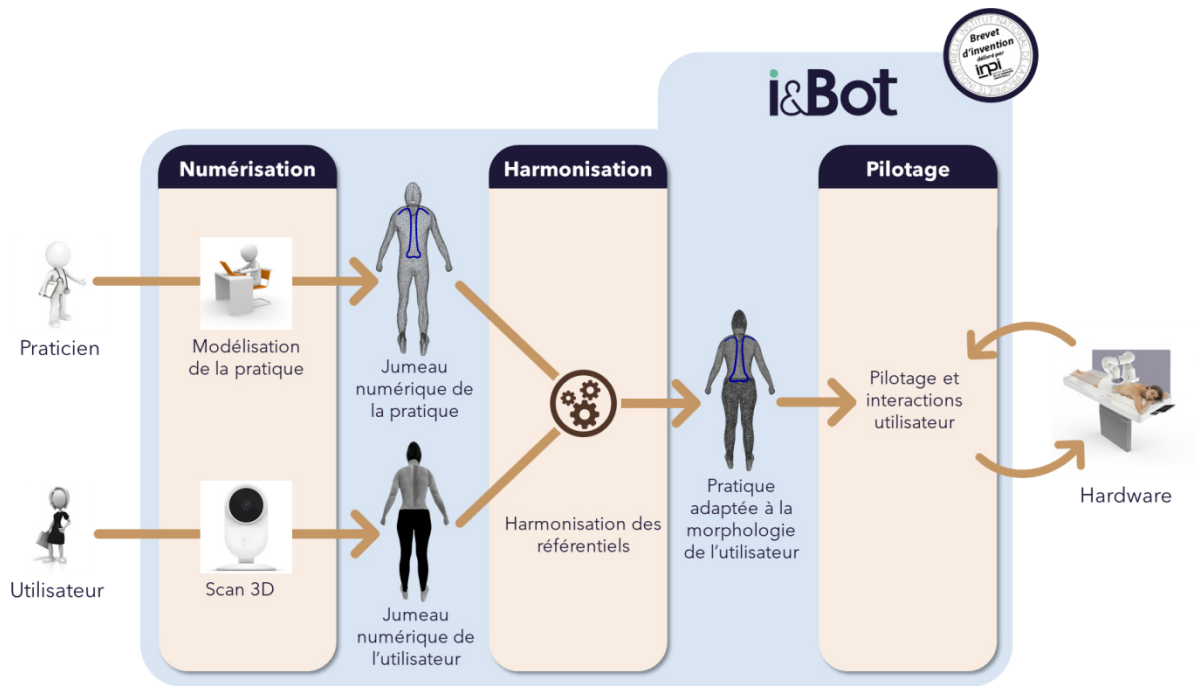
Pour mener une séance de bout en bout, l'application iYU<sup>®</sup> nécessite de piloter le robot en temps réel, en gérant la présence d'un contact direct entre le robot et l'utilisateur. En l'absence de ces consignes, le robot serait incapable d'exécuter le massage. Cette fonction de pilotage nécessite différents modules pour permettre :

- Au praticien de décrire en amont les protocoles et ses paramètres (type de geste, trajectoire, pression, vitesse, inclinaison de la main...),
- Au système de lancer et de recueillir le scan de l'utilisateur,
- Au système d'adapter le protocole choisi à la morphologie de l'utilisateur,
- Au système de piloter le robot pour lui faire réaliser les bons déplacements en suivant le protocole choisi et ses paramètres adaptés à la morphologie,
- Au système de recueillir les données d'interactions pour adapter le pilotage en temps réel.

Toutes ces fonctionnalités ne peuvent être correctement exécutées que grâce à la technologie i&Bot<sup>®</sup> développée par la société Capsix Robotics, qui constitue la base sous-jacente du logiciel d'iYU.

#### **b) La technologie i&Bot<sup>®</sup>**

Pour être en mesure de garantir l'efficacité et la sécurité de la solution, il est nécessaire d'individualiser le massage à chaque morphologie. Le logiciel se repose sur les fonctions de la technologie i&Bot<sup>®</sup> et procède selon trois étapes inhérentes que sont la numérisation, l'harmonisation et le pilotage. Comme la technologie i&Bot<sup>®</sup> ne peut se suffire à elle seule, une interaction continue est nécessaire entre i&Bot<sup>®</sup> et le matériel, via des passerelles de pilotage (Figure 27).



**Figure 27.** Technologie i&Bot® - Capsix Robotics.

*(a) L'étape de numérisation*

Pour reproduire les manœuvres du praticien, il est indispensable de les numériser au préalable. Cette étape complexe consiste à retranscrire l'ensemble du répertoire gestuel du professionnel de soin (le masseur-kinésithérapeute dans le cas d'iYU) sous format numérique. Le praticien dispose d'une interface spécialement conçue à cet effet qui lui offre une visualisation d'un modèle générique de corps humain, ainsi que d'une bibliothèque de gestes composée de gestes métiers (les manœuvres de kinésithérapie dans le cas d'iYU). Le praticien décrit le protocole qu'il souhaite créer par ordonnancement de différents gestes métiers et les situe dans l'espace sur le modèle générique de corps, en ajustant s'il le souhaite leurs paramètres (par exemple vitesse ou pression). En sortie de ce travail, le système dispose d'un jumeau numérique d'une pratique du praticien.

Cette étape demande au praticien, qui dispose d'un savoir-faire, de décrire son expertise de manière théorique, i.e. comme un savoir académique. Cela est particulièrement complexe, puisque cela demande au praticien d'explicitier des connaissances non formulées. Dans le but de simplifier et de s'affranchir de cette tâche chronophage, complexe et source d'erreurs, ce projet de thèse comprenait à l'origine la confection d'un « gant de massage connecté ». Ce prototype devait accueillir des capteurs pour suivre et enregistrer les trajectoires et la force exercée par les mains du praticien au cours du massage en temps réel, afin de reconstruire le protocole réalisé par remontée des données mesurées, et non par description théorique. Malheureusement, pour diverses raisons qui feront l'objet d'un paragraphe plus approfondi dans la discussion générale, ce prototype de gant n'a pu aboutir. En écho à la numérisation de la pratique du praticien, le système scanne la morphologie de l'utilisateur en début de séance en quelques secondes. Nous obtenons donc en sortie de cette étape, d'une part le jumeau numérique d'une pratique du praticien, et d'autre part, le scan d'un utilisateur donné, appelé jumeau numérique de l'utilisateur.

### **(b) *L'harmonisation des référentiels***

Pour adapter les trajectoires (issues du jumeau numérique de la pratique) au corps de chaque participant, i&Bot<sup>®</sup> doit procéder à une harmonisation des référentiels du modèle d'une part, et des corps spécifiques d'autre part. Cette opération consiste à juxtaposer les données du jumeau numérique de la pratique sur le jumeau numérique de l'utilisateur. Les trajectoires numériques décrites par le praticien sont ainsi recalculées en fonction du jumeau numérique de l'utilisateur, et donc de sa morphologie. L'amplitude des trajectoires seront adaptées à la hausse ou à la baisse en fonction de l'envergure des individus. A ce jour, cette étape d'harmonisation des référentiels est semi-automatique, i.e., un opérateur est nécessaire pour vérifier la

correspondance et ajuster manuellement les paramètres d'adaptation à la morphologie si besoin, avant de démarrer le protocole de massage et de passer à la phase de pilotage. Parmi les projets phares de la société Capsix Robotics, la société ambitionne de parvenir à une parfaite automatisation de cette fonctionnalité dans les mois à venir.

### (c) *Le pilotage*

Pour être en mesure de piloter le robot en temps réel et en toutes circonstances, la technologie i&Bot<sup>®</sup> utilise différents modes de communication avec le matériel. En fonction des données enregistrées par le robot et les capteurs de la solution iYU<sup>®</sup>, i&Bot<sup>®</sup> réalise des ajustements permettant de suivre les consignes de force, de vitesse, d'accélération et d'éviter les problèmes de blocage ou de limites d'axe du robot. Plus précisément, i&Bot<sup>®</sup> s'appuie sur une technologie inhérente au contrôleur qui est le pilotage du robot axe par axe. Le robot recherche avant tout l'atteinte d'un point de l'espace cartésien en respectant une pression de contact. Il se régule en fonction de la position effective de la personne avec laquelle il est en contact. Son encodage est réalisé en cartésien avant d'être converti en valeur d'angles pour chaque axe par le contrôleur. Ce type de pilotage à l'effort est complété par certains paramètres comme la redondance du robot (7<sup>e</sup> axe) ou les orientations de la main.

## C. OBJECTIFS

Ce travail de thèse a pour objectif principal la caractérisation du massage manuel, du massage autogène et du massage robotisé et la comparaison des bénéfices psychophysologiques de ces trois types de massages.

1. Nous avons mené deux expérimentations distinctes sur le massage autogène. Une première étude a porté sur l'influence d'un massage autogène intégré à l'entraînement sur les performances sportives et les sensations de récupération. Afin de conduire ces recherches, les évaluations de la puissance musculaire et de la charge de travail furent utilisées en guise de mesures objectives des performances physiques. La mesure de circonférence des cuisses et une échelle numérique de la perception de l'effort compléteront les données. Des échelles numériques permettront de suivre l'intensité des douleurs musculaires à la suite du protocole de fatigue. Monteiro et al. (2017a, 2017b, 2019) ont rapporté une augmentation concomitante de la difficulté de l'effort perçu avec une baisse des capacités de résistance musculaire. Néanmoins, les mesures utilisées ne permettaient pas d'évaluer précisément l'influence négative du massage autogène sur les qualités musculaires et aucune mesure de suivi n'était réalisée pour évaluer l'effet de cette technique sur la récupération. Nous avons donc posé l'hypothèse que le massage autogène intégré dans les périodes inter-essai d'une séance d'entraînement en résistance puisse négativement influencer les qualités de puissance musculaire.

Nous avons ensuite cherché à caractériser l'influence de techniques de massage autogène en pression glissée, axiale ou transversale. Nous avons comparé leurs effets respectifs à ceux de méthodes classiques de pression roulée sur la température cutanée et l'amplitude articulaire du genou, en utilisant une caméra thermique et un goniomètre digital. Pour compléter, des mesures subjectives sous la forme d'échelles numériques ont également été utilisées pour répertorier les sensations physiques des participants. À notre connaissance, et malgré notre revue de littérature approfondie, aucune donnée comparative ne permet de spéculer sur les effets attendus. De ce fait, nous posons l'hypothèse que la technique de pression

glissée, axiale ou transversale, prédispose par un mécanisme de friction supposée, à une augmentation plus importante de la température cutanée et de l'amplitude articulaire du genou.

2. Nous avons élargi nos recherches au domaine du massage manuel afin d'adresser la nature des stratégies motrices que cette pratique engageait pour les participants comparativement au massage autogène. Nous avons comparé les signatures neuronales et l'efficacité du massage autogène et du massage manuel. Nous avons utilisé l'EEG de surface ainsi que la conductance cutanée, témoin de l'équilibre sympathovagal. Une tâche de calcul mental et deux évaluations centimétriques (« sit-and-reach » et « toe touch ») ont servi à évaluer respectivement le niveau de vigilance, la souplesse rachidienne et des muscles de la loge postérieure des jambes des participants. Enfin, pour recueillir leur bien-être perçu nous avons utilisé des échelles numériques. Nous avons postulé que la nature proactive du massage autogène pourrait interférer avec la signature EEG de relaxation. Nous supposons que la mobilisation cognitive et physique lors du massage autogène pourrait provoquer un plus haut niveau de vigilance que le massage manuel. De même, malgré l'absence de données comparatives, nous posons l'hypothèse que ces formes de massage, manuel et autogène, améliorent de manière comparable la souplesse rachidienne. Cette hypothèse repose sur le fait qu'il existe, parmi ces formes de massage, un mécanisme de pression similaire sur les tissus mous.

3. Enfin, pour répondre à l'enjeu principal de ce projet nous avons mené une dernière phase expérimentale. Au cours de cette dernière étude, nous avons tenté d'appréhender les effets d'un massage robotisé et de les comparer à celui d'un masseur-kinésithérapeute expérimenté. Nous nous sommes également intéressés à l'influence de la répétabilité des massages sur les capacités physiques du professionnel. Des méthodologies communes à de

précédentes expérimentations furent employées : mesures de l'activité électrodermale, tâche de calcul mental, mesures centimétriques évaluant la souplesse rachidienne et échelles numériques de sensations perçues. Pour parfaire cette recherche nous avons décidé d'y adjoindre deux questionnaires, le test de BRUMS et le test NASA-TLX. Sur la base des connaissances actuelles, nous postulons que les massages manuels et robotiques ont une influence et des effets comparables au massage manuel réalisé par un professionnel. L'unique étude connue à ce jour, comparant massage manuel et massage robotique, a utilisé un robot standard dont l'application était limitée à une zone réduite (Koga et al., 2008). De ce fait, nous posons l'hypothèse que l'utilisation de cette nouvelle génération de robot, les robots collaboratifs, appliqués sur une zone plus large et associés à des capacités d'interaction avec l'utilisateur, se rapprocheront au plus près des bénéfices obtenus avec un massage manuel conventionnel. En effet, nous supposons que l'ajout d'une télécommande de contrôle comme dans la solution iYU<sup>®</sup> de Capsix Robotics facilitera l'interversion des modes de contrôle proactif et rétroactif au cours du massage robotisé. Nous émettons l'hypothèse qu'un massage prédéfini réalisé par un robot sollicite une nature rétroactive comparable à celle d'un massage manuel. En revanche, nous pensons qu'une intervention volontaire avec la télécommande sur le niveau de pression, aussi minime soit-elle, puisse s'apparenter à la nature proactive d'un massage autogène. De ce fait, nous supposons qu'un tel système de massage robotisé, autonome et interactif est en mesure de faire bénéficier aux utilisateurs une expérience stochastique sensori-motrice.



**CHAPITRE 3 : LE MASSAGE AUTOGÈNE :**  
**INFLUENCE D'UNE PRATIQUE INTÉGRÉE À**  
**L'ENTRAÎNEMENT ET EFFICACITÉ DE**  
**NOUVELLES TECHNIQUES**

## INTRODUCTION

Nos recherches bibliographiques approfondies nous ont conduits à rédiger un article de synthèse permettant de poser les fondements de notre approche conceptuelle. Les chapitres suivants reposent sur la seconde partie de notre travail de thèse, i.e., la présentation de notre volet expérimental. Ces études ont été réalisées en étroite collaboration avec le Laboratoire Interuniversitaire de Biologie de la Motricité (LIBM) de l'Université Claude Bernard Lyon 1 et la société Capsix Robotics (Lyon 7). Depuis Septembre 2017 jusqu'à la fin de la thèse (2021), cette collaboration a abouti à quatre expérimentations avec pour objet d'étude le massage autogène, le massage manuel et/ou le massage robotique. Ce volet expérimental comprenait donc une étude prospective et trois études randomisées contrôlées. Toutes études confondues, les données recueillies comprenaient des évaluations neurophysiologiques, comportementales et psychométriques.

Comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents, la massothérapie est avant tout une pratique manuelle et empirique. Les connaissances scientifiques liées à son application demeurent récentes. En effet, les outils et les appareils de mesures se sont considérablement améliorés au cours du siècle dernier, profitant ainsi de la revalorisation de sa forme autogène et de l'émergence de sa forme robotisée. De ce fait, l'approfondissement de ces connaissances nous paraît utile afin de valoriser la massothérapie dans son ensemble. Nous allons donc nous intéresser dans ce chapitre à l'influence du massage autogène intégré à l'entraînement sur les performances sportives, ainsi qu'à son influence sur la récupération. Ce travail répond au premier sous-objectif expérimental de cette thèse et permet d'appréhender une première perspective quant à l'influence de la nature proactive du massage autogène.

## **ÉTUDE 1**

# **ÉVALUATION DES EFFETS DE LA PRATIQUE D'UN AUTO-MASSAGE INTÉGRÉ SUR LES PERFORMANCES DE FORCE : UN ESSAI PILOTE RANDOMISÉ CROISÉ**

(Kerautret et al., 2021)

## ARTICLE 2:

Evaluating the effects of embedded self-massage practice on strength performance: A randomized crossover pilot trial. Yann Kerautret, Aymeric Guillot and Franck Di Rienzo (2021). PLoS ONE 16(3): e0248031.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0248031>

## CONTRIBUTION DES CO-AUTEURS

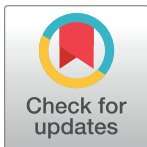
Les co-auteurs de l'étude sont Yann Kerautret, Aymeric Guillot et Franck Di Rienzo. Ce travail de recherche a été mis en place lors de discussion entre Yann Kerautret, Aymeric Guillot et Franck Di Rienzo. Le recueil de données a été réalisé par Yann Kerautret au sein du Club Haltérophile de Vaulx-en-Velin. Le traitement et l'analyse des données ont été menés par Yann Kerautret et Franck Di Rienzo. L'article a été rédigé par Yann Kerautret, puis Aymeric Guillot et Franck Di Rienzo ont effectué diverses corrections et ont fait part de leurs critiques.

## RESEARCH ARTICLE

# Evaluating the effects of embedded self-massage practice on strength performance: A randomized crossover pilot trial

Yann Kerautret<sup>1,2</sup>, Aymeric Guillot<sup>1,3</sup>, Franck Di Rienzo<sup>1\*</sup>

**1** Laboratoire Interuniversitaire de Biologie de la Motricité EA 7424, Université Claude Bernard Lyon 1, Univ Lyon, Villeurbanne Cedex, France, **2** Capsix Robotics, Lyon, France, **3** Institut Universitaire de France, Paris, France

\* [franck.di-rienzo@univ-lyon1.fr](mailto:franck.di-rienzo@univ-lyon1.fr)

## Abstract

### Background

Self-administered massage interventions with a roller massager are commonly used as part of warm-ups and post-workout recovery routines. There is yet no clear consensus regarding the practical guidelines for efficient embedded interventions.

### Objectives

The present randomized crossover pilot trial aimed at examining the effects of a rolling intervention with a roller massager embedded within the rests periods of a resistance training protocol. The rolling intervention targeted quadriceps muscles.

### Setting

Participants (n = 14) performed two resistance training protocols expected to elicit momentary muscle failure. The protocol consisted in 10 sets of 10 rest-pause repetitions of back squats, with a poundage set up at 50% of the maximal one-repetition. Two min were allocated to recovery between sets. During the recovery periods, participants completed a rolling routine with a roller massager for 60 s (ROLLER-MASSAGER), or underwent passive recovery (CONTROL). The total workload, concentric power, thigh circumference rate of perceived exertion (RPE) and delayed onset of muscle soreness (DOMS) from 24 h to 120 h after completion of the protocol were the dependent variables.

### Results

ROLLER-MASSAGER was associated with a reduction in total workload (-11.6%), concentric power (-5.1%) and an increase in perceived exertion compared to CONTROL ( $p < 0.05$ ). ROLLER-MASSAGER was also associated with reduced thigh circumference after the resistance training protocol, indicating reduced muscle swelling, and reduced DOMS 24 h to 120 h post-workout ( $p < 0.001$ ).

## OPEN ACCESS

**Citation:** Kerautret Y, Guillot A, Di Rienzo F (2021) Evaluating the effects of embedded self-massage practice on strength performance: A randomized crossover pilot trial. PLoS ONE 16(3): e0248031. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0248031>

**Editor:** Hugo A. Kerhervé, Univ Rennes, FRANCE

**Received:** November 10, 2020

**Accepted:** February 17, 2021

**Published:** March 2, 2021

**Peer Review History:** PLOS recognizes the benefits of transparency in the peer review process; therefore, we enable the publication of all of the content of peer review and author responses alongside final, published articles. The editorial history of this article is available here: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0248031>

**Copyright:** © 2021 Kerautret et al. This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

**Data Availability Statement:** All relevant data are within the paper and its [Supporting Information](#) files.

**Funding:** The authors received no specific funding for this work. CAPSIX robotics, a commercial company, provided support in the form of salaries

for one of the authors (YK), but did not have any additional role in the study design, data collection and analysis, decision to publish, or preparation of the manuscript. The specific roles of all co-authors are articulated in the 'author contributions' section.

**Competing interests:** The authors declare no conflict of interest. The commercial affiliation to CAPSIX Robotics does not alter authors' adherence to all PLOS ONE policies on sharing data and materials. CAPSIX Robotics is not a company promoting self-myofascial release or conditioning products.

## Conclusion

These findings support that embedded rolling with a roller massager hinders performance and increases effort perception. Embedded interventions may not be suitable during conditioning periods designed to maximize training intensity.

## Introduction

Rolling techniques consist of self-stimulation of the soft tissues with a foam roller, a roller massager, sticks or balls of varying sizes, surfaces and densities [1–5]. SMR represents a simple and cost-effective conditioning approach, increasingly used as part of warm-up and post-workout recovery routines and, occasionally, embedded within training sessions [6–9]. Although physiological processes underlying the benefits of SMR remain poorly understood, SMR interventions have practical relevance in actual training contexts compared to static stretching [1, 10–14]. Pre-workout SMR interventions were associated with increased range of motion (ROM) without hindering forthcoming athletic performances such as jump height or performance across repeated sprints [15–17]. Post-workout, SMR reduced exercise-induced muscle damage indexed from the delayed-onset muscle soreness (DOMS) [18]. However, there is no scientific consensus regarding optimal practice guidelines for embedded SMR and its acute effects on strength performance [6, 8, 9, 12, 14].

Over the last decade, SMR has become increasingly popular in fitness communities. CrossFit® athletes (CrossFit, Inc, Washington, DC, USA), for instance, regularly use SMR as part of their training routines to improve joint mobility [11, 19]. Athletes are in control of the pressure, speed, frequency and other fine adjustments when performing SMR routines, which might account for their popularity. While SMR is frequently used as part of the warm-up or post-workout recovery routines, only few studies evaluated its efficacy when embedded to the actual course of physical training, i.e. performed during the recovery periods of a training session. Monteiro and Neto [6] reported a deleterious effect of SMR with a grid foam roller on strength performance and a corollary increased in the rate of perceived exertion (RPE). The embedded SMR practice with a grid foam roller of agonist muscles impaired performance of both agonist and antagonist muscles in a resistance training paradigm, and these effects were more pronounced after 120 s compared to 60 s of SMR [8, 9, 20]. These results challenge the assumption that embedded SMR practice could be beneficial to strength performance in resistance training paradigms. This is somehow surprising considering that the mechanical and neurophysiological effects of SMR could suggest beneficial effects on strength performance. SMR has been shown to increase muscle compliance to the effort by affecting the mechanical properties of contractile tissues, and promote lactate clearance [6, 8, 9]. Monteiro et al. [9] postulated on an endogenous opioid response. This response would bias effort perception by attenuating afferent feedback to the central nervous system from the somatic effectors. Increased power output due to the downregulation of noxious afferent feedback would delay fatigability. The authors also hypothesized that SMR yielded additional cognitive and physical demands that might increase fatigability during the resistance training protocol. Due to the scarcity of available experimental data and contradictory findings with regards to the benefits of SMR decoupled or embedded within the training practice, further investigation of SMR interventions in strength training paradigms is required. Here, we administered a SMR intervention with a roller massager, targeting quadriceps muscles, during the inter-set periods of a resistance training protocol in advanced CrossFit® athletes. Based on Monteiro and Neto [6],

we hypothesized that embedded SMR with a roller massager would reduce the strength performance. We were also interested in the influence of embedded SMR with a roller massage on the perceived exertion and DOMS up to 120 h after the completion of the resistance training protocol. Overall, we aimed at extending current knowledge regarding embedded SMR intervention in applied training settings.

## Materials and methods

### Participants

Fourteen healthy physically active (8 males and 6 females, mean age  $25.9 \pm 2.6$ ) adults volunteered to participate in the present randomized crossover pilot trial (Table 1). Recruitment strategies consisted in poster advertising and personal contact between Crossfit® coaches and practitioners. Inclusion criteria were the regular practice of SMR with a roller massager (10 min routines, 2–3 times per week, over the past 6 months) and the regular practice of Crossfit®. We requested a minimum experience of one year in weightlifting practice (2–3 training sessions of > 45 min per week), ensuring steady baseline performances in back squat practice. Our sample was thus representative of amateur CrossFit athletes dedicated to a regular practice on a weekly basis. All participants were right-legged, as revealed by their self-reported leg dominance and scores on the Waterloo Footedness Questionnaire-Revised [21]. Participants were free from medical conditions, including functional limitations which could have confounded results. The experiment was approved by the local ethics committee (Human subject research—human participants; Comité de Protection des Personnes Ouest VI; CPP—Ouest 6—CPP 1223 HPS2). A written form of consent was obtained (2019-A01732-55), in accordance with the ethical standards laid down in the Declaration of Helsinki and its later amendments [22].

### Experimental design

The experiment was scheduled within a span of 30 consecutive days. The experimental design involved a familiarization session, followed by two experimental sessions separated by 10 consecutive days. Participants were instructed to not engage in any strenuous resistance training exercises between the familiarization and the experimental sessions. Since few consecutive days without proper stimulation could downregulate strength performance [23], participants were allowed to maintain their regular practice of weightlifting at maintenance levels. Also, the use of a crossover design controlling for experimental sessions order (using block randomization, see below) was expected to control for potential changes in strength performance between the two experimental sessions [23].

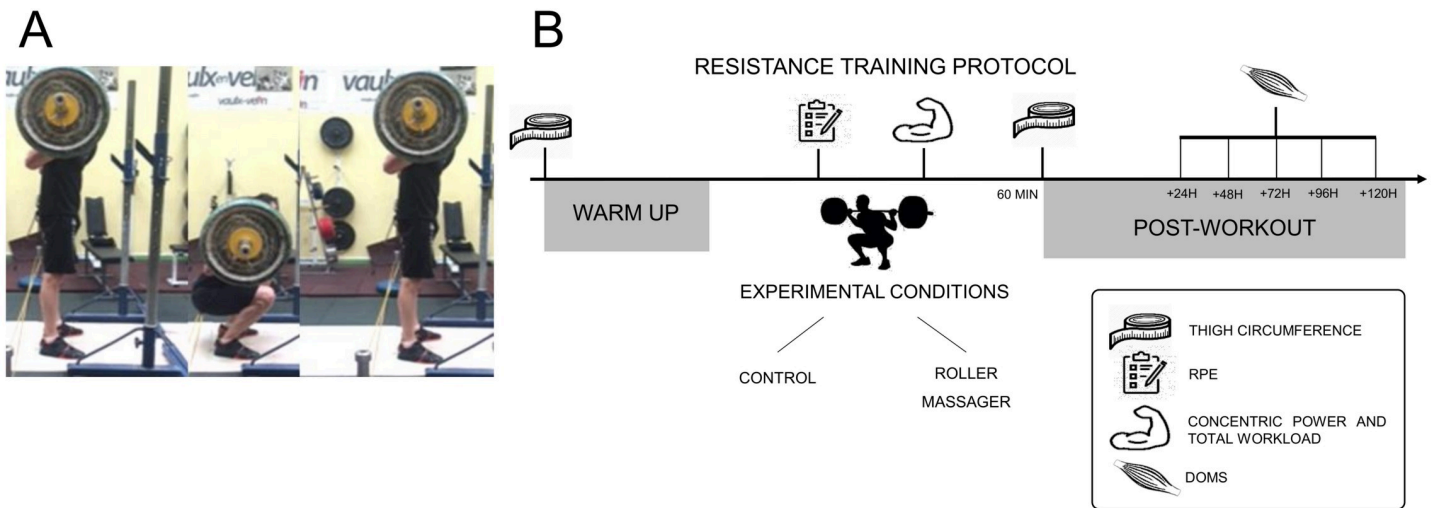
**Familiarization session.** The familiarization session took place 7 days before the first experimental session, and was used to collect demographics (Table 1). Participants completed

**Table 1. Participants' characteristics by sex (M  $\pm$  SD).**

Characteristics	Age (years)	Height (cm)	Mass (kg)	Body mass index (m <sup>2</sup> /kg)	Weightlifting experience (months)	1RM back squat (kg)
Males	26.5 $\pm$ 1.7 (range 24–29)	177.8 $\pm$ 5.8 (range 170–187)	76.3 $\pm$ 10.2 (range 58–95)	24.0 $\pm$ 1.8 (range 20.1–27.2)	17.8 $\pm$ 7.7 (range 12–36)	139.8 $\pm$ 23.6 (range 110–178)
Females	25.2 $\pm$ 2.6 (range 23–30)	167.7 $\pm$ 4.6 (range 162–175)	61.8 $\pm$ 5.9 (range 53–68)	21.9 $\pm$ 1.2 (range 20.2–23.5)	15.7 $\pm$ 4.5 (range 12–24)	99.8 $\pm$ 10.2 (range 90–114)
Group difference (1-way ANOVA)	F(1, 12) = 1.38, p = 0.026	F(1, 12) = 12.42, p < 0.01	F(1, 12) = 9.49, p < 0.01	F(1, 12) = 5.36, p < 0.05	F(1, 12) = 0.34, p = 0.57	F(1, 12) = 14.80, p < 0.01

There were no adverse events and no subjects withdrew during data collection.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0248031.t001>



**Fig 1. Back squat movement.** A. Execution stages of the back squat. B. Flowchart summarizing the experimental protocol.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0248031.g001>

a warm-up routine consisting in 5 minutes of self-paced skipping ropes, followed by 5 minutes of dynamic stretching aiming at improving joint mobility. Then, back squat practice was administered. First, we controlled feet's position with an empty weightlifting bar, i.e. feet distance and foot opening, and the distance between the buttocks and the ground in the deep squat position (after the eccentric phase). Each participant was asked to perform a maximum deep squat with an empty barbell, respecting the technical rules of the International Powerlifting Federation "the lifter must bend the knees and lower the body until the top surface of the legs at the hip joint is lower than the top of the knees" [24]. Once the depth was reached, the distance was materialized with an elastic band, parallel to the ground to guarantee the interindividual reproducibility of each repetition over the two sessions. Participants then completed back squats with incremental poundage, up to their maximal 3–5 repetition (3–5 RM). The 3–5 RM was reported to Berger's table to provide an indirect estimate of the 1RM [25, 26]. Participants were required to achieve contact between the buttocks and the elastic band for each squat repetition (Fig 1A).

The last part of the familiarization consisted in SMR practice with a high-density roller massager. We used a commercial roller massager made from hard plastic (MSGT01, Physio-room, Halifax, England, 45 cm). The experimenter first demonstrated and verbalized instructions regarding tempo, level of pressure and SMR duration for each massage zone. The routine focused quadriceps muscles. Participants were instructed to perform the routine with the roller massager so that the perceived pain would not exceed a 7 out of 10 threshold on the Numeric Pain Scale (0: "No pain", 10: "Most pain") [4, 27]. This subjective control is widely used in SMR experiments [28–30].

**Experimental sessions.** For the first experimental session, participants were randomly allocated to one of the following two experimental conditions over an inclusion period of 4 weeks between March to May 2016. Experimental sessions were scheduled between 4 and 6 pm. All subjects underwent pretest measures, followed by the intervention, and then immediate posttest measures. The investigator was blinded to the condition assignment but remained the same throughout the study to ensure reproducibility of the measures. No feedback was provide to the participants until after completion of the design.



**Resistance training protocol.** After a standardized warm-up, participants engaged in 10 sets of 10 back squat repetitions with a poundage set up at 50% of the individual 1 RM estimate (Fig 1B). 2 min were allocated to recovery between sets. Back squats were performed using a tempo of “2111” (2 s allocated to the eccentric phase, 1 s of pause in deep squat position, 1 s for the concentric phase, and 1 s of pause between repetitions). The rest-pause tempo represents a dramatic increase in task difficulty and likelihood to elicit momentary muscle failure. An auditory device cued the tempo. When the participant was no longer able to follow the tempo or reached momentary muscle failure, the experimenter stopped the protocol. This protocol aimed at reproducing training patterns targeting muscle hypertrophy. Approaching momentary muscle failure is a reliable method to increase motor units recruitment, elicit myofibrillar damage and prompt anabolic endocrine responses necessary for muscle growth [31].

**Experimental conditions.** Experimental conditions were administered during the inter-set periods allocated to recovery. During CONTROL, participants were asked to remain passive in a comfortable seated position. During ROLLER MASSAGER, participants kept one leg semi-stretched to relax quadriceps muscles. Then, they completed the SMR routine, for both legs alternately. Participants foam rolled the quadriceps in the proximal-distal axis, (from the anterior superior iliac spine to the top of patella), at a pace of 15 beats per minute. Each zone of the quadriceps, i.e. medial, lateral and external, was massaged for 10 s. This represents an effective SMR duration of 30 s. The standards for the present SMR routine matched those reported in previous experiments [32–36].

## Dependent variables

**Behavioural variables.** *Total workload.* The total workload corresponded to the total poundage lifted by the participant throughout the entire protocol. The number of repetitions until momentary muscle failure, from both complete and incomplete sets were collected using a hand-held mechanical counter. The total workload was then calculated based on the following formula:

$$\text{Total workload} = \text{Total repetition number} * \text{Workload (50\% of 1RM estimate)}$$

To control the correct execution of the back squats, i.e. contact with the elastic band for each rest-pause repetition, a Go Pro camera was installed on a tripod (Hero 4 Black, GoPro, San Mateo, United States, 720 pixels, 120 frames per second). Video recordings of the repetitions were analyzed offline using Kinovea 0.8.15 (Kinovea project, France).

**Concentric power.** To evaluate the average concentric power an accelerometer was attached to the weightlifting bar using velcro (Myotest PRO, Sion, Switzerland, 250 Hz). The concentric power developed for each repetition was obtained using Myotest PRO algorithms and averaged across sets. The experimenter ensured that the device remained vertical during the sets to prevent artifacts.

**Thigh circumference.** Thighs circumference was collected before and after the resistance training protocol using a meter ruler 15 cm above the top of the patella, avoiding deformation of the skin. Measuring thigh circumference 15 cm above the patella represents a well-acknowledged methodological standard [37, 38]. To replicate the assessment, participants were marked with permanent marker. All evaluations were determined to the nearest 0.1 cm.

**Psychometric variables.** *Rate of perceived exertion.* After each set, participants were reported their RPE on a Borg’s category-ratio scale (CR-10; 0: “Nothing at all”, 10: “Extremely strong”) [39, 40].

**Delayed onset of muscle soreness.** DOMS measures involved five visual analog scales of 10 cm (0: “No pain”; 10: “Very severe pain”) [41], corresponding to five muscle groups (i.e.

quadriceps, hamstrings, adductors, gluteus, erector spinae), for both legs. DOMS measures were collected before and after the resistance training protocol, and 24 h, 48 h, 72 h, 96 h and 120 h after its completion.

## Statistical analyses

**Block randomization.** We used R [42] and the package *blockrand* to achieve participant's conditions (block randomization) [43]. We assigned the order of the two experimental conditions (i.e. ROLLER MASSAGER first or CONTROL first). *Blockrand* allows block randomization with random block size selection to prevent randomization bias [44]. The randomization procedure was completed in two block for males ( $n = 6$  and  $n = 2$ , respectively), and one block for women ( $n = 6$ ).

**Data analysis.** We first tested the effect of CONDITION (Roller massager, Control) on total workload using a paired t-test. We then ran a series of linear mixed effects analyses using *nlme* [45]. Visual inspection of residual plots did not reveal any obvious deviations from homoscedasticity or normality [46]. For the analysis of the total workload, number of sets and number of repetitions per set, we included the fixed effect of CONDITION (ROLLER MASSAGER, CONTROL). For the concentric power and RPE scores we added the fixed effect of and SET (numeric regressor, 1–10), with interaction term. For thigh circumference, we entered CONDITION, LATERALITY (LEFT, RIGHT) and TEST (PRETEST, POSTEST), with interaction terms. For DOMS ratings, we entered the interaction between CONDITION and TEST, MUSCLE (QUADRICEPS, HAMSTRINGS, ADDUCTORS, GLUTEUS, ERECTOR SPINAE) and TIME (numeric regressor, i.e. time delay in hour after completion of the resistance training protocol) without interaction terms. The statistical significance threshold was set up for a type 1 error rate of 5%. As effect sizes, we calculated partial coefficients of determination ( $R_p^2$ ) using an ad-hoc procedure for linear mixed effects models implemented in the *effect size* package [47]. Main effects and interactions were investigated using general linear hypotheses testing of planned contrasts from the *multcomp* package. We applied Holm's sequential corrections to control the false discovery rate [48].

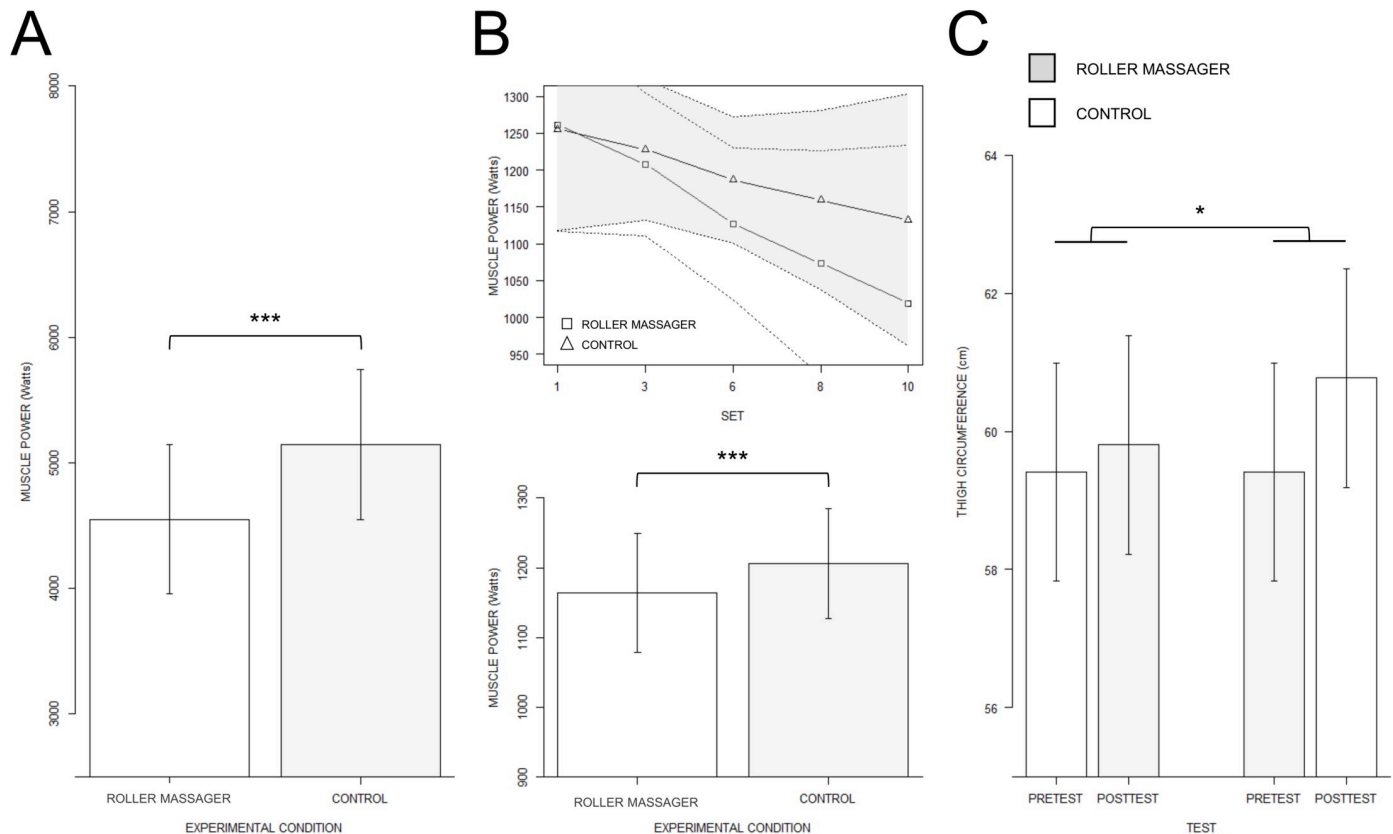
**Power/Sample size considerations.** Considering the pilot nature of the study, we did not run a priori power calculation. Implementing a counterbalanced cross-over design with block randomization was expected to increase the statistical power compared to between-subject group designs. We thus ran a posteriori power ( $p_{1-\beta}$ ) calculations using the *pwr* package [49] for statistically significant main and interaction effects revealed by the linear mixed effects analysis.

## Results

### Behavioral data

**Momentary muscle failure.** All participants reached momentary muscle failure during ROLLER MASSAGER. Ten participants reached momentary muscle failure during CONTROL. CONDITION affected the total workload ( $F(1, 13) = 13.68$ ,  $R_p^2 = 0.51$ ,  $p < 0.01$ ,  $p_{1-\beta} = 0.72$ ).

**Total workload.** Participants achieved a total workload of  $4549.21 \text{ kg} \pm 1123.88$  during ROLLER MASSAGER, and  $5146.29 \pm 1046.53$  during CONTROL. CONDITION also affected the number of set ( $F(1, 13) = 9.75$ ,  $R_p^2 = 0.43$ ,  $p < 0.01$ ,  $p_{1-\beta} = 0.65$ ). Participants achieved  $8.0 \pm 2.07$  ( $M \pm SD$ ) sets during ROLLER MASSAGER and  $8.85 \pm 1.75$  sets during CONTROL. However, there was no CONDITION effect for the average number of repetitions per set ( $F(1, 13) = 1.59$ ,  $p = 0.22$ ), with respectively  $9.59 \pm 0.21$  and  $9.71 \pm 0.34$  repetitions per set for the ROLLER MASSAGER and CONTROL conditions.



**Fig 2. Mean muscle power and thigh circumference.** A. Barplot depicting fitted estimates for the main effect of EXPERIMENTAL CONDITION on concentric power. B. Regression slopes depicting the SET by CONDITION interaction revealed by the linear mixed effects analysis carried on muscle power. C. Barplot display of the TEST by CONDITION interaction effect on thigh circumference. \*\*\*  $p < 0.001$ , \*  $p < 0.01$ .

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0248031.g002>

**Concentric power.** The linear mixed effect analysis carried on concentric power data revealed no CONDITION by SET interaction ( $p > 0.05$ ). However, there was a main effect of CONDITION ( $F(1,191) = 8.09$ ,  $p < 0.01$ ,  $R_p^2 = 0.05$ ,  $p_{1-\beta} = 0.87$ ) and SET ( $F(1, 191) = 35.75$ ,  $p < 0.001$ ,  $R_p^2 = 0.16$ ,  $p_{1-\beta} > 0.95$ ). During CONTROL ( $1106.45 \text{ W} \pm 277.54$ ), concentric power values were higher compared to those recorded during ROLLER MASSAGER ( $1049.71 \text{ W} \pm 240.46$ ) (fitted difference:  $66.57 \pm 19.29$ ,  $p < 0.001$ , see Fig 2A). SET values negatively affected concentric power output irrespective of the experimental condition (fitted estimate:  $-23.02 \text{ W} \pm 3.88$ ,  $p < 0.001$ , see Fig 2B).

**Thigh circumference.** There was a CONDITION by TEST interaction effect on thigh circumference ( $F(1,91) = 33.63$ ,  $p < 0.001$ ,  $R_p^2 = 0.27$ ,  $p_{1-\beta} > 0.95$ ), while all other interactions did not reach the statistical significance threshold (all  $p > 0.05$ ). Thigh circumference was also affected by the main effects of CONDITION ( $F(1, 91) = 33.63$ ,  $p < 0.001$ ,  $R_p^2 = 0.27$ ,  $p_{1-\beta} > 0.92$ ), TEST ( $F(1, 91) = 110.40$ ,  $p < 0.001$ ,  $R_p^2 = 0.55$ ,  $p_{1-\beta} > 0.95$ ) and LATERALITY ( $F(1, 91) = 9.10$ ,  $p < 0.01$ ,  $R_p^2 = 0.03$ ,  $p_{1-\beta} = 0.40$ ). Post-hoc investigations revealed that the PRETEST ( $59.41 \text{ cm} \pm 4.09$ ) to POSTTEST ( $60.77 \text{ cm} \pm 4.19$ ) difference in thigh circumference during the CONTROL condition was greater than the PRETEST ( $59.41 \text{ cm} \pm 4.09$ ) between POSTTEST ( $59.80 \text{ cm} \pm 4.20$ ) difference recorded in the ROLLER MASSAGER condition (fitted difference:  $0.39 \text{ cm} \pm 0.20$ ,  $p = 0.05$ , see Fig 2C). Also, thigh circumference was affected by the main effect of

LATERALITY, with lower values for the LEFT thigh ( $59.72 \text{ cm} \pm 4.23$ ) compared to the RIGHT thigh ( $59.97 \text{ cm} \pm 4.05$ ) (fitted difference:  $-0.25 \text{ cm} \pm 0.08$ ,  $p < 0.01$ ).

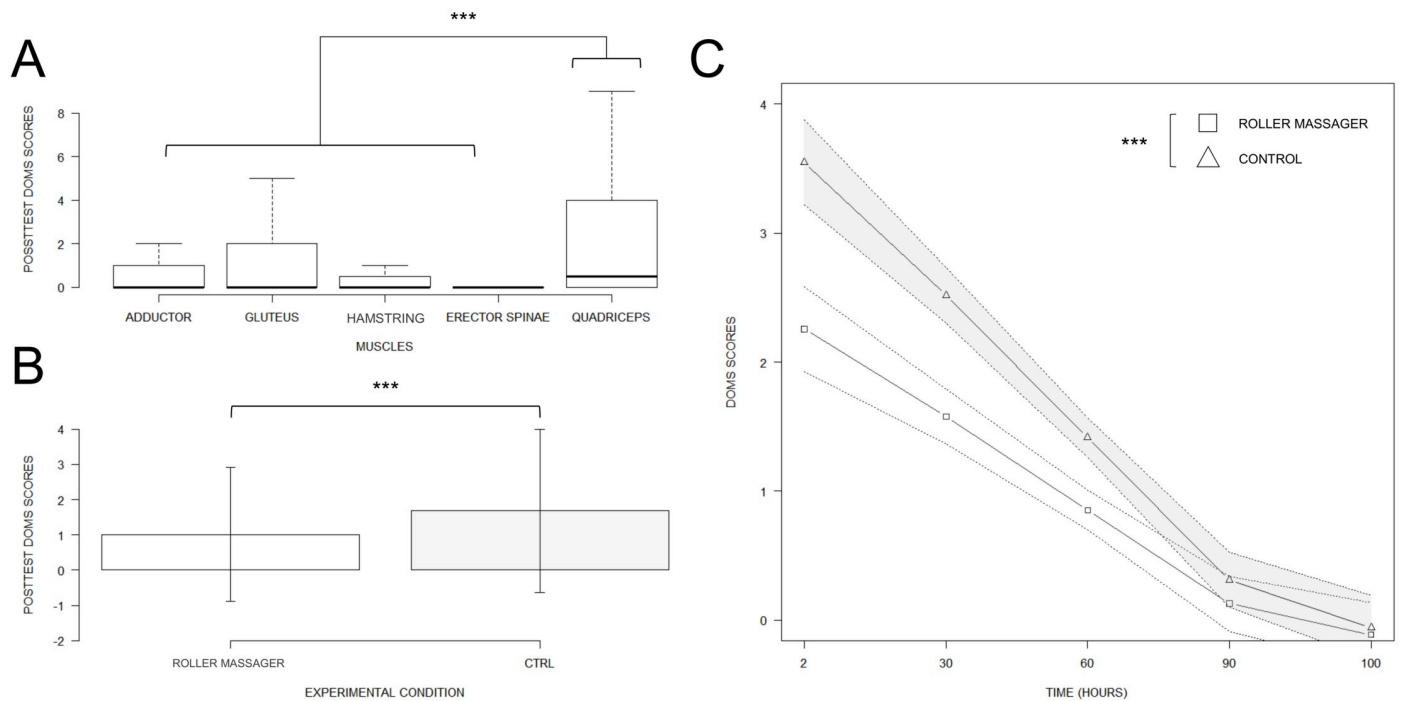
### Analysis of the psychometric data

**RPE data.** The CONDITION by SET interaction failed to reach the statistical significance threshold ( $p > 0.05$ ). RPE scores were however affected by the main effects of CONDITION ( $F(1, 219) = 4.59$ ,  $p < 0.05$ ,  $R_p^2 = 0.03$ ,  $p_{1-\beta} = 0.72$ ) and SET ( $F(1, 219) = 1016.06$ ,  $p < 0.001$ ,  $R_p^2 = 0.82$ ,  $p_{1-\beta} > 0.95$ ). Post-hoc investigations revealed that RPE scores during the CONTROL ( $5.85 \pm 2.60$ ) condition were lower compared to that observed in the ROLLER MASSAGER ( $6.07 \pm 2.60$ ) condition (fitted difference:  $-0.63 \pm 0.14$ ,  $p < 0.001$ ). In both conditions, an increase in the RPE along with SETS repetition (fitted estimate:  $0.84 \pm 0.03$ ,  $p < 0.001$ ).

**DOMS data.** DOMS self-reports on the visual scales were affected by the two-way interaction between CONDITION and TEST ( $F(1, 813) = 6.15$ ,  $p < 0.01$ ,  $R_p^2 = 0.02$ ,  $p_{1-\beta} > 0.95$ ). We also found a CONDITION by TIME interaction ( $F(1, 813) = 15.13$ ,  $p < 0.001$ ,  $R_p^2 = 0.02$ ,  $p_{1-\beta} > 0.95$ ), while the CONDITION by MUSCLE interaction failed to reach the statistical significance threshold ( $F(4, 813) = 2.36$ ,  $p = 0.06$ ). Eventually, DOMS were affected by the main effects of CONDITION ( $F(1, 813) = 30.73$ ,  $p < 0.001$ ,  $R_p^2 = 0.04$ ,  $p_{1-\beta} > 0.95$ ), TEST ( $F(1, 813) = 100.00$ ,  $p < 0.001$ ,  $R_p^2 = 0.11$ ,  $p_{1-\beta} > 0.95$ ), MUSCLE ( $F(4, 813) = 22.86$ ,  $p < 0.001$ ,  $R_p^2 = 0.10$ ,  $p_{1-\beta} > 0.95$ ) and TIME ( $F(1, 813) = 353.03$ ,  $p < 0.001$ ,  $R_p^2 = 0.30$ ,  $p_{1-\beta} > 0.95$ , see Fig 3A–3C). Post-hoc analyses revealed that DOMS ratings difference between the PRETEST ( $0.00 \pm 0.00$ ) and the POSTTEST ( $1.68 \pm 2.31$ ) during CONTROL was higher compared to the difference between the PRETEST ( $0.00 \pm 0.00$ ) and the POSTTEST ( $1.01 \pm 1.89$ ) in ROLLER MASSAGER (fitted difference:  $1.55 \pm 0.35$ ,  $p < 0.001$ ). Post-hoc analyses also revealed that the difference between CONTROL ( $0.89 \pm 1.76$ ) and ROLLER MASSAGER ( $0.79 \pm 1.82$ ) (fitted difference:  $0.8 \pm 0.22$ ,  $p > 0.001$ ) reported for the ERECTOR SPINAE was marginally lower than the difference between CONTROL ( $1.76 \pm 2.39$ ) and ROLLER MASSAGER ( $0.71 \pm 1.59$ ) (fitted difference:  $-0.87 \pm 0.22$ ,  $p < 0.01$ ) reported in the ADDUCTORS (fitted difference:  $0.86 \pm 0.22$ ,  $p < 0.01$ ). Finally, we found that TIME had a greater negative relationship on DOMS ratings during CONTROL (fitted estimate:  $-0.03 \text{ a.u./h} \pm 0.00$ ) compared to ROLLER MASSAGER (fitted estimate:  $-0.02 \text{ a.u./h} \pm 0.00$ ) (fitted difference:  $0.01 \pm 0.00$ ,  $p < 0.001$ ).

### Discussion

The aim of this pilot trial was to investigate whether a SMR routine with a roller massager administered during inter-sets periods of a resistance training protocol improved behavioral and psychometric indexes of strength performance. The total workload at the session level was reduced by 13.1% under the SMR condition. We also found increased perceived exertion and decreased concentric power by 5.4% per set compared to the control condition. Embedded SMR thus appeared counterproductive for athletes during preparation periods where intensity is crucial to achieve peak performance. Indeed, compared to a passive recovery condition, embedded SMR appeared to induce greater fatigability. While we also observed that embedded SMR practice was associated with reduced muscle swelling and soreness up to 120 h after completion of the resistance training protocol, this occurred at the expense of the training workload. These results overall corroborate past experiments underlining the detrimental effect of embedded SMR practice on strength performance [8, 9]. Noteworthy, it is well-established that training effects such as somatic build and recovery capacities and other factors differ between men and women [50, 51]. Here, our pilot design did not control for the effect of sex. Indeed, our sample involved both males and females. While a main effect of sex can be expected in terms of training effects, little evidence suggests at this point potential interactions



**Fig 3. DOMS intensity by muscle / condition, and its evolution over time.** A. Boxplot of general DOMS ratings. B. Barplot display of the main CONDITION effect on DOMS. C. Regression slopes attesting the TIME by CONDITION interaction effect on DOMS scores revealed by the linear mixed effects analysis. \*\*\*  $p < 0.001$ .

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0248031.g003>

with the effect of massage intervention [13, 52, 53]. Addressing these issue certainly goes beyond the intent of this pilot trial, and would require methodological designs involving larger samples of participants.

The control condition consisted of passive recovery. This reproduced actual training conditions where athletes usually remain passive between the sets of their strength training sessions, hence providing ecological validity [54]. SMR yielded reduced total workload, concentric power and increased perceived exertion at the session level. This finding corroborates earlier reports of adverse effects of embedded SMR on strength performance in resistance training paradigms [6, 8, 9, 20]. Also, embedded SMR does not enhance the subjective perception of recovery [20]. After a series of knee extensions up to momentary muscle failure, 60 s or 120 s of SMR interventions on the quadriceps appeared counterproductive to restore strength performance [8]. Similar results were obtained when massaging the hamstring [6, 9]. Further, there was a dose-response relationship between SMR duration and the deleterious effects on performance [6, 8, 9], since the total workload decreased along with time spent on the SMR routine [8, 9]. While the use of SMR as part of warm-up or recovery routines does not alter muscle contractile properties [55, 56], this does not seem to apply to embedded interventions [28, 30, 57, 58]. The decreased physical performance along with increased perceived exertion under the SMR condition indicate greater fatigability [8]. SMR is a self-administered technique requiring additional cognitive and physical resources compared to passive recovery. This could emphasize fatigability elicited by the resistance training protocol, and/or interfere with recovery processes [59]. SMR has been shown to amplify structural damage to the muscles, e.g. micro-damage to the muscles altering their short-term contractile properties [60–63]. Compared to manual therapy, where pressure values are up to five-fold weaker [61, 64], SMR with a

roller massager can induce additional strain on the muscle tissues compounding with that elicited by the resistance training protocol [60, 61, 65]. It must be objected that pressure above physiological thresholds are required to induce mechanical changes, as emphasized in mathematical models carried on manual massage therapy interventions and experiments where the pressures of roller massaging were controlled [65, 66].

Thigh circumference was reduced during the posttest under the SMR condition. Muscle swelling increase was 0.97 cm (+348.71%) higher during the control condition. This might reflect the reduced total workload under the SMR condition. An important limitation is that we did not consider the measurement error for thigh circumference measures. There is thus a risk for a lack of meaningful difference in spite of statistical differences (see [8]). Indeed, the differences between pretest and posttest measures remained below the 5% range. While not surprising at the single-session level, this remains below the 5% threshold suggested as rule of thumb for the measurement error of waist circumference [67]. As a counterpoint, thigh circumference measurements were conducted by the same experimenter. This indicates that the distribution of the error across tests and experimental conditions remained homogenous. Unilateral and systematic deviations within the measurement error range would have been required to bias the results pattern. While this cannot be ruled out, the pattern of results appeared congruent with that revealed by the other dependent variables. More speculatively, the pressure levels exerted during the embedded SMR could have affected blood circulation, hence limiting muscle swelling [68–71]. By contrast, SMR post-workout did not improve muscle swelling or joint mobility or blood inflammatory markers 24 h and 48 h after a high-volume resistance training protocol in a recent experiment (10 sets of 10 repetition of back squat at 60% of the 1RM) [71]. There is also evidence supporting that the mechanical pressure elicited by the roller massager exerts blood and lymphatic drainage [72–76]. Past reports also indicate improvements in blood circulation after SMR [72–76], with improved oxygen saturation, endothelial function and lactate clearance [76–78]. While reduced muscle swelling may primarily account here for the reduced total workload under the SMR condition, we cannot rule out a possible effect on blood and lymphatic circulation. Addressing this hypothesis would require controlling the workload between SMR and control conditions.

DOMS scores were null during the pretests, indicating the lack of muscle damage, and therefore a complete recovery from one experimental session to another [79]. Muscle soreness increased from the pretest to the posttest for both conditions, hence attesting muscle inflammation [80]. The quadriceps was sorer than erector spinae, hamstring and adductors muscles. This is congruent with the nature of the movement and the imposed tempo. Compared to the low-bar squat, the back squat places a greater demand on quadriceps muscles due to a more upright trunk position [81–83]. The tempo required participants to control the eccentric phase and pause in a deep squat position. This unusual focus on eccentric and isometric phases elicits greater muscle damage [84, 85]. The between-conditions difference in the adductors DOMS was greater than that recorded for the erector spinae. Erector spinae muscles are primarily stabilizers during back squats [86]. Participants were trained and familiarized with the back squat, and their muscles accustomed to the isometric contraction regimen. The difference in adductor scores between conditions can be explained by the role of these muscles during back squat repetitions [87]. During the concentric phase of a back squat, hip adduction and internal rotation assist the hip extension [88]. Hence, the deleterious effects of SMR on quadriceps strength may have exacerbated the demands for adductors contraction. Muscle soreness was, irrespective of the muscle group, 0.67 points (66.3%) higher from pre-test to post-test under the control condition compared to SMR. As for reduced muscle swelling, this may primarily originate from the reduced total workload and concentric power under the SMR condition.

One might object that similar to SMR post-workout [15, 89], embedded SMR with a roller massager could have preventive effects on muscle damage.

Psychobiological frameworks conceptualize perceived fatigability as an increase in perceived exertion corollary of psychophysiological changes elicited by exercise [59, 90, 91]. Performance fatigability is typically associated with a decline in performance along with effort repetition [59, 92–94]. Concentric power decreased along with sets repetition. There was also an increase in perceived exertion across sets. For both variables, the slopes were similar between experimental conditions, attesting a decline of 23.02 W (-5.1%) in concentric power and an increase in perceived exertion of 0.84 arbitrary units (+3.6%) across sets. These findings demonstrate that SMR during the inter-set recovery periods of the resistance training protocol had no effect on the behavioral and psychophysical markers. It has previously been shown that SMR reduced muscle soreness resulting from exercise-induced muscle damage [15, 71, 80, 89, 95]. We measured reduced muscle soreness up to 120 h after completion of the resistance training protocol under the SMR condition. But this cannot be attributed to beneficial effects of SMR on exercise-induced muscle damage since, again, this could result from reduced total workload and concentric power under the SMR condition.

As with all research, several methodological limitations should be addressed. First, the investigation involved a limited small sample size, presumably due to restrictive inclusion criteria. The present pilot trial should be considered a very pilot trial, which precludes generalization of the findings to a larger population of athletes using SMR with a roller massage on a regular basis. Second, we did not implement objective monitoring of the pressures exerted by athletes on their soft tissues when performing SMR with the foam roller. This was primarily due to feasibility reasons. Some authors used a force platform to index pressures applied using foam rolling (with the foam roller on the floor) relative the individual body weight, but could not quantify the contact surface indicative of pressures relative a given pressure area [56, 96]. Such methods would not be applicable to SMR with a roller massager. By contrast, a subjective pain threshold represents a well-accepted methodological standard to control the levels of pressures administered during foam rolling or roller massager SMR [6, 8, 9, 54]. A subjective pain threshold corresponds actual practice contexts where athletes usually adjust their massaging actions based on their perceived sensations. The difference in total workload achieved by athletes between conditions prevents attributing the reduction of muscle swelling and soreness up to 120 h after the resistance training protocol to a benefit of SMR, since this occurred at the expense of the training intensity. Future studies should pay particular attention to controlling the total workload between conditions if their aim is to investigate the effects of embedded SMR post-workout, which was not the primary aim of the present design.

Present findings confirm the deleterious effect of embedded SMR with a roller massager on training intensity in a resistance training protocol [6, 9]. Embedded SMR with a roller massager was characterized by reduced total workload and increased fatigability, indexed from objective and subjective marker. The mechanisms underlying the negative effects of embedded SMR remain insufficiently understood [6, 8, 9, 20]. It is suggested that embedded SMR generates additional cognitive and physical demands compared to passive recovery which are detrimental to short-term performances [8, 97], and that pressures elicit micro-damages to muscles that alter their contractile properties. Examining the effect of embedded SMR routines when administered by a physiotherapist, thus alleviating attentional and energetic costs associated with the regulation of SMR movements, would contribute to better understand optimal practice guidelines. This would have practical relevance for both coaches and athletes. Eventually, the SMR to passive recovery ratio was greater than that in the study by Monteiro et al. [9] (60 s of SMR, 4 min of recovery). It cannot be ruled out that the negative effects on performance

could be avoided below a certain threshold, e.g. below 0.5. Overall, the present pilot trial brings further insights on the effects embedded SMR.

## Supporting information

**S1 File. Raw data file.** Raw data collected during the pilot trial.  
(CSV)

**S2 File. CONSORT checklist.** CONSORT checklist (extension for pilot trials).  
(DOC)

**S3 File. CONSORT checklist.** CONSORT checklist short version (extension for pilot trials).  
(DOC)

**S4 File. CONSORT flowchart.** CONSORT flowchart of the experimental procedures implemented for the pilot trial.  
(DOCX)

**S5 File. Participants' information sheet (French version).** Original information document provided to the participants (French version).  
(DOCX)

**S6 File. Participants' information sheet (English translation).** Original information document provided to the participants (English translation).  
(DOCX)

## Author Contributions

**Conceptualization:** Yann Kerautret, Aymeric Guillot, Franck Di Rienzo.

**Data curation:** Yann Kerautret.

**Formal analysis:** Franck Di Rienzo.

**Investigation:** Yann Kerautret.

**Methodology:** Yann Kerautret.

**Project administration:** Yann Kerautret, Aymeric Guillot.

**Software:** Franck Di Rienzo.

**Supervision:** Aymeric Guillot, Franck Di Rienzo.

**Validation:** Aymeric Guillot, Franck Di Rienzo.

**Writing – original draft:** Yann Kerautret, Franck Di Rienzo.

**Writing – review & editing:** Aymeric Guillot, Franck Di Rienzo.

## References

1. Cheatham SW, Kolber MJ, Cain M, Lee M. The effects of self-myofascial release using a foam roll or roller massager on joint range of motion, muscle recovery, and performance: a systematic review. *Int J Sports Phys Ther.* 2015; 10: 827–838. PMID: [26618062](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26618062/)
2. Cheatham SW, Stull KR. Comparison of three different density type foam rollers on knee range of motion and pressure pain threshold: a randomized controlled trial. *Int J Sports Phys Ther.* 2018; 13: 474–482. PMID: [30038833](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30038833/)



3. Cheatham SW, Stull KR. Roller massage: Comparison of three different surface type pattern foam rollers on passive knee range of motion and pain perception. *J Bodyw Mov Ther.* 2019; 23: 555–560. <https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2019.05.002> PMID: [31563369](#)
4. Dębski P, Białas E, Gnat R. The parameters of foam rolling, self-myofascial release treatment: a review of the literature. *Biomed Hum Kinet.* 2019; 11: 36–46. <https://doi.org/10.2478/bhk-2019-0005>
5. Laudner K, Thorson K. Acute effects of pectoralis minor self-mobilization on shoulder motion and posture: a blinded and randomized placebo-controlled study in asymptomatic individuals. *J Sport Rehabil.* 2019; 1: 1–5. <https://doi.org/10.1123/jsr.2018-0220> PMID: [30860417](#)
6. Monteiro ER, Neto VGC. Effect of different foam rolling volumes on knee extension fatigue. *Int J Sports Phys Ther.* 2016; 11: 1076–1081. PMID: [27999722](#)
7. Fleckenstein J, Wilke J, Vogt L, Banzer W. Preventive and regenerative foam rolling are equally effective in reducing fatigue-related impairments of muscle function following exercise. *J Sports Sci Med.* 2017; 16: 474–479. PMID: [29238246](#)
8. Monteiro ER, Škarabot J, Vigotsky AD, Brown AF, Gomes TM, Novaes J da S. Maximum repetition performance after different antagonist foam rolling volumes in the inter-set rest period. *Int J Sports Phys Ther.* 2017; 12: 76–84. PMID: [28217418](#)
9. Monteiro ER, Vigotsky A, Škarabot J, Brown AF, Ferreira de Melo Fiuza AG, Gomes TM, et al. Acute effects of different foam rolling volumes in the inter-set rest period on maximum repetition performance. *Hong Kong Physiother J.* 2017; 36: 57–62. <https://doi.org/10.1016/j.hknpj.2017.03.001> PMID: [30931039](#)
10. Guillot A, Kerautret Y, Queyrel F, Schobb W, Di Rienzo F. Foam rolling and joint distraction with elastic band training performed for 5–7 weeks respectively improve lower limb flexibility. *J Sports Sci Med.* 2019; 18: 160–171. PMID: [30787664](#)
11. Cruz-Díaz D, Hita-Contreras F, Martínez-Amat A, Aibar-Almazán A, Kim K-M. Ankle-joint self-mobilization and CrossFit training in patients with chronic ankle instability: a randomized controlled trial. *J Athl Train.* 2020; 55: 159–168. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-181-18> PMID: [31935136](#)
12. Kerautret Y, Di Rienzo F, Eyssautier C, Guillot A. Selective effects of manual massage and foam rolling on perceived recovery and performance: current knowledge and future directions toward robotic massages. *Front Physiol.* 2020; 11: 1567. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.598898> PMID: [33408640](#)
13. Skinner B, Moss R, Hammond L. A systematic review and meta-analysis of the effects of foam rolling on range of motion, recovery and markers of athletic performance. *J Bodyw Mov Ther.* 2020; 24: 105–122. <https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2020.01.007> PMID: [32825976](#)
14. Wilke J, Müller A-L, Giesche F, Power G, Ahmedi H, Behm DG. Acute effects of foam rolling on range of motion in healthy adults: a systematic review with multilevel meta-analysis. *Sports Med.* 2020; 50: 387–402. <https://doi.org/10.1007/s40279-019-01205-7> PMID: [31628662](#)
15. Pearcey GEP, Bradbury-Squires DJ, Kawamoto J-E, Drinkwater EJ, Behm DG, Button DC. Foam rolling for delayed-onset muscle soreness and recovery of dynamic performance measures. *J Athl Train.* 2015; 50: 5–13. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-50.1.01> PMID: [25415413](#)
16. Behara B, Jacobson BH. Acute effects of deep tissue foam Rolling and dynamic stretching on muscular strength, power, and flexibility in division I linemen. *J Strength Cond Res.* 2017; 31: 888–892. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001051> PMID: [26121431](#)
17. Rey E, Padrón-Cabo A, Costa PB, Barcala-Furelos R. The effects of foam rolling as a recovery tool in professional soccer players. *J Strength Cond Res.* 2017.
18. Hendricks S, Hill H, Hollander S den, Lombard W, Parker R. Effects of foam rolling on performance and recovery: a systematic review of the literature to guide practitioners on the use of foam rolling. *J Bodyw Mov Ther.* 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2019.10.019> PMID: [32507141](#)
19. Butcher SJ, Neyedly TJ, Horvey KJ, Benko CR. Do physiological measures predict selected CrossFit (®) benchmark performance? Open Access J Sports Med. 2015; 6: 241–247. <https://doi.org/10.2147/OAJSM.S88265> PMID: [26261428](#)
20. Monteiro ER, Costa PB, Neto VGC, Hoogenboom BJ, Steele J, da Silva Novaes J. Posterior thigh foam rolling increases knee extension fatigue and passive shoulder range-of-motion. *J Strength Cond Res.* 2019; 33: 987–994. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003077> PMID: [30741873](#)
21. van Melick N, Meddeler BM, Hoogeboom TJ, Nijhuis-van der Sanden MWG, van Cingel REH. How to determine leg dominance: the agreement between self-reported and observed performance in healthy adults. *PLOS ONE.* 2017; 12: e0189876. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0189876> PMID: [29287067](#)
22. World Medical Association. World Medical Association Declaration of Helsinki: Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subjects. *JAMA.* 2013; 310: 2191–2194. <https://doi.org/10.1001/jama.2013.281053> PMID: [24141714](#)

23. Tavares LD, de Souza EO, Ugrinowitsch C, Laurentino GC, Roschel H, Aihara AY, et al. Effects of different strength training frequencies during reduced training period on strength and muscle cross-sectional area. *Eur J Sport Sci*. 2017; 17: 665–672. <https://doi.org/10.1080/17461391.2017.1298673> PMID: [28316261](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28316261/)
24. International Powerlifting Federation. International Powerlifting Federation: technical rules book. Strassen, Luxembourg: International Powerlifting Federation; 2021. Available: [https://www.powerlifting.sport/fileadmin/ipf/data/rules/technical-rules/english/IPF\\_Technical\\_Rules\\_Book\\_2021docx.pdf](https://www.powerlifting.sport/fileadmin/ipf/data/rules/technical-rules/english/IPF_Technical_Rules_Book_2021docx.pdf)
25. Berger RA. Optimum Repetitions for the Development of Strength. *Res Q Am Assoc Health Phys Educ Recreat*. 1962; 33: 334–338. <https://doi.org/10.1080/10671188.1962.10616460>
26. Akinpelu A, Iyaniwura J, Ajagbe B. The reliability of Berger's table in estimating 1-RM and 10-RM of the elbow flexor muscles in normal young adults. *South Afr J Physiother*. 2001; 57: 11–15.
27. Johnson C. Measuring pain. visual analog scale versus numeric pain scale: what is the difference? *J Chiropr Med*. 2005; 4: 43–44. [https://doi.org/10.1016/S0899-3467\(07\)60112-8](https://doi.org/10.1016/S0899-3467(07)60112-8) PMID: [19674646](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19674646/)
28. Halperin I, Aboodarda SJ, Button DC, Andersen LL, Behm DG. Roller massager improves range of motion of plantar flexor muscles without subsequent decreases in force parameters. *Int J Sports Phys Ther*. 2014; 9: 92–102. PMID: [24567860](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24567860/)
29. Behm D, Duffett C, Wiseman S, Halperin I. Use of topical analgesic and rolling alone or in combination does not increase flexibility, pain pressure threshold, and fatigue endurance—a repeated-measures randomized, within-Subjects, exploratory study. *J Perform Health Res*. 2018; 2: 4279. <https://doi.org/10.25036/jphr.2018.2.1.behm>
30. Hodgson DD, Quigley PJ, Whitten JHD, Reid JC, Behm DG. Impact of 10-minute interval roller massage on performance and active range of motion. *J Strength Cond Res*. 2019; 33: 1512–1523. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002271> PMID: [29189581](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29189581/)
31. Repetitions Schoenfeld B. and muscle hypertrophy. *Strength Cond J*. 2000; 22: 67–69.
32. Yildiz M. An acute bout of self-myofascial release increases flexibility without a concomitant deficit in muscle performance in football players. *Int J Physiother*. 2018; 5: 92–97.
33. Aboodarda S, Spence A, Button DC. Pain pressure threshold of a muscle tender spot increases following local and non-local rolling massage. *BMC Musculoskelet Disord*. 2015; 16: 265. <https://doi.org/10.1186/s12891-015-0729-5> PMID: [26416265](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26416265/)
34. Schroeder J, Renk V, Braumann K-M, Hollander K. Acute foam rolling effects on contractile properties of the m. biceps femoris. *Ger J Exerc Sport Res*. 2017; 47: 294–300. <https://doi.org/10.1007/s12662-017-0467-y>
35. Young JD, Spence A-J, Power G, Behm DG. The addition of transcutaneous electrical nerve stimulation with roller massage alone or in combination did not increase pain tolerance or range of motion. *J Sports Sci Med*. 2018; 17: 525–532. PMID: [30479519](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30479519/)
36. Kyranoudis A, Arsenis S, Ispyrilidis I, Chatzinikolaou A, Gourgoulis V, Kyranoudis E, et al. The acute effects of combined foam rolling and static stretching program on hip flexion and jumping ability in soccer players. *J Phys Educ Sport*. 2019; 19: 1164–1172. <https://doi.org/10.7752/jpes.2019.02169>
37. Nicholas JJ, Taylor FH, Buckingham RB, Ottonello D. Measurement of circumference of the knee with ordinary tape measure. *Ann Rheum Dis*. 1976; 35: 282. <https://doi.org/10.1136/ard.35.3.282> PMID: [984911](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/984911/)
38. Soderberg GL, Ballantyne BT, Kestel LL. Reliability of lower extremity girth measurements after anterior cruciate ligament reconstruction. *Physiother Res Int*. 1996; 1: 7–16. <https://doi.org/10.1002/pri.43> PMID: [9238719](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9238719/)
39. Noble B, Borg G, Jacobs I, Ceci R, Kaiser P. A category-ratio perceived exertion scale: relationship to blood and muscle lactates and heart rate. *Med Sci Sports Exerc*. 1983; 15: 523–528. PMID: [6656563](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/6656563/)
40. Borg G. An introduction to Borg's RPE-scale. *Mouvement Publications*; 1985.
41. Crichton N. Visual analogue scale (VAS). *J Clin Nurs*. 2001; 10: 706–6.
42. Team RC. R: A language and environment for statistical computing; 2015. 2018.
43. Snow G. blockrand: randomization for block random clinical trials. *R Package Version*. 2013;1.
44. Efird J. Blocked Randomization with Randomly Selected Block Sizes. *Int J Environ Res Public Health*. 2011; 8: 15–20. <https://doi.org/10.3390/ijerph8010015> PMID: [21318011](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21318011/)
45. Pinheiro J, Bates D, DebRoy S, Sarkar D. nlme: linear and nonlinear mixed effects models. *R package version 3*. 2018. 2019.
46. Winter B. Linear models and linear mixed effects models in R with linguistic applications. *ArXiv13085499 Cs*. 2013 [cited 1 Feb 2021]. Available: <http://arxiv.org/abs/1308.5499>
47. Ben-Shachar M, Makowski D, Lüdtke D. Compute and interpret indices of effect size. *CRAN Online Ser*. 2020. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3952214>

48. Holm S. A Simple Sequentially Rejective Multiple Test Procedure. *Scand J Stat.* 1979; 6: 65–70.
49. Champely S, Ekstrom C, Dalgaard P, Gill J, Weibelzahl S, Anandkumar A, et al. Package 'pwr.' R Package Version. 2018; 1. Available: Retrieved from <http://cran.r-project.org/package=pwr>
50. Hunter SK. Sex differences in human fatigability: mechanisms and insight to physiological responses. *Acta Physiol.* 2014; 210: 768–789. <https://doi.org/10.1111/apha.12234> PMID: [24433272](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24433272/)
51. Hunter SK. Sex differences in fatigability of dynamic contractions. *Exp Physiol.* 2016; 101: 250–255. <https://doi.org/10.1113/EP085370> PMID: [26440505](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26440505/)
52. Cheatham SW, Baker R. Differences in pressure pain threshold among men and women after foam rolling. *J Bodyw Mov Ther.* 2017; 21: 978–982. <https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2017.06.006> PMID: [29037655](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29037655/)
53. Cavanaugh MT, Aboodarda SJ, Hodgson DD, Behm DG. Foam Rolling of quadriceps decreases biceps femoris activation. *J Strength Cond Res.* 2017; 31: 2238–2245. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001625> PMID: [27642858](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27642858/)
54. Monteiro ER, da Silva Novaes J, Cavanaugh MT, Hoogenboom BJ, Steele J, Vingren JL, et al. Quadriceps foam rolling and rolling massage increases hip flexion and extension passive range-of-motion. *J Bodyw Mov Ther.* 2019; 23: 575–580. <https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2019.01.008> PMID: [31563372](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31563372/)
55. Martínez-Cabrera FI, Núñez-Sánchez FJ. Acute effect of a foam roller on the mechanical properties of the rectus femoris based on tensiomyography in soccer players. *Int J Hum Mov Sports Sci.* 2016; 4: 26–32. <https://doi.org/10.13189/saj.2016.040203>
56. Murray AM, Jones TW, Horobeanu C, Turner AP, Sproule J. Sixty seconds of foam rolling does not affect functional flexibility or change muscle temperature in adolescent athletes. *Int J Sports Phys Ther.* 2016; 11: 765–776. PMID: [27757289](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27757289/)
57. MacDonald GZ, Penney MDH, Mullaley ME, Cuconato AL, Drake CDJ, Behm DG, et al. An acute bout of self-myofascial release increases range of motion without a subsequent decrease in muscle activation or force. *J Strength Cond Res.* 2013; 27: 812–821. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31825c2bc1> PMID: [22580977](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22580977/)
58. Mazzei BG. Different effects of static and vibrating foam rollers on ankle plantar flexion flexibility and neuromuscular activation. Georgia Southern University; 2019.
59. Enoka RM, Duchateau J. Translating fatigue to human performance. *Med Sci Sports Exerc.* 2016; 48: 2228. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000929> PMID: [27015386](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27015386/)
60. Freiwald J, Baumgart C, Kühnemann M, Hoppe MW. Foam-rolling in sport and therapy—potential benefits and risks: Part 1—definitions, anatomy, physiology, and biomechanics. *Thema Konserv Ther Sportorthopädie.* 2016; 32: 258–266. <https://doi.org/10.1016/j.orthtr.2016.07.001>
61. Freiwald J, Baumgart C, Kühnemann M, Hoppe MW. Foam-rolling in sport and therapy—potential benefits and risks: Part 2—positive and adverse effects on athletic performance. *Thema Konserv Ther Sportorthopädie.* 2016; 32: 267–275. <https://doi.org/10.1016/j.orthtr.2016.07.002>
62. Wilke J, Niemeier P, Niederer D, Schleip R, Banzer W. Influence of foam rolling velocity on knee range of motion and tissue stiffness: a randomized, controlled crossover trial. *J Sport Rehabil.* 2019; 28: 711–715. <https://doi.org/10.1123/jsr.2018-0041> PMID: [29952699](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29952699/)
63. Fama BJ, Buetti DR. The acute effect of self-myofascial release on lower extremity plyometric performance. 2011.
64. Eliska O, Eliskova M. Are peripheral lymphatics damaged by high pressure manual massage? *Lymphology.* 1995; 28: 21–30. PMID: [7791372](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/7791372/)
65. Chaudhry H, Schleip R, Ji Z, Bukiet B, Maney M, Findley T. Three-dimensional mathematical model for deformation of human fasciae in manual therapy. *J Am Osteopath Assoc.* 2008; 108: 379–390. <https://doi.org/10.7556/jaoa.2008.108.8.379> PMID: [18723456](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18723456/)
66. Grabow L, Young JD, Alcock LR, Quigley PJ, Byrne JM, Granacher U, et al. Higher quadriceps roller massage forces do not amplify range-of-motion increases nor impair strength and jump performance. *J Strength Cond Res.* 2018; 32: 3059–3069. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001906> PMID: [30152808](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30152808/)
67. Verweij LM, Terwee CB, Proper KI, Hulshof CT, van Mechelen W. Measurement error of waist circumference: gaps in knowledge. *Public Health Nutr.* 2012/05/25 ed. 2013; 16: 281–288. <https://doi.org/10.1017/S1368980012002741> PMID: [22626254](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22626254/)
68. Dawson LG, Dawson KA, Tiidus PM. Evaluating the influence of massage on leg strength, swelling, and pain following a half-marathon. *J Sports Sci Med.* 2004; 3: 37.
69. Hart JM, Swanik CB, Tierney RT. Effects of sport massage on limb girth and discomfort associated with eccentric exercise. *J Athl Train.* 2005; 40: 181–185. PMID: [16284638](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16284638/)

70. Zainuddin Z, Newton M, Sacco P, Nosaka K. Effects of massage on delayed-onset muscle soreness, swelling, and recovery of muscle function. *J Athl Train*. 2005; 40: 174–180. PMID: [16284637](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16284637/)
71. Beimborn B. The Effects of Foam Rolling on Exercise-Induced Muscle Damage. California State University, Long Beach; 2019.
72. Kim K, Park S, Goo B-O, Choi S-C. Effect of self-myofascial release on reduction of physical stress: a pilot study. *J Phys Ther Sci*. 2014; 26: 1779–1781. <https://doi.org/10.1589/jpts.26.1779> PMID: [25435699](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25435699/)
73. Hotfiel T, Swoboda B, Krinner S, Grim C, Engelhardt M, Uder M, et al. Acute effects of lateral thigh foam rolling on arterial tissue perfusion determined by spectral doppler and power doppler ultrasound. *J Strength Cond Res*. 2017; 31: 893–900. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001641> PMID: [27749733](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27749733/)
74. Kalén A, Pérez-Ferreirós A, Barcala-Furelos R, Fernández-Méndez M, Padrón-Cabo A, Prieto JA, et al. How can lifeguards recover better? A cross-over study comparing resting, running, and foam rolling. *Am J Emerg Med*. 2017; 35: 5. <https://doi.org/10.1016/j.ajem.2017.06.028>
75. Lastova K, Nordvall M, Walters-Edwards M, Allnutt A, Wong A. Cardiac autonomic and blood pressure responses to an acute foam rolling session. *J Strength Cond Res*. 2018; 32: 2825–2830. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002562> PMID: [29570571](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29570571/)
76. Adamczyk JG, Gryko K, Boguszewski D. Does the type of foam roller influence the recovery rate, thermal response and DOMS prevention? PLOS ONE. 2020; 15: e0235195. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235195> PMID: [32589670](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32589670/)
77. Okamoto T, Masuhara M, Ikuta K. Acute effects of self-myofascial release using a foam roller on arterial function. *J Strength Cond Res*. 2014; 28: 69–73. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31829480f5> PMID: [23575360](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23575360/)
78. Romero-Moraleda B, González-García J, Cuéllar-Rayó A, Balsalobre-Fernández C, Muñoz-García D, Morencos E. Effects of vibration and non-vibration foam rolling on recovery after exercise with induced muscle damage. *J Sports Sci Med*. 2019; 18: 172–180. PMID: [30787665](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30787665/)
79. Carroll TJ, Taylor JL, Gandevia SC. Recovery of central and peripheral neuromuscular fatigue after exercise. *J Appl Physiol*. 2016; 122: 1068–1076. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00775.2016> PMID: [27932676](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27932676/)
80. Jay K, Sundstrup E, Søndergaard SD, Behm D, Brandt M, Særvoll CA, et al. Specific and cross over effects of massage for muscle soreness: randomized controlled trial. *Int J Sports Phys Ther*. 2014; 9: 82–91. PMID: [24567859](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24567859/)
81. Escamilla R, Lander J, Garhammer J. Biomechanics of powerlifting and weightlifting exercises. *Exerc Sport Sci Garrett WE Kirkendall DT Eds Phila PA Lippincott Williams Wilkins*. 2000; 585–615.
82. Fry AC, Smith JC, Schilling BK. Effect of knee position on hip and knee torques during the barbell squat. *J Strength Cond Res*. 2003; 17: 629–633. [https://doi.org/10.1519/1533-4287\(2003\)017<0629:eokpoh>2.0.co;2](https://doi.org/10.1519/1533-4287(2003)017<0629:eokpoh>2.0.co;2) PMID: [14636100](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/14636100/)
83. Glassbrook DJ, Brown SR, Helms ER, Duncan S, Storey AG. The high-bar and low-bar back-squats: A biomechanical analysis. *J Strength Cond Res*. 2019; 33: S1–S18. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001836> PMID: [28195975](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28195975/)
84. Babault N, Pousson M, Ballay Y, Van Hoecke J. Activation of human quadriceps femoris during isometric, concentric, and eccentric contractions. *J Appl Physiol*. 2001; 91: 2628–2634. <https://doi.org/10.1152/jappl.2001.91.6.2628> PMID: [11717228](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11717228/)
85. Roig M, O'Brien K, Kirk G, Murray R, McKinnon P, Shadgan B, et al. The effects of eccentric versus concentric resistance training on muscle strength and mass in healthy adults: a systematic review with meta-analysis. *Br J Sports Med*. 2009; 43: 556. <https://doi.org/10.1136/bjism.2008.051417> PMID: [18981046](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18981046/)
86. Anderson K, Behm DG. Trunk muscle activity increases with unstable squat movements. *Can J Appl Physiol*. 2005; 30: 33–45. <https://doi.org/10.1139/h05-103> PMID: [15855681](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15855681/)
87. Longpré HS, Acker SM, Maly MR. Muscle activation and knee biomechanics during squatting and lunging after lower extremity fatigue in healthy young women. *J Electromyogr Kinesiol*. 2015; 25: 40–46. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2014.08.013> PMID: [25258248](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25258248/)
88. Almosnino S, Kingston D, Graham RB. Three-Dimensional Knee Joint Moments During Performance of the Bodyweight Squat: Effects of Stance Width and Foot Rotation. *J Appl Biomech*. 2013; 29. Available: <https://journals.humankinetics.com/view/journals/jab/29/1/article-p33.xml> <https://doi.org/10.1123/jab.29.1.33> PMID: [23462440](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23462440/)
89. MacDonald GZ, Button DC, Drinkwater EJ, Behm DG. Foam rolling as a recovery tool after an intense bout of physical activity. *Med Sci Sports Exerc*. 2014; 46: 131–142. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3182a123db> PMID: [24343353](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24343353/)

90. McMorris T, Barwood M, Corbett J. Central fatigue theory and endurance exercise: Toward an interoceptive model. *Neurosci Biobehav Rev*. 2018; 93: 93–107. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2018.03.024> PMID: [29608992](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29608992/)
91. Pageaux B. The psychobiological model of endurance performance: an effort-based decision-making theory to explain self-paced endurance performance. *Sports Med*. 2014; 44: 1319. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0198-2> PMID: [24809249](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24809249/)
92. Feeney D, Jelaska I, Uygur M, Jaric S. Effects of unilateral muscle fatigue on performance and force coordination in bimanual manipulation tasks. *Motor Control*. 2017; 21: 26–41. <https://doi.org/10.1123/mc.2015-0037> PMID: [26595105](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26595105/)
93. Gandevia SC. Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiol Rev*. 2001; 81: 1725–1789. <https://doi.org/10.1152/physrev.2001.81.4.1725> PMID: [11581501](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11581501/)
94. Schmid M, Schieppati M, Pozzo T. Effect of fatigue on the precision of a whole-body pointing task. *Neuroscience*. 2006; 139: 909–920. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2005.12.060> PMID: [16504410](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16504410/)
95. Romero-Moraleda B, La Touche R, Lerma-Lara S, Ferrer-Peña R, Paredes V, Peinado AB, et al. Neurodynamic mobilization and foam rolling improved delayed-onset muscle soreness in a healthy adult population: a randomized controlled clinical trial. Keogh J, editor. *PeerJ*. 2017; 5: 18. <https://doi.org/10.7717/peerj.3908>
96. Baumgart C, Freiwald J, Kühnemann M, Hotfiel T, Hüttel M, Hoppe MW. Foam rolling of the calf and anterior thigh: biomechanical Loads and acute effects on vertical jump height and muscle stiffness. *Sports Basel Switz*. 2019; 7: 27. <https://doi.org/10.3390/sports7010027> PMID: [30669477](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30669477/)
97. Phillips J, Diggin D, King DL, Sforzo GA. Effect of varying self-myofascial release duration on subsequent athletic performance. *J Strength Cond Res*. 2018. <https://doi.org/10.1519/jsc.0000000000002751>

## RÉSUMÉ

Cet essai pilote avait pour vocation l'observation des effets de la pratique du massage autogène inter-série avec bâton sur la performance de force et la récupération. Les résultats obtenus sur la charge de travail et la puissance musculaire ont démontré une influence négative de la condition massage autogène. Les scores subjectifs de perception de l'effort corroboraient cette baisse des performances par une élévation de la difficulté perçue plus élevée dans la condition massage autogène. Toutefois, le massage autogène réalisé entre chaque série a permis d'atténuer le gonflement musculaire, comme l'ont attesté les mesures de circonférence des cuisses. Second aspect intéressant, la pratique systématique du massage autogène au cours de la récupération a également permis de réduire l'intensité des douleurs musculaires de 24h à 120h post-entraînement. Du fait de ces différentes réponses psychophysiologiques, la pratique du massage autogène inter-série se révèle contreproductive dans le but d'optimiser les performances des athlètes. De plus amples études restent nécessaires pour confirmer ou infirmer les effets de cette pratique lors de récupération inter-série plus importante.

## INTRODUCTION

La pression mécanique sur les tissus mous est un mécanisme bien connu dans le domaine de la massothérapie. Différentes techniques existent avec pour chacune d'entre elles un effet bien distinct. Selon les techniques, le praticien utilise certaines parties de ses mains. Lors de pression glissée, le masseur-kinésithérapeute se sert du talon et de la paume de sa main pour obtenir une large zone de pression. Sans intensité de pression comme lors d'un effleurage, l'action ciblerait les téguments (Standley et al., 2010; Humbert, 2012). Dans le cas de pressions glissées les tissus sous-jacents sont ciblés. Pour diminuer cette zone et augmenter l'intensité de la pression, le masseur-kinésithérapeute peut utiliser ses pouces améliorant son degré de précision. Enfin, pour d'autres techniques comme le pétrissage le professionnel expérimenté mobilise l'ensemble de ses doigts. Le but de cette manœuvre est de décoller, tordre et étirer le muscle pour le décontracter (Humbert, 2012; Standley et al., 2010). Etant donné que le massage autogène emprunte ses fondements théoriques au massage manuel, il n'est pas surprenant de constater des effets comparables avec une pression roulée (Behm and Wilke, 2019). En revanche, à notre connaissance, il n'existe qu'une seule étude sur le massage autogène utilisant de la pression glissée (Gordon et al., 2018). Il semble que les bénéfices obtenus entre la pression roulée et glissée soient comparables sur l'augmentation de la température cutanée, la flexibilité ou encore les sensations physiques, mais aucune étude n'a comparé directement ces méthodes. De ce fait, à travers ce travail, nous nous sommes attachés à apporter un premier élément de réponse à cette question en comparant ces deux techniques de massage autogène. En toute logique, ce chapitre vient donc répondre au sous-objectif 2 de la phase expérimentale : évaluer l'effet de la pression glissée, axiale ou transversale, par rapport à la pression roulée au cours d'un massage autogène sur la température cutanée, l'amplitude articulaire et les sensations

physiques. Cette recherche offre l'opportunité d'approfondir les connaissances sur la pratique du massage autogène. Bien qu'hypothétique, l'exploration de ces mécanismes de pression roulée ou glissée pourraient à terme servir les intérêts de la recherche orientée sur le massage robotique et permettre de guider le choix des techniques à utiliser.



## **ÉTUDE 2**

**EFFETS D'INTERVENTIONS DE MASSAGE  
AUTOGÈNE AVEC OU SANS PRESSION GLISSÉE  
SUR LA TEMPÉRATURE DE LA PEAU,  
L'AMPLITUDE ARTICULAIRE ET LE BIEN-  
ÊTRE PERÇU : UN ESSAI PILOTE RANDOMISÉ**

(Kerautret et al., 2021)

### ARTICLE 3:

Effects of self-myofascial release interventions with or without sliding pressure on skin temperature, range of motion and perceived well-being: a randomized control pilot trial. Yann Kerautret, Aymeric Guillot, Carole Eyssautier, Guillaume Gibert and Franck Di Rienzo (2021). BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation, 13 (1), 43.

<https://doi.org/10.1186/s13102-021-00270-8>

### CONTRIBUTION DES CO-AUTEURS

Les co-auteurs de l'étude sont Yann Kerautret, Aymeric Guillot, Carole Eyssautier, Guillaume Gibert et Franck Di Rienzo. Ce travail de recherche a été mis en place lors de discussion entre Yann Kerautret, Aymeric Guillot, Carole Eyssautier, Guillaume Gibert et Franck Di Rienzo. Le recueil de données a été réalisé par Yann Kerautret au sein des différentes Box de Crossfit de la région Auvergne-Rhône-Alpes. Le traitement et l'analyse des données ont été menés par Yann Kerautret et Franck Di Rienzo. L'article a été rédigé par Yann Kerautret, puis Aymeric Guillot, Carole Eyssautier, Guillaume Gibert et Franck Di Rienzo ont effectué diverses corrections et ont fait part de leurs critiques.

RESEARCH

Open Access



# Effects of self-myofascial release interventions with or without sliding pressures on skin temperature, range of motion and perceived well-being: a randomized control pilot trial

Yann Kerautret<sup>1,2</sup>, Aymeric Guillot<sup>1,3</sup>, Carole Eyssautier<sup>2</sup>, Guillaume Gibert<sup>2</sup> and Franck Di Rienzo<sup>1,3\*</sup>

## Abstract

**Background:** Self-myofascial release is an emerging technique in strength and conditioning. Yet, there is no consensus regarding optimal practice guidelines. Here, we investigated the acute effects of various foam rolling interventions targeting quadriceps muscles, with or without sliding pressures.

**Methods:** We conducted a blinded randomized control pilot trial in 42 healthy weightlifting athletes over 4 weeks. Participants were randomly allocated to one of the four intervention (120 s massage routine) groups: foam rolling, roller massager, foam rolling with axial sliding pressures, foam rolling with transverse sliding pressures. Knee range of motion, skin temperature and subjective scores of the perceived heat, range of motion, muscle pain and relaxation were the dependent variables. Measurements were carried on before, after and up to 15 min (follow-up) after the massage intervention.

**Results:** The range of motion increased immediately after the various foam rolling interventions (+ 10.72%, 95% CI 9.51 to 11.95,  $p < 0.001$ ), but progressively returned back to the pre-intervention baseline along within the 15 min post-intervention. Foam rolling was the most effective intervention to increase skin temperature from thermographic measures (+ 14.06%, 95% CI 10.97 to 17.10,  $p < 0.001$ ), while the increase in perceived heat was comparable in all experimental groups (107%, 95% CI 91.08 to 122.61,  $p < 0.001$ ).

**Conclusions:** Subjective indexes of heat, range of motion, muscle pain and relaxation improved immediately after the intervention, but also gradually returned to the pre-intervention baseline. Overall, combining foam rolling with sliding pressures did not yield additional benefits from objective measures.

## Introduction

Self-myofascial release (SMFR) techniques, including Foam Rolling (FR), are increasingly used as part of warm-up and post-workout recovery routines in the field of strength and conditioning [1]. FR consists in back and

forth rolling movements applied to specific body parts using a foam roller or a roller massager [2]. Irrespective of the massaging tool, SMFR consists in self-administering mechanical pressures to the soft tissues, typically by rolling and/or sliding movements [3–5]. Physiological structures impacted by SMFR involve the skin, the muscles and their corresponding fascia. These organs contain mechanoreceptors such as the Golgi tendon organ involved in tonus regulations, and the corpuscles of Pacini, Meissner,

\* Correspondence: [franck.di-rienzo@univ-lyon1.fr](mailto:franck.di-rienzo@univ-lyon1.fr)

<sup>1</sup>Univ Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, Laboratoire Interuniversitaire de Biologie de la Motricité EA 7424, F-69622 Villeurbanne Cedex, France

<sup>3</sup>Institut Universitaire de France, Paris, France

Full list of author information is available at the end of the article



© The Author(s). 2021 **Open Access** This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>. The Creative Commons Public Domain Dedication waiver (<http://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/>) applies to the data made available in this article, unless otherwise stated in a credit line to the data.

and Ruffini which enable proprioception by detecting subtle changes in pressures, tangential forces and fine touch [6–8]. Myofascial manipulations also impact type III and IV interstitial receptors, which have an additional role in vasodilation and pain perception [6–8].

Mechanical pressures applied to the soft tissues were associated with a wide range of positive effects. SMFR techniques elicit comparable beneficial effects to those resulting from traditional manual massages [9–11]. FR was associated with improved flexibility, range of motion and reduced pain symptoms [3, 12]. Past experiments also demonstrated its potential relevance to improve on flexibility, as assessed from range of motion measures [12, 13]. The benefits were recorded up to 20 min post-treatment, but did not appear to last beyond a 30-min threshold [14–18]. Contrary to passive stretching, the effects of FR were not associated with a corollary decline in physical performances [3]. This was shown for explosive efforts and agility measures [19–21]. It is noteworthy that the pressures exerted during FR might constitute a risk factor for vessels, nerves or bones injuries [4, 22]. Pressure exerted during FR can reach up to 516 mm/Hg [22]. This represents a five-fold increase compared to a high pressure manual massage [23]. Eliska and Eliskova demonstrated lymphatic vessel damage above a 100 mm/Hg threshold. Controlling the pressure threshold is thus crucial in FR designs [10].

No study has yet provided detailed insights on the neurophysiological factors underlying the benefits of SMFR on performance. The scientific rationale supporting the efficacy of FR interventions derives from findings in traditional manual massage [4, 11, 24]. It was postulated that SMFR could decrease tissue stiffness, break adhesions and scar tissues [25]. It was also postulated that the mechanical pressures associated with SMFR yielded sympathetic inhibition as a result of mechanoreceptors stimulation [8, 10]. This was advanced as an account to the benefits of FR on range of motion and pain symptoms, which appeared comparable to those elicited by a myofascial manipulation intervention [8, 10, 25]. It was also postulated that the mechanical pressures applied during FR on the skin, muscles and fascia would produce the necessary frictions for thixotropic effects [25]. Schleip et al. [6] advanced that energy input to the fascia through mechanical pressure or heat promoted the return of viscoelastic and thixotropic properties [3]. Past experiments measured the local skin temperature, using an infrared thermometer, a skin thermistor or thermographic cameras [24, 26–33]. While manual massage and FR yielded comparable acute positive effects on the range of motion [24, 32, 33], both techniques appeared to have a different effect on skin temperature. Immediately after a traditional manual massage, the increase in skin temperature was inconsistently found

[28–31, 33]. However, no effects were observed after a FR intervention [24]. It was postulated that manual gestures generates friction forces accounting for the rise in skin temperature. This may however be restricted to the skin and superficial layers of the muscles, and therefore might not indicate a general increase in muscle temperature comparable to that produced during warm-up. A pioneer experiment underlined temperature increases in quadriceps muscles at a depth of 2.5 cm from the skin, but not at 3.5 cm [26]. Hinds et al. [27] failed to replicate these observations, thus supporting that manual massages had negligible effect on muscle temperature.

To the best of our knowledge, only one experiment investigated whether FR impacted skin temperature. Murray et al. [24] found no effect on skin temperature, but reported positive effects on knee range of motion. Importantly, the FR tool can be used as the support with the body being mobile with the body weight being used as an external force to apply pressures. However, the body can also be the support, and the mechanical pressures being applied by manipulating the FR tool with the upper limbs. In both cases, contrary to manual massage, there is a relative absence of frictions during SFMR [32]. These sliding pressures, also qualified as shearing self-manipulations, are defined as mechanical forces that act a skin area in a parallel direction to that of the body's surface [32]. In massage interventions including sliding pressures, the massaged limb is systematically the fixed point. The rolling mechanism of the foam roller is neutralized. Hence, massage movements with the tool trigger stretch and friction from the superficial layers of the targeted tissues. Sliding pressures rely both on the fixed point and the direction of the movement applied with the tool and imitate transverse and deep tissues stimulation, which are part of most traditional manual massage routines [34]. In the study by Gordon et al. [32], participants were asked to apply linear sliding pressures using a vibratory stick without rolls. Back and forth sliding pressures increased both the range of motion and skin temperature. The tool used in this experiment was to able generate stretch and friction forces on the soft tissues, similarly as the hands of a manual massage therapist [33, 35]. Interestingly, FR elicits an increase in stretch sensations along with range of motion improvements [3, 36]. Also, sliding pressures improved perceived relaxation and lightness [32]. Including sliding pressure strokes within FR routines might thus be associated with additional benefits.

In the present experiment, we aimed at comparing the effects of SMFR interventions with or without sliding pressures. Four independent groups received a distinct SMFR intervention targeting quadriceps muscles of the dominant leg. We hypothesized that incorporating

sliding pressure movements in the FR routine would yield additional benefits on range of motion and perceived sensations associated with well-being. The range of motion was considered the primary outcome variable of this pilot trial, since it is frequently focused as the main outcome of FR interventions. We also hypothesized that including sliding pressures according to an axial or transverse direction relative to the proximal-distal axis of the muscle would increase skin temperature compared to FR without sliding pressures.

## Materials and methods

### Participants

Forty-two healthy adults (20 males, 22 females,  $26.3 \pm 3.6$  years,  $1.70 \pm 0.10$  m,  $70.2 \pm 9.8$  kg, Body Mass Index:  $23.6 \pm 2.0$ ) with a history of FR experience ( $19.2 \pm 10.1$  months) volunteered to participate in the experiment. Recruitment strategies consisted in poster advertising and personal contact between Crossfit® coaches and practitioners. The pilot trial inclusion criteria included regular use of FR (> 8 h per week) for the past 6 months. This implies that our sample of participants possibly had greater flexibility than the average population, due to the continuous effects of FR on this physical quality [37, 38]. Inclusion of non-naïve participants was nonetheless deemed necessary to ensure a correct execution of routines and prevent novelty bias. Exclusion criteria included the presence of any musculoskeletal, systemic, or metabolic disease that would have affected lower extremity joint range of motion, or ongoing medication with cardiovascular, pulmonary, thyroid, hyperlipidemic, hypoglycemic, hypertensive, endocrinologic, psychotropic, neuromuscular, neurological, androgenic, or anti-inflammatory implications [39, 40]. More specifically, individuals using anti-inflammatory and analgesic drugs that might affect testing, proprioception or pain perception, were excluded [36]. The present experiment was approved by the ethics committee CPP Ouest 6 (IRB 2019-A01732–55) and in accordance with the ethical standards laid down in the 1964 Declaration of Helsinki and its later amendments. All participants were banned from eating and drinking alcohol and strenuous physical activities containing caffeine and similar stimulants at least 24 h before test sessions.

### Experimental design

The repeated measurements design was scheduled over an inclusion period of 4 weeks. The experimental design involved a familiarization session and an experimental session consisting in a pretest and an immediate post-test, followed by retention measures (Fig. 1a, b). Participants were assigned to one of the following groups: FR with a foam roller ( $n = 9$ , FOAM ROLLING), FR with a roller massager ( $n = 12$ , ROLLER MASSAGER), FR with a

foam roller combined with axial sliding pressures from the top of patella to anterior superior iliac spine with a wooden stick (vertical axis) ( $n = 11$ , AXIAL SLIDING PRESSURES), and FR with a foam roller combined with transverse sliding pressures (medial-lateral axis) ( $n = 10$ , TRANSVERSE SLIDING PRESSURES) (Fig. 1a). Detailed information regarding the FR intervention across groups and the group allocation procedure are provided below. Testing was conducted between 12 A.M. and 6 P.M., and participants were instructed to refrain from any strenuous activity the day prior to testing and from taking any medication that would interfere with testing. The intervention was performed on the dominant quadriceps (leg used to kick a ball).

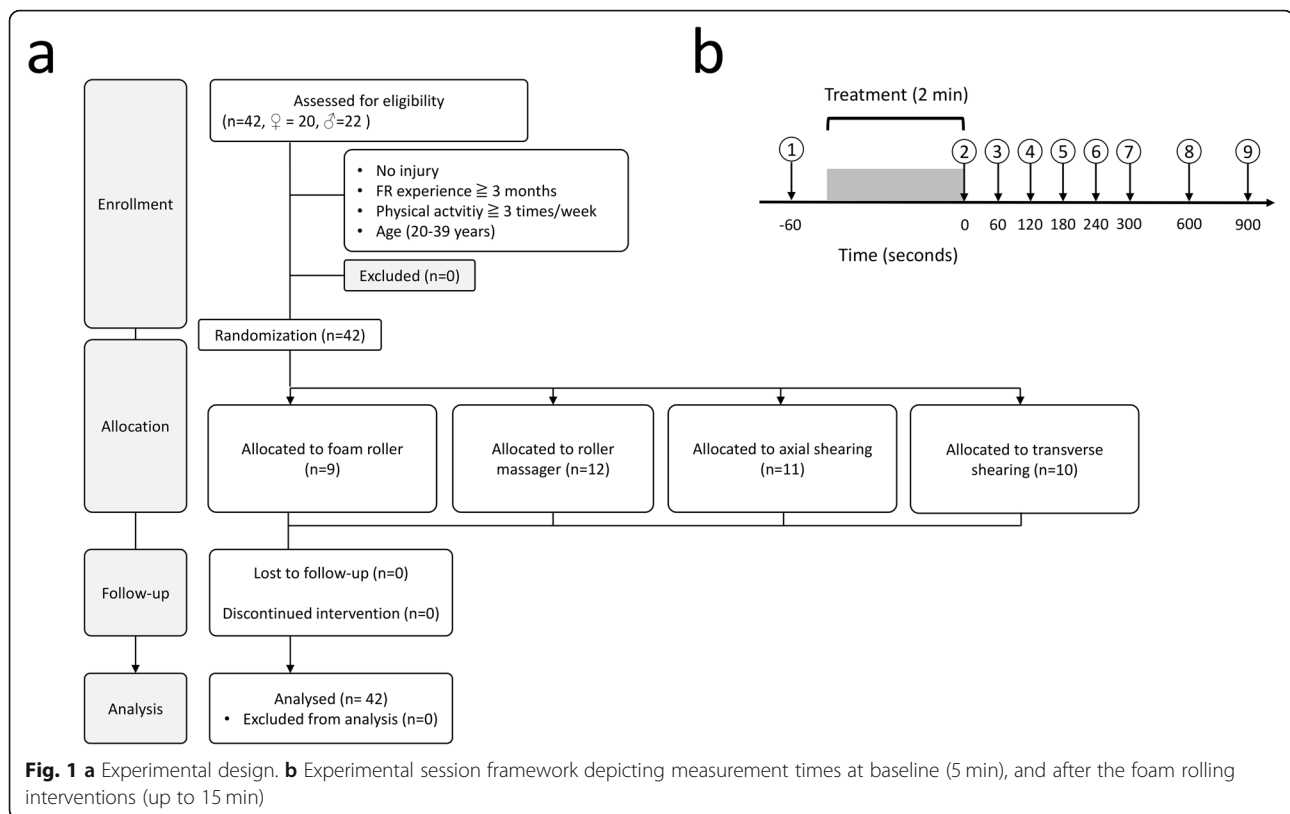
### Familiarization

Participants first completed a questionnaire from which demographic information was collected, and familiarized with the FR interventions. This first visit, lasting up to 15 min, was an orientation and familiarization session to apprehend the use of the tools and techniques imposed by this experiment with instructions and a demonstration from the experimenter. In the same way, this session allowed participants to apprehend the different parameters of SMFR standardized specifically for this pilot trial; the recommended rhythm and level of pressure, the treatment time and the area to be massaged. More specifically, participants learned to change their area on the quadriceps, medial, middle and lateral parts, while simultaneously respecting the other parameters already listed. Participants were instructed to regulate their rolling so that the perceived pain would be maximum 7 on a 0–10 Numeric Rating Scale (NRS) (0: “No pain”, 10: “Worst possible pain”).

### Foam rolling interventions

Two commercial FR tools were used across experimental conditions: a foam roller of 15\*30 cm length (Blackroll, Bottighofen, Switzerland), and a roller massager of 45 cm length (Physioroom, Lancashire, England). Foam roller was a cylinder of 100% of polypropylen which was used in prior research. Roller massager was composed by a metal tube surrounded by dissociated plastic bearings. Especially for this pilot trial, a wooden massage stick was created, with a shape being like an ellipse.

In the FOAM ROLLING group, participants were instructed to begin in a plank position and place the foam roller against the anterior face of their dominant thigh. To facilitate execution, the quadriceps was divided into two areas: i) from the top of patella to the middle of the quadriceps and ii) from the middle of the quadriceps to the anterior superior iliac spine. Participants positioned the roller above their left patella and rolled back and forth the first area four times with a cadence of one



inch per second (controlled by a metronome). Participants were then instructed to stop and execute four knee flexions at 90 degrees. The same sequence was applied to the second quadriceps area. This yielded a total duration of 2 min of FR intervention. The pressure applied to the dominant quadriceps was controlled using NRS self-reports (0: “Absence of pain”; 10: “Worst possible pain”), in keeping with the methods emphasized in previous FR experiments [41]. At any time, ratings should not exceed a predetermined 7 out of 10 threshold. To control pressure, participants were allowed to place the non-massaged leg in contact with the floor and to use their hands and forearms to manage the pressure. The choice of these instructions was based on the methodology adopted in previous experiments [42–45].

In the ROLLER MASSAGER group, participants performed FR with a roller massager [46, 47]. They sat on the edge of a table, feet rested on a chair to place their dominant lower limb in a semi-stretched position. This position is suitable for quadriceps relaxation and to apply massaging movements with upper limbs. Participants were then instructed to roll their two quadriceps areas, as previously presented, without crossing joints. Participants followed the same instructions as the FOAM ROLLING group (pressure level, cadence, muscle pain perception, and treatment duration). After performing the rolling movements with the roller massager, participants

performed 4 knee flexions while maintaining pressure with the roller massager.

For AXIAL SLIDING PRESSURES and TRANSVERSE SLIDING PRESSURES groups, the massage routine with the foam roller was combined with either axial or transverse sliding pressures. The massage routine was the same as that described for the FOAM ROLLING group, but only lasted 1 min. The remaining minute was allocated to sliding pressures movements applied with a homemade wooden stick where the rolling component was neutralized. As in the ROLLER MASSAGER group, the massage with the homemade wooden stick was performed sitting on a table to allow knee mobilizations. These methodological choices reproduced the methods described in experimental protocols addressing the effects of autogenous friction [48].

#### Dependent variables

As psychometric indexes; we used NRS to address at the subjective level the effects of the FR intervention (HEAT, RANGE OF MOTION, MUSCLE PAIN AND RELAXATION). As behavioral index, were recorded the flexibility of the posterior chain made from the Duncan-Ely test. As neurophysiological index, we recorded skin temperature using a thermography camera. The assessor was blinded to the group assignment but remained the same throughout the pilot trial to ensure reproducibility of the measures.

No feedback was provided to participants until after completion of the design.

#### **Skin temperature**

We used the FLIR-ONETM thermography camera (FLIR Systems, Frankfurt, Germany) to collect thermographic measures as participants sat on a chair. The camera yielded pictures differentiating skin temperature across a color range. The application provides skin temperature measures ranging from  $-20^{\circ}$  to  $120^{\circ}\text{C}$ , with a sensitivity of  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$  (Fig. 2a). To ensure the reliability and reproducibility of measures, an upper rubber band was positioned on the upper-third of the quadriceps (corresponding to the center of the muscle belly). For each photo, the sensor of the camera was directed towards the rubber band, at 10 cm to optimize the resolution. In addition, a grid of three zones was used to distinguish a proximal area, a central area and a distal area. 5 min after the FR intervention, skin temperature was collected every min for 5 min. Then, skin temperature was collected every 5 min (i.e. at 10 and 15 min post-intervention).

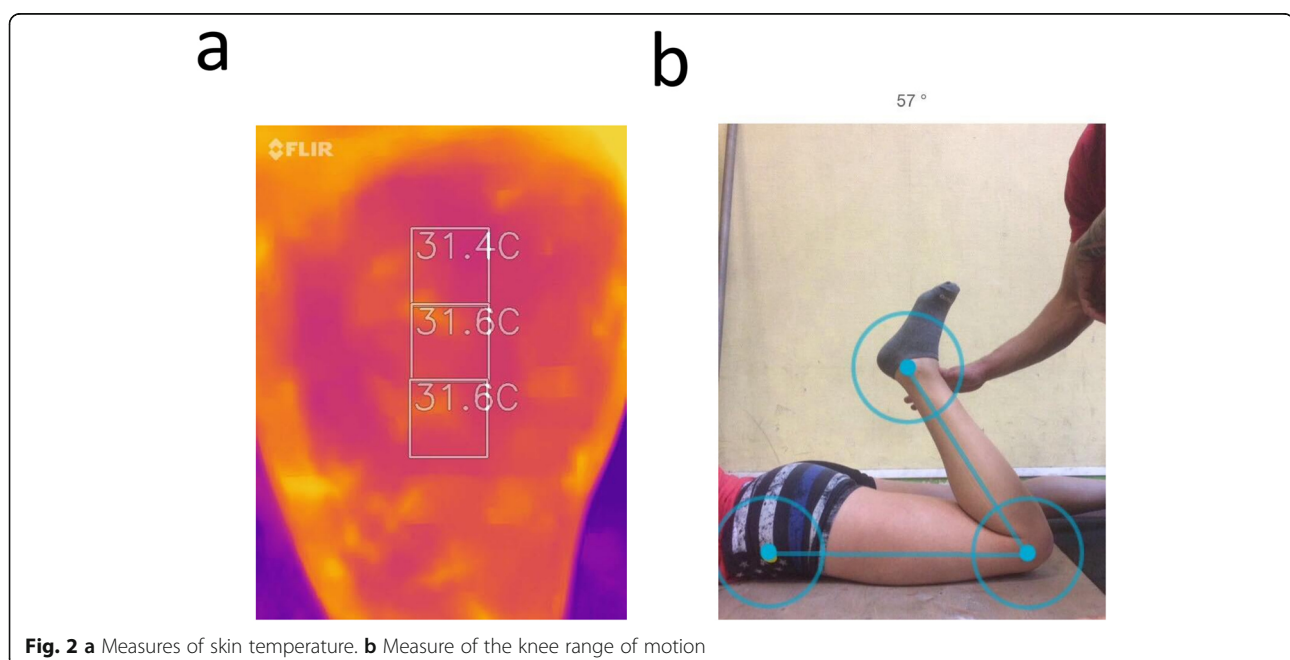
#### **Range of motion**

We used a digital goniometer (CJOrtho, Collège des Jeunes Orthopédistes, Paris, France) to collect the passive knee flexion range of motion from the Duncan-Ely test [49]. The position of the camera was standardized and positioned at 200 cm of the participant. Strips of tape were placed on the floor to mark the position of

the thermography camera. Passive knee range of motion recordings required a total of five repeated measurements of 15 s distributed before and after the FR intervention (Fig. 2b). Range of motion was collected immediately after the intervention, and every 5 min post-intervention (until 15 min). To complete the Duncan-Ely test, participants laid prone on a yoga mat. Their ankle was grasped by a physiological therapist who moved the knee to the end of their maximal flexion range of motion. This corresponds to the point where the knee can no longer be passively moved without providing overpressure [50]. The range of motion was collected with the optical goniometer from the video recordings of the Duncan-Ely test. The assessor controlled for compensatory movement including extern rotation leg and/or knee elevation, and lateral and/ or anterior tilt pelvis.

#### **Psychometric measures**

Participants were requested to provide self-reports ratings of their sensations on a 10-point NRS (0: “Not at all”, 10: “Very strong”). They were asked to rate their perceived quadriceps heat, knee range of motion, levels of pain and perceived relaxation in the quadriceps muscles. For pain ratings, the scale values were rectified for congruence purposes with the other NRS (0: “Very strong”, 10: “Not at all”). Psychometric recordings involved five repeated measures: before and after the intervention and every 5 min (until 15 min) post-intervention.



## Statistical analysis

### Block randomization

We used R [51] and the package *blockrand* [52] to perform participants' group assignment (block randomization). *Blockrand* generates random sequences using random block size selection, which is required to prevent randomization bias [53]. The randomization procedure was carried for in males (sample size generated:  $n = 24$ ; 3 blocks; block sizes:  $n = 16$ ,  $n = 4$ , and  $n = 4$ , respectively) and female (sample size generated:  $n = 24$ ; 2 blocks; block sizes:  $n = 16$ , and  $n = 8$ , respectively) stratum of our sample. To grant allocation concealment, the random sequence was matched to a predetermined list of the male and female participants (i.e. corresponding to their inclusion order).

### Data analysis

We used *nlme* [54] to run a series of linear mixed effects analyses. For all dependent variables, we first investigated the acute effect of the FR interventions [14, 32]. We built by-subject random intercept models using GROUP (FOAM ROLLER, ROLLER MASSAGER, AXIAL SLIDING PRESSURES, TRANSVERSE SLIDING PRESSURES) and TEST (PRETEST, POSTTEST) as fixed effects, with interaction term. Then, we investigated *delayed* changes occurring after FR interventions. We built the random-coefficient regression models with a by-subject random intercepts using GROUP (FOAM ROLLER, ROLLER MASSAGER, AXIAL SLIDING PRESSURES, TRANSVERSE SLIDING PRESSURES), TIME (numeric regressor: duration in min from the POSTTEST, starting from 0), and PRETEST VALUE (numeric regressor: pre-intervention covariate evaluating whether participants could be regressing to different baselines) as fixed effects, with interaction terms. For range of motion and skin temperature, we also included as level-one and level-two regressor, respectively, the SUBJECTIVE RATING provided by the participants on the NRS. This was used to investigate the correlation between objective and subjective variables. For skin temperature, we included the additional fixed effect of LIMB SECTION (PROXIMAL, MIDDLE, DISTAL). For the psychometric measures, we included the fixed effect of VARIABLE TYPE (HEAT, RANGE OF MOTION, MUSCLE PAIN, RELAXATION), to avoid replicating the analysis across all subjective dimensions (which would increase the risk for false positives). The statistical significance threshold was set up for a type 1 error rate of  $\alpha = 5\%$ . As effect sizes, we calculated partial Cohen's  $f$  using the ad hoc procedure for linear mixed effects models implemented in the *effectsize* package [55]. Main and interactions effects were investigated post-hoc using general linear hypotheses testing of planned contrasts from the *multcomp* package. We applied Holm's sequential corrections to control the false discovery rate [56].

### Power/sample size considerations

Considering the pilot nature of the study, we did not run a priori power calculation or registration in a clinical trial platform. We determined the sample size based on previous studies addressing the efficacy of self-myofascial release interventions, some of which involved randomized controlled trial designs [2, 57, 58]. We accounted for the fact that randomized control trials design involving between-group comparisons usually require larger sample sizes compared to randomized crossover trials involving within-group comparisons to achieve adequate statistical power (i.e.  $p_{1-\beta} > 0.80$ ). It is suggested that between-subject designs require 4 to 8 times more participants than within-subject designs to achieve a comparable statistical power [59]. Considering that adequate statistical power in within-subject study can be achieved using 11 participants, 42 participants was expected to constitute a reliable sample size. To further overcome statistical power limitations, we ran a posteriori power calculations for statistically significant main and interaction effects, using the *pwr* package in R [60].

## Results

Demographic information for each experimental group is provided in Table 1.

### Range of motion analysis

#### Effect of the foam rolling intervention on range of motion

The backward stepwise regression model revealed that the range of motion was only affected by the main effect of TEST ( $F(1, 40) = 328.44$ ;  $p < 0.001$ ; Cohen's  $f$  (partial) = 1.16, 95% CI [0.78, 1.53];  $p_{1-\beta} > 0.95$ ) and SUBJECTIVE RATING ( $F(1, 40) = 6.79$ ;  $p < 0.001$ ; Cohen's  $f$  (partial) = 0.37, 95% CI [0.08, 0.66];  $p_{1-\beta} = 0.64$ ). POSTTEST range of motion was reduced compared to the PRETEST (PRETEST: 49.99, 95% CI [52.78, 56.37]; POSTTEST: 54.58, 95% CI [48.19, 51.99];  $p < 0.001$ ) – higher values being indicating reduced knee flexion – while SUBJECTIVE RATING of the range of motion predicted the range of motion values collected from goniometer measures ( $-0.71$ , 95% CI [0.79, 1.23];  $p < 0.01$ ).

#### Time course changes in range of motion

The backward stepwise regression model revealed that the range of motion was only affected by the main effect of TIME ( $F(1, 125) = 266.58$ ;  $p < 0.001$ ; Cohen's  $f$  (partial) = 1.46, 95% CI [1.21, 1.71];  $p_{1-\beta} > 0.95$ ) and PRETEST VALUES ( $F(1, 40) = 284.24$ ;  $p < 0.001$ ; Cohen's  $f$  (partial) = 2.67, 95% CI [2.00, 3.32];  $p_{1-\beta} > 0.95$ ). TIME positively predicted the range of motion raw values ( $+0.28$ , 95% CI [0.25, 0.31];  $p < 0.001$ ). PRETEST VALUES also positively predicted the actual range of motion ( $+1.37$ , 95% CI [1.21, 1.53];  $p < 0.001$ ).



**Table 1** Baseline characteristics (M ± SD). There were no adverse events and no subjects withdrew from the pilot trial. BMI: Body Mass Index

	Foam rolling with a foam roller	Foam rolling with a roller massager	Foam rolling with axial sliding pressures	Foam rolling with transverse sliding pressures
Age (years)	24.3 ± 2.4 (range 21–28)	27.2 ± 4.0 (range 24–39)	26.1 ± 2.8 (range 22–31)	27.2 ± 4.3 (range 20–35)
Height (m)	1.68 ± 0.1 (range 1.5–1.83)	1.75 ± 0.1 (range 1.6–1.85)	1.73 ± 0.1 (range 1.62–1.83)	1.72 ± 0.1 (range 1.62–1.83)
Mass (kg)	67.5 ± 11.7 (range 53.2–85.7)	73.4 ± 10.8 (range 58–95)	69.2 ± 7.5 (range 58–83)	69.4 ± 9.3 (range 55–81)
BMI (kg/m <sup>2</sup> )	23.7 ± 2.5 (range 19.5–27.1)	24 ± 2.4 (range 20–27.8)	23.2 ± 1.6 (range 21.4–26.4)	23.3 ± 1.4 (range 20.7–24.9)
Foam rolling experience (month)	21.3 ± 8.1 (range 10–36)	17.0 ± 11.3 (range 5–48)	20.2 ± 11.6 (range 5–36)	19.1 ± 9.4 (range 5–36)

**Skin temperature analysis**

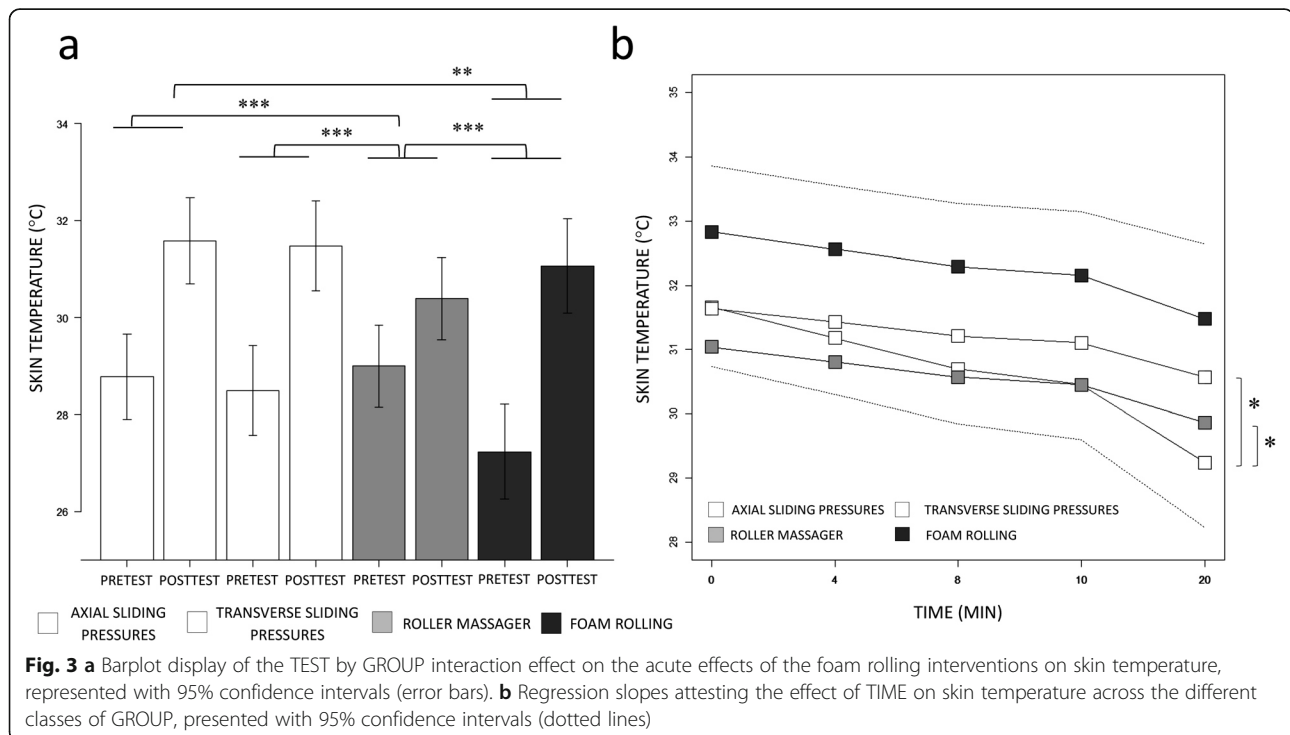
**Effect of the foam rolling interventions on skin temperature**

The backward stepwise regression model revealed that the two-way interaction between GROUP and TEST affected skin temperature ( $F(1, 206) = 18.93$ ;  $p < 0.001$ ; Cohen’s  $f$  (partial) = 0.53, 95% CI [0.37, 0.66];  $p_{1-\beta} = 0.81$ ). The PRETEST to POSTTEST variation in skin temperature during ROLLER MASSAGER (PRETEST: 29.00, 95% CI [28.15, 29.84]; POSTTEST: 30.39, 95% CI [29.55, 31.23]) was reduced compared to that observed in the AXIAL SLIDING PRESSURES group (PRETEST: 28.78, 95% CI [27.90, 29.66]; POSTTEST: 31.58, 95% CI [30.70, 32.46]) ( $p < 0.001$ ), TRANSVERSE SLIDING PRESSURES (PRETEST: 28.49, 95% CI [27.57, 29.42]; POSTTEST: 31.48, 95% CI [30.55, 32.40]) ( $p < 0.001$ ) and FOAM ROLLING (PRETEST: 27.24, 95% CI [26.26, 29.84]; POSTTEST: 31.06, 95% CI

[30.09, 31.23]) ( $p < 0.001$ ) conditions (Fig. 3a). Also, the PRETEST to POSTTEST variation in skin temperature during FOAM ROLLING was superior to that recorded during AXIAL SLIDING PRESSURES ( $p < 0.01$ ), while the difference between FOAM ROLLING and TRANSVERSE SLIDING PRESSURES did not reach the statistical significance threshold ( $p = 0.07$ ) (Fig. 3a).

**Time course changes in skin temperature**

The two-way interaction between GROUP and TEST ( $F(3, 456) = 2.66$ ;  $p < 0.05$ ; Cohen’s  $f$  (partial) = 0.14, 95% CI [0.00, 0.21];  $p_{1-\beta} = 0.75$ ) affected skin temperature. Skin temperature decrease along with TIME was greater during AXIAL SLIDING PRESSURES ( $-0.12$  °C/min, 95% CI [ $-0.16, -0.08$ ]) compared to TRANSVERSE SLIDING PRESSURES ( $-0.05$  °C/min, 95% CI [ $-0.09, -0.01$ ]) ( $p < 0.05$



and ROLLER MASSAGER ( $-0.06$  °C/min, 95% CI  $[-0.10, 0.02]$ ) ( $p < 0.05$ ). There was no difference between AXIAL SLIDING PRESSURES and FOAM ROLLING ( $-0.07$  °C/min, 95% CI  $[-0.09, 0.05]$ ), nor between other pairwise comparisons ( $p > 0.05$ , Fig. 3b). We also found a main effect of TIME ( $F(1, 456) = 123.09$ ;  $p < 0.001$ ; Cohen's  $f$  (partial) = 0.24, 95% CI  $[0.16, 0.32]$ ;  $p_{1-\beta} > 0.95$ ), SUBJECTIVE RATING ( $F(1, 456) = 6.16$ ;  $p < 0.01$ ; Cohen's  $f$  (partial) = 0.09, 95% CI  $[0.00, 0.18]$ ;  $p_{1-\beta} > 0.95$ ) and PRETEST VALUE ( $F(1, 456) = 37.10$ ;  $p < 0.001$ ; Cohen's  $f$  (partial) = 0.61, 95% CI  $[0.37, 0.85]$ ;  $p_{1-\beta} > 0.95$ ). TIME had a negative predictive relationship on skin temperature ( $-0.12$ , 95% CI  $[-0.16, -0.08]$ ,  $p < 0.001$ ). The PRETEST VALUE in skin temperature and SUBJECTIVE RATINGS of skin temperature, both used as covariates, had a positive predictive relationship ( $+1.05$  °C, 95% CI  $[0.68, 1.42]$ ,  $p < 0.001$ ;  $+0.24$  °C, 95% CI  $[0.01, 0.48]$ ,  $p < 0.05$ ).

### Psychometric analysis

#### Effect of the foam rolling interventions on subjective scores

The backward stepwise model selection revealed that the two-way interaction between TEST and VARIABLE TYPE ( $F(3,287) = 84.74$ ;  $p < 0.001$ ; Cohen's  $f$  (partial) = 0.82, 95% CI  $[0.68, 0.95]$ ;  $p_{1-\beta} > 0.95$ ) affected the subjective scores. The difference in perceived HEAT between the PRETEST and the POSTTEST (PRETEST: 3.14, 95% CI  $[2.74, 3.54]$ , POSTTEST: 6.50, 95% CI  $[6.09, 6.90]$ ) was greater than the difference in perceived PAIN between the PRETEST and the POSTTEST (PRETEST: 8.79, 95% CI  $[8.38, 9.19]$ , POSTTEST: 7.09, 95% CI  $[6.96, 7.50]$ ) ( $p < 0.001$ ), the difference in perceived RELAXATION between the PRETEST and the POSTTEST (PRETEST: 5.07, 95% CI  $[4.66, 5.47]$ , POSTTEST: 6.33, 95% CI  $[5.93, 6.73]$ ) ( $p < 0.001$ ), and the difference in perceived RANGE OF MOTION between the PRETEST and the POSTTEST (PRETEST: 4.90, 95% CI  $[4.50, 5.30]$ , POSTTEST: 6.83, 95% CI  $[6.43, 7.23]$ ) ( $p < 0.001$ ). PAIN scores decreased from the PRETEST to the POSTTEST, hence exhibited a distinct profile than the increase recorded in subjective ratings of RELAXATION ( $p < 0.001$ ) and RANGE OF MOTION ( $p < 0.001$ ).

#### Time-course changes in subjective scores

The backward stepwise model selection revealed that the two-way interactions between TIME and VARIABLE TYPE ( $F(3,610) = 32.93$ ,  $p < 0.001$ , Cohen's  $f$  (partial) = 0.48, 95% CI  $[0.39, 0.56]$ ;  $p_{1-\beta} > 0.95$ ) affected the subjective ratings. The interaction between GROUP and VARIABLE\_TYPE also reached the statistical significance threshold ( $F(9,610) = 1.80$ ,  $p = 0.05$ , Cohen's  $f$  (partial) = 0.16, 95% CI  $[0.00, 0.23]$ ;  $p_{1-\beta} = 0.20$ ). The negative influence of TIME on HEAT scores ( $-0.10$ /min, 95% CI  $[-0.14, -0.06]$ ) was greater than that recorded for RELAXATION ( $-0.01$ /min  $\pm 0.02$ , 95% CI  $[-0.05, 0.03]$ ), PAIN ( $+0.08$ /min, 95% CI  $[0.04, 0.12]$ ) and RANGE

OF MOTION ( $-0.12$ /min  $\pm 0.03$ , 95% CI  $[-0.18, -0.06]$ ) (all  $p < 0.001$ ) scores (Fig. 4a). Also, the influence of TIME on PAIN ratings was superior to that for RELAXATION ( $p < 0.01$ ) and RANGE OF MOTION ( $p < 0.001$ ), both of which were negative (Fig. 4a). Irrespective of TIME, the difference between HEAT and RANGE OF MOTION subjective scores in the AXIAL SLIDING PRESSURES group (HEAT: 5.47, 95% CI  $[4.91, 6.83]$ ; RANGE OF MOTION: 6.00, 95% CI  $[5.44, 6.53]$ ) was reduced compared to that recorded in both the TRANSVERSE SLIDING PRESSURES (HEAT: 4.52, 95% CI  $[3.94, 5.11]$ ; RANGE OF MOTION: 6.17, 95% CI  $[5.58, 6.76]$ ) and ROLLER MASSAGER (HEAT: 5.27, 95% CI  $[4.74, 5.81]$ ; RANGE OF MOTION: 6.85, 95% CI  $[6.32, 7.39]$ ) groups (both  $p < 0.05$ , Fig. 4b).

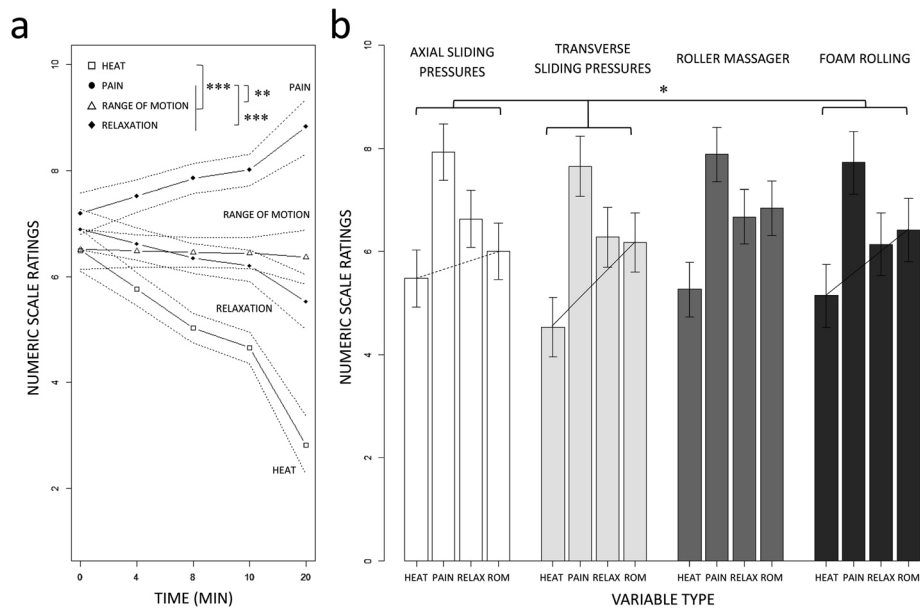
## Discussion

### Pilot trial outcomes

The primary aim of the pilot trial was to investigate whether sliding pressures yielded additional benefits compared to conventional FR interventions on skin temperature, range of motion and perceived sensations. Contrary to our initial hypothesis, combining sliding pressures to FR did not appear to elicit additional benefits. Conventional FR without sliding pressures elicited a greater increase in skin temperature, while FR with the roller massager had a more limited effect. The skin temperature increase after FR was associated with higher perceived heat post-intervention compared to axial sliding pressures. Also, despite a comparable increase in skin temperature, skin temperature decrease post-intervention was faster after axial sliding pressures compared to transverse sliding pressures. All SMFR interventions improved knee range of motion. The acute and time-course effects of SMFR on knee range of motion and skin temperature were overall associated with corollary changes in the perceived sensations.

### Acute effects of FR interventions

We expected differences in range of motion improvements due to the adjunction of sliding pressures to the FR routine. However, all SMFR interventions yielded comparable acute effects. Since measurements were conducted at the single session level in experienced athletes, we cannot rule out ceiling effect. The results nonetheless challenge our initial hypothesis. Regardless the experimental condition,  $5.85^\circ$  of range of motion improvement was recorded between the pre- and the post-test. The overall beneficial effects across all FR interventions is consistent with literature findings [44, 45]. Several hypotheses were advanced as an account to range of motion increases after a short bout of FR (with or without sliding pressures). Heat and pressures may alter thixotropic and viscoelastic properties of the fascia [3, 6, 25]. Rivera et al. [61] underlined that FR might elicit an



**Fig. 4** **a** Regression slopes attesting of the TIME by GROUP interaction effect on subjective ratings of sensations associated with well-being (post-intervention). Average values are presented with 95% confidence intervals (dotted bars). **b** Barplot display illustrating the GROUP by VARIABLE TYPE interaction post-intervention. Average values are presented with 95% confidence intervals (dotted bars)

increase in local blood flow that can facilitate range of motion due to a local increase in muscle temperature [32]. Also, the effect of heat and pressure on proprioceptive organs might downregulate the muscle tone through the activation of interstitial receptors type III, IV, and Ruffini corpuscles [6, 8, 25]. SMFR interventions might thus retroact on the autonomic nervous system and balance sympathetic and parasympathetic outputs to the muscles [6, 8, 25]. An effect of pressures on pain modulatory systems through the activation of interstitial nociceptive organs was also postulated [6, 25]. These assumptions enable to contextualize present findings within a psychophysics (rather than biomechanical) framework.

There is recent evidence of skin temperature increases as a result of FR or sliding pressures [32, 61]. Conversely, some studies did not report such effects [24]. It is noteworthy that past experiments did not compare the effects of FR with or without sliding pressures in a single design. Here, all FR interventions elicited an acute increase in skin temperature, which was however greater after the FR intervention *without* sliding pressures. This may account for an greater increase in local blood flow as a result of the FR pressures compared to sliding pressures – which remain superficial [27, 28, 30, 32, 61]. The hypothesis of causal relationship between skin temperature and local blood flow increases is not new [31, 33]. Our initial hypothesis was that the adjunction of axial or transverse sliding pressures to FR would elicit greater increases in skin temperature. Unexpectedly,

both sliding pressures groups exhibited comparable increases in skin temperature, both of which did not outperform that observed in the FR group. We therefore suggest that pressures, rather than frictions, are likely to affect the local blood flow.

Psychometric data demonstrated a beneficial effect of FR on perceived heat, range of motion and relaxation. Perceived pain also increased, but remained in the lower range of the NRS. The perceived sensation associated with well-being which exhibited the greatest increase from the pre- to the posttest, irrespective of the FR intervention, is heat. This is congruent with the increase in skin temperature observed from thermographic measures. To explain the general increase in subjective reports of perceived heat, we hypothesize that the heat generated by FR techniques stimulated heat receptors. The presence of thermoreceptors in the dermis could explain the increase in subjective reports of both perceived heat and relaxation [62, 63]. For the subjective reports of perceived range of motion, we hypothesize that the pressures exerted on soft tissues and fascia might trigger mechanoreceptors and interstitial type III and IV afferents that modulate sympathetic/parasympathetic activation [6, 8, 25]. The mechanical pressures could also induce noxious inhibitory control (DNIC), facilitating habituation to discomfort [64]. This would increase in tolerance to the pain associated with the stretch endpoint could help to achieve a higher range of motion [36]. While this remains hypothetical, the combined effect of FR interventions on cutaneous heat and noxious

inhibition would increase subjective reports of perceived relaxation. Overall, the roller massager and the wooden stick massage tools achieved sufficient pressure to elicit these effects.

#### **Time-course change in skin temperature, range of motion and perceived sensations after FR interventions**

An original approach in the present design is the quantification of time-course changes in the dependent variables after FR interventions. All dependent variables regressed back to baseline during the minutes following the intervention [65]. Yet, the repeated practice of FR interventions could result in more permanent improvements, as shown in several FR experiments [38, 47]. From a strictly practical standpoint, however, coaches and athletes seeking acute effects should ensure that the end of the warm-up including FR, and the beginning of the effort, remains short. This was particularly the case for the range of motion, which exhibited a regular decrease ( $+0.28^\circ/\text{min}$  in knee range of motion), comparable across experimental conditions. The skin temperature decreased by  $0.18^\circ\text{C}$  per minute overall, but was more pronounced in the axial sliding pressures group compared to both transverse sliding pressures and roller massager groups. This could indicate that the massage intervention had a more superficial effect on the tissues. The linear profile of temperature decline in the axial sliding pressures group was comparable to that recorded in the FR group, but the baseline was also higher in the latter due to a more pronounced acute effects of the massage intervention on skin temperature. Likewise, the subjective ratings of perceived sensations declined by 0.4 point per minute on the NRS overall. However, perceived pain tended to decrease, possibly indicating that minor discomfort elicited by the pressures dissipated during the minutes post-intervention. Perceived heat ratings declined more rapidly than those of perceived relaxation and range of motion. This is of practical relevance for athletes seeking for improved sensations through FR interventions as part of their warm-ups. Eventually, the overall ratings of heat post-intervention (irrespective of the time elapsed in minutes) after axial sliding pressures appeared higher than that recorded after transverse sliding pressures and FR, since it remained within the range of perceived range of motion. Indirectly, this could argue in support of a greater efficacy of axial sliding pressures compared to transverse sliding pressures with regards to the increase the perceived heat, specifically with regards to the maintenance this effect during minutes following the intervention. However, these effects remain subjective,

and were not corroborated by the profile obtained from objective measures.

#### **Implications and future directions**

The present findings confirm the usefulness of FR techniques to improve range of motion [32, 44, 45]. The transient nature of the acute effects might account for the absence of structural change, e.g. microarchitecture of cell cytoskeleton or mechanical properties of the myofilaments, at the single-session level. Present findings, nonetheless, have meaningful practical implications for both physiotherapists and coaches. As emphasized in several experiments, FR interventions with or without sliding pressures may be appropriate as part of warm-up routines [1, 3–5]. Warm-up is defined as a period of preparatory exercise and help to minimize the risk of injury [66]. In strength and conditioning, several stages are identified in warm-up routine frameworks. First, athletes perform mobility and stability exercises, i.e. referred to as “*pillar preparation*” [67]. This stage facilitates forthcoming performances and plays a role in injury prevention [68]. Then, warm-up includes a general and a specific stage. The general warm-up consists of simple and varied body weight movements, while specific warm-up consists in competition gestures and is frequently referred to as specific heating. The intensity increment during the warm-up can yield preliminary fatigue and, in some situations, injuries [69]. Since the benefits of present FR interventions were limited in time and yielded rather comparable benefits, our results advocate for their use before any type of physical exertion. Range of motion improvements could increase motor efficiency and potentiate the effects of both competition and training performances. An increase in the local muscle temperature facilitates performance through reduced stiffness, improved nerve-conduction, strength-velocity profiles, energy supply and thermoregulatory strain [70]. However, changes must occur both at the superficial and deep layers of the soft tissues to positively impact training and performance [70]. Here, the group which exhibited higher increases in skin temperature did not achieve higher range of motion. Sliding pressures, axial or transverse, did not seem to yield additional benefits. It is possible that the rise in temperature was restricted to the superficial layers and/or insufficient to have a predictive value on objective measures of performance. This is particularly relevant considering that the effects of a full warm-up intervention cannot be restricted to local effects on temperature, but also involve among several physiological factors improved blood delivery and utilization in the tissues [70, 71]. Second, the range of motion is not only determined by changes in muscle temperature. Mechanical pressure produced by FR tools may act upon pain perception

through stimulation of afferent central nociceptive pathways and descending anti-nociceptive pathways, i.e., diffuse noxious inhibitory control [1].

If the purpose is to improve athletes' sensations of well-being, FR interventions with sliding pressures may be considered for their potential to impact subjective ratings. This information may be particularly relevant to athletes seeking to improve their feelings and confidence during competitive events. This is relevant considering that the warm-up also represents an important component of the psychological preparation to a competitive event [66, 72]. The improvements observed after FR on perceived sensations (relaxation, range of motion and heat) thus provides further scientific rationale for their use as part of warm-up. The results showed that perceived heat was the sensation associated with well-being which was the most positively impacted by the intervention. Improvements in perceived heat appeared more easily maintained after axial sliding pressures. These short-term changes in perceived sensations could be a powerful asset for athletes during the last minutes preceding a competing event.

While the effects were not maintained in the absence of practice with a return to the pre-intervention baseline during the 15 min following the intervention, longer term benefits may be expected with the regular practice of FR interventions on range of motion and indexes of well-being. Future investigations might therefore address the relevance of repeatability and trainability factors in the framework of axial and transverse sliding pressures self-manipulation.

### Limitations

A main limitation of this pilot trial may be the lack of a non-intervention group. However, there is compelling evidence that no change in the main dependent variables targeted by self-massage intervention occur in the absence of treatment intervention [44]. Future research should establish in greater details whether skin temperature is a relevant marker to investigate the efficacy of manual massage and FR techniques, specifically with regards to the effects on range of motion and performance outcomes. Apart from skin temperature, all dependent variables were comparably affected by the different foam rolling interventions. Second, we did not implement objective monitoring of the pressures exerted by athletes on their soft tissues when performing FR with the foam roller, the roller massager or wooden stick. Some authors used a force platform to index pressures applied using foam rolling (with the foam roller on the floor) relative to the individual body weight, but could not quantify the contact surface indicative of pressures relative a given pressure area [24, 73]. Such methods would not be applicable to SFMR with a roller

massager or wooden stick. To overcome this limitation, some researchers used a custom device controlling for force and speed steadiness [46, 57]. However, such rolling-apparatus requires the intervention of third party, which would not provide the ecological validity with regards to how athletes implement self-myofascial release/foam rolling as part of their training routines [74]. Despite our standardization precautions, we suspect that the foam roller caused more pressure than the two other tools, positively impacting skin temperature without concomitant improvement in range of motion. The pressure exerted with the upper limbs in the case of FR interventions involving sliding pressure was possibly reduced. Yet, this limitation is inherent to the methods which involve distinct technical components. It might also be objected that the intensity of the pressure may not be a crucial factor mediating the effects on performance, particularly with regards to the range of motion, since similar gains are obtained across a variety of foam roller densities [44].

### Conclusion

The present investigation compared four FR interventions. Conventional FR emerged as the most effective method to elicit acute improvements in skin temperature while concomitantly improving the range of motion. Methods combining classical FR and sliding pressures did not yield additional acute benefits. Each yielded a comparable pattern of results, hence offering a wide range of alternatives to design efficient warm-up interventions. Although these methods are not enough to replace dynamic warm-up exercises to increase body temperature in depth, they overall represent an original and novel approach to the use of FR. Sliding pressures is an uncommon method, but has the advantage of allowing greater control over the level of pressure exerted on the soft tissues. Indeed, as with the roller massager, wooden stick massages are convenient for controlling the pressure applied to the quadriceps and control the sites of pressure due to manipulation of the massaging tool with the upper limb. Strength and conditioning coaches and physiotherapists may therefore find value in this tool when designing their interventions. Future investigations might address the specific relevance and specificities of FR interventions with sliding pressures in clinical populations.

### Supplementary Information

The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.1186/s13102-021-00270-8>.

**Additional file 1.**

### Acknowledgments

We would like to acknowledge the contributions of all participants and we are grateful for the contributions by Eyssautier Carole and Gilbert Guillaume for the concept and pilot trial design.

### Authors' contributions

Kerautret Yann performed literature review, led the experiments, collected the data and drafted the manuscript. Kerautret Yann, Guillot Aymeric, Eyssautier Carole and Gibert Guillaume conceptualized the pilot trial design. Di Rienzo Franck and Yann Kerautret completed the data analysis. Yann Kerautret prepared Figs. 1 and 2. Franck Di Rienzo prepared Figs. 3 and 4. Di Rienzo Franck, Guillot Aymeric, Eyssautier Carole, Gibert Guillaume reviewed the manuscript. The author(s) read and approved the final manuscript.

### Funding

This research was funded by the University of Claude Bernard Lyon 1 and the company Capsix Robotics.

### Availability of data and materials

The datasets used and/or analyzed during the current pilot trial are available from the corresponding author on reasonable request.

### Declarations

#### Ethics approval and consent to participate

The pilot trial was approved by the local Ethics Committee. All participants provide informed consent prior to pilot trial enrollment.

#### Consent for publication

Written informed consent was obtained from the participants for publication of their individual details and accompanying images in this manuscript. The consent form is held by the authors and is available for review by the Editor-in-Chief.

#### Competing interests

The authors declare they have no competing interests.

#### Author details

<sup>1</sup>Univ Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, Laboratoire Interuniversitaire de Biologie de la Motricité EA 7424, F-69622 Villeurbanne Cedex, France. <sup>2</sup>CAPSIX, 69450 Saint-Cyr au Mont d'Or, France. <sup>3</sup>Institut Universitaire de France, Paris, France.

Received: 17 November 2020 Accepted: 8 April 2021

Published online: 22 April 2021

### References

1. Wiewelshove T, Döweling A, Schneider C, Hottenrott L, Meyer T, Kellmann M, et al. A meta-analysis of the effects of foam rolling on performance and recovery. *Front Physiol.* 2019;10:376. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00376>.
2. Curran PF, Fiore RD, Crisco JJ. A comparison of the pressure exerted on soft tissue by 2 myofascial rollers. *J Sport Rehabil.* 2008;17(4):432–42. <https://doi.org/10.1123/jsr.17.4.432>.
3. Cheatham SW, Kolber MJ, Cain M, Lee M. The effects of self-myofascial release using a foam roll or roller massager on joint range of motion, muscle recovery, and performance: a systematic review. *Int J Sports Phys Ther.* 2015;10(6):827–38.
4. Freiwald J, Baumgart C, Kühnemann M, Hoppe MW. Foam-rolling in sport and therapy – potential benefits and risks: part 1 – definitions, anatomy, physiology, and biomechanics. *Sports Orthop Traumatol.* 2016;32(3):258–66. <https://doi.org/10.1016/j.orthtr.2016.07.001>.
5. Kalichman L, Ben DC. Effect of self-myofascial release on myofascial pain, muscle flexibility, and strength: a narrative review. *J Bodyw Mov Ther.* 2017; 21(2):446–51. <https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2016.11.006>.
6. Schleip R. Fascial plasticity – a new neurobiological explanation: part 1. *J Bodyw Mov Ther.* 2003;7(1):11–9. [https://doi.org/10.1016/S1360-8592\(02\)00067-0](https://doi.org/10.1016/S1360-8592(02)00067-0).
7. Schleip R. Fascial plasticity – a new neurobiological explanation part 2. *J Bodyw Mov Ther.* 2003;7(2):104–16. [https://doi.org/10.1016/S1360-8592\(02\)00076-1](https://doi.org/10.1016/S1360-8592(02)00076-1).
8. Wilke J, Müller A-L, Giesche F, Power G, Ahmed H, Behm DG. Acute effects of foam rolling on range of motion in healthy adults: a systematic review with multilevel meta-analysis. *Sports Med.* 2020;50(2):387–402. <https://doi.org/10.1007/s40279-019-01205-7>.
9. Hubbard T, Paolini J. Review of myofascial release as an effective massage therapy technique. *Athletic Ther Today.* 2009;14(5):30–4. <https://doi.org/10.1123/att.14.5.30>.
10. Schleip R, Müller DG. Training principles for fascial connective tissues: Scientific foundation and suggested practical applications. *J Bodyw Mov Ther.* 2013;17(1):103–15. <https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2012.06.007>.
11. Schroeder AN, Best TM. Is self myofascial release an effective preexercise and recovery strategy? A literature review. *Curr Sports Med Rep.* 2015;14(3): 200–8. <https://doi.org/10.1249/JSR.0000000000000148>.
12. Hendricks S, Hill H, den Hollander S, Lombard W, Parker R. Effects of foam rolling on performance and recovery: a systematic review of the literature to guide practitioners on the use of foam rolling. *J Bodyw Mov Ther.* 2019; 24(2):151–74. <https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2019.10.019>.
13. Hughes GA, Ramer LM. Duration of myofascial rolling for optimal recovery, range of motion, and performance: a systematic review of the literature. *Int J Sports Phys Ther.* 2019;14(6):845–59. <https://doi.org/10.26603/ijspst20190845>.
14. Halperin I, Aboodarda SJ, Button DC, Andersen LL, Behm DG. Roller massager improves range of motion of plantar flexor muscles without subsequent decreases in force parameters. *Int J Sports Phys Ther.* 2014;9(1): 92–102.
15. Kelly S, Beardsley C. Specific and cross-over effects of foam rolling on ankle dorsiflexion range of motion. *Int J Sports Phys Ther.* 2016;11(4):544–51.
16. Jay K, Sundstrup E, Søndergaard SD, Behm D, Brandt M, Særvoll CA, et al. Specific and cross over effects of massage for muscle soreness: randomized controlled trial. *Int J Sports Phys Ther.* 2014;9(1):82–91.
17. MacDonald GZ, Penney MDH, Mullaley ME, Cuconato AL, Drake CDJ, Behm DG, et al. An acute bout of self-myofascial release increases range of motion without a subsequent decrease in muscle activation or force. *J Strength Cond Res.* 2013;27(3):812–21. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31825c2bc1>.
18. Škarabot J, Beardsley C, Štirn I. Comparing the effect of self-myofascial release with static stretching on ankle range-of-motion in adolescent athletes. *Int J Sports Phys Ther.* 2015;10(2):203–12.
19. Rey E, Padrón-Cabo A, Costa PB, Barcala-Furelos R. The effects of foam rolling as a recovery tool in professional soccer players. *J Strength Cond Res.* 2019;33(8):2194–201.
20. Behara B, Jacobson BH. Acute effects of deep tissue foam rolling and dynamic stretching on muscular strength, power, and flexibility in division I linemen. *J Strength Cond Res.* 2017;31(4):888–92. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001051>.
21. Healey KC, Hatfield DL, Blanpied P, Dorfman LR, Riebe D. The effects of myofascial release with foam rolling on performance. *J Strength Cond Res.* 2014;28(1):61–8. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3182956569>.
22. Freiwald J, Baumgart C, Kühnemann M, Hoppe MW. Foam-rolling in sport and therapy – potential benefits and risks: part 2 – positive and adverse effects on athletic performance. *Sports Orthop Traumatol.* 2016;32(3):267–75. <https://doi.org/10.1016/j.orthtr.2016.07.002>.
23. Eliska O, Eliskova M. Are peripheral lymphatics damaged by high pressure manual massage? *Lymphology.* 1995;28(1):21–30.
24. Murray AM, Jones TW, Horobeanu C, Turner AP, Sproule J. Sixty seconds of foam rolling does not affect functional flexibility or change muscle temperature in adolescent athletes. *Int J Sports Phys Ther.* 2016;11:765–76.
25. Behm DG, Wilke J. Do self-myofascial release devices release myofascia? Rolling mechanisms: a narrative review. *Sports Med.* 2019;49(8):1173–81. <https://doi.org/10.1007/s40279-019-01149-y>.
26. Drust B, Atkinson G, Gregson W, French D, Binningsley D. The effects of massage on intra muscular temperature in the vastus lateralis in humans. *Int J Sports Med.* 2003;24:395–9.
27. Hinds T, McEwan I, Perkes J, Dawson E, Ball D, George K. Effects of massage on limb and skin blood flow after quadriceps exercise. *Med Sci Sports Exerc.* 2004;36(8):1308–13. <https://doi.org/10.1249/01.MSS.0000135789.47716.DB>.
28. Mori H, Ohsawa H, Tanaka TH, Taniwaki E, Leisman G, Nishijo K. Effect of massage on blood flow and muscle fatigue following isometric lumbar exercise. *Med Sci Monit.* 2004;10:173–8.
29. Sefton JM, Yarrar C, Berry JW, Pascoe DD. Therapeutic massage of the neck and shoulders produces changes in peripheral blood flow when assessed with dynamic infrared thermography. *J Altern Complement Med.* 2010;16(7): 723–32. <https://doi.org/10.1089/acm.2009.0441>.
30. Portillo-Soto A, Eberman LE, Demchak TJ, Peebles C. Comparison of blood flow changes with soft tissue mobilization and massage therapy. *J Altern*

- Complement Med. 2014;20(12):932–6. <https://doi.org/10.1089/acm.2014.0160>.
31. Plakornkul V, Vannabhum M, Viravud Y, Roongruangchai J, Mutirangura P, Akarasereenont P, et al. The effects of the court-type Thai traditional massage on anatomical relations, blood flow, and skin temperature of the neck, shoulder, and arm. *BMC Complement Altern Med*. 2016;16(1):363. <https://doi.org/10.1186/s12906-016-1282-y>.
  32. Gordon C-M, Lindner SM, Birbaumer N, Montoya P, Ankney RL, Andrasik F. Self-myofascial vibro-shearing: a randomized controlled trial of biomechanical and related changes in male breakdancers. *Sports Medicine - Open*. 2018;4(1):13. <https://doi.org/10.1186/s40798-018-0128-1>.
  33. Chatchawan U, Jararungsichol K, Yamauchi J. Immediate effects of self-thai foot massage on skin blood flow, skin temperature, and range of motion of the foot and ankle in type 2 diabetic patients. *J Altern Complement Med*. 2020;26(6):491–500. <https://doi.org/10.1089/acm.2019.0328>.
  34. Standley RA, Miller MG, Binkley H. Massage's effect on injury, recovery, and performance: a review of techniques and treatment parameters. *Strength Cond J*. 2010;32(2):64–7. <https://doi.org/10.1519/SSC.0b013e3181c33918>.
  35. Goats GC. Massage—the scientific basis of an ancient art: part 1. The techniques. *Br J Sports Med*. 1994;28(3):149–52. <https://doi.org/10.1136/bjism.28.3.149>.
  36. Krause F, Wilke J, Niederer D, Vogt L, Banzer W. Acute effects of foam rolling on passive stiffness, stretch sensation and fascial sliding: a randomized controlled trial. *Hum Mov Sci*. 2019;67:102514. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2019.102514>.
  37. Le Gal J, Begon M, Gillet B, Rogowski I. Effects of self-myofascial release on shoulder function and perception in adolescent tennis players. *J Sport Rehabil*. 2018;27:1–6.
  38. Guillot A, Kerautret Y, Queyrel F, Schobb W, Di Rienzo F. Foam rolling and joint distraction with elastic band training performed for 5-7 weeks respectively improve lower limb flexibility. *J Sports Sci Med*. 2019;18(1):160–71.
  39. Jo E, Juache GA, Saralegui DE, Weng D, Falatoonzadeh S. The acute effects of foam rolling on fatigue-related impairments of muscular performance. *Sports*. 2018;6(4):112. <https://doi.org/10.3390/sports6040112>.
  40. Lin W-C, Lee C-L, Chang N-J. Acute effects of dynamic stretching followed by vibration foam rolling on sports performance of badminton athletes. *J Sports Sci Med*. 2020;19(2):420–8.
  41. Grabow L, Young JD, Byrne JM, Granacher U, Behm DG. Unilateral rolling of the foot did not affect non-local range of motion or balance. *J Sports Sci Med*. 2017;16(2):209–18.
  42. Cheatham SW, Baker R. Differences in pressure pain threshold among men and women after foam rolling. *J Bodyw Mov Ther*. 2017;21(4):978–82. <https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2017.06.006>.
  43. Cheatham SW, Kolber MJ. Does roller massage with a foam roll change pressure pain threshold of the ipsilateral lower extremity antagonist and contralateral muscle groups? An exploratory study. *J Sport Rehabil*. 2018; 27(2):165–9. <https://doi.org/10.1123/jsr.2016-0196>.
  44. Cheatham SW, Stull KR. Comparison of three different density type foam rollers on knee range of motion and pressure pain threshold: a randomized controlled trial. *Int J Sports Phys Ther*. 2018;13(3):474–82. <https://doi.org/10.26603/ijsp.20180474>.
  45. Cheatham SW, Stull KR. Comparison of a foam rolling session with active joint motion and without joint motion: a randomized controlled trial. *J Bodyw Mov Ther*. 2018;22(3):707–12. <https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2018.01.011>.
  46. Sullivan KM, Silvey DB, Button DC, Behm DG. Roller-massager application to the hamstrings increases sit-and-reach range of motion within five to ten seconds without performance impairment. *Int J Sports Phys Ther*. 2013;8(3): 228–36.
  47. Hodgson DD, Quigley PJ, Whitten JHD, Reid JC, Behm DG. Impact of 10-minute interval roller massage on performance and active range of motion. *J Strength Cond Res*. 2019;33(6):1512–23. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002271>.
  48. Kerautret Y, Di Rienzo F, Eyssautier C, Guillot A. Selective effects of manual massage and foam rolling on perceived recovery and performance: current knowledge and future directions Toward Robotic Massages. *Front Physiol*. 2020;11:1567.
  49. Reina N. Connected orthopedics and trauma surgery: new perspectives. *Orthop Traumatol*. 2019;105(1):S15–22. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2018.05.018>.
  50. Lee SY, Sung KH, Chung CY, Lee KM, Kwon S-S, Kim TG, et al. Reliability and validity of the Duncan-Ely test for assessing rectus femoris spasticity in patients with cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol*. 2015;57(10):963–8. <https://doi.org/10.1111/dmcn.12761>.
  51. Team RC. R: a language and environment for statistical computing; 2015; 2018.
  52. Snow G. blockrand: randomization for block random clinical trials. R package version, vol. 1; 2013.
  53. Efrid J. Blocked randomization with randomly selected block sizes. *Int J Environ Res Public Health*. 2011;8(1):15–20. <https://doi.org/10.3390/ijerph8010015>.
  54. Pinheiro J, Bates D, DebRoy S, Sarkar D. nlme: linear and nonlinear mixed effects models. R package version 3, vol. 2019; 2018.
  55. Ben-Shachar M, Makowski D, Lüdtke D. Compute and interpret indices of effect size. CRAN [online serial]; 2020.
  56. Holm S. A simple sequentially Rejective multiple test procedure. *Scand J Stat*. 1979;6:65–70.
  57. Bradbury-Squires DJ, Nofall JC, Sullivan KM, Behm DG, Power KE, Button DC. Roller-massager application to the quadriceps and knee-joint range of motion and neuromuscular efficiency during a lunge. *J Athl Train*. 2015; 50(2):133–40. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-49.5.03>.
  58. Griefahn A, Oehlmann J, Zalpour C, von Piekartz H. Do exercises with the foam roller have a short-term impact on the thoracolumbar fascia? – a randomized controlled trial. *J Bodyw Mov Ther*. 2017;21(1):186–93. <https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2016.05.011>.
  59. Bellemare C, Bissonnette L, Kröger S. Statistical power of within and between-subjects designs in economic experiments; 2014.
  60. Champely S, Ekstrom C, Dalgaard P, Gill J, Weibelzahl S, Anandkumar A, et al. Package 'pwr.' R package version, vol. 1; 2018. Retrieved from <http://cran.r-project.org/package=pwr>
  61. Rivera M, Eberman L, Games K, Powden CJ. Comparison of myofascial release techniques on pectoralis minor length, glenohumeral total arc of motion, and skin temperature: a pilot study. *J Sport Rehabil*. 2019;0:1–5.
  62. LaMotte RH, Campbell JN. Comparison of responses of warm and nociceptive C-fiber afferents in monkey with human judgments of thermal pain. *J Neurophysiol*. 1978;41(2):509–28. <https://doi.org/10.1152/jn.1978.41.2.509>.
  63. Ring JW, de Dear R. Temperature transients: a model for heat diffusion through the skin, thermoreceptor response and thermal sensation. *Indoor Air*. 1991;1(4):448–56. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1991.00009.x>.
  64. DeBruyne DM, Dewhurst MM, Fischer KM, Wojtanowski MS, Durall C. Self-mobilization using a foam roller versus a roller massager: which is more effective for increasing hamstrings flexibility? *J Sport Rehabil*. 2016;26:94–100.
  65. Morales-Artacho AJ, Lacourpaille L, Guilhem G. Effects of warm-up on hamstring muscles stiffness: cycling vs foam rolling. *Scand J Med Sci Sports*. 2017;27(12):1959–69. <https://doi.org/10.1111/sms.12832>.
  66. Romaratezabala E, Nakamura FY, Castillo D, Gorostegi-Anduaga I, Yanci J. Influence of warm-up duration on physical performance and psychological perceptions in handball players. *Res Sports Med*. 2018;26(2):230–43. <https://doi.org/10.1080/15438627.2018.1431536>.
  67. Verstegen M, Williams P. Every day is game day: train like the pros with a no-holds-barred exercise and nutrition plan for peak performance. New York: Penguin Group; 2014.
  68. Sato K, Liebson C. The lateral squat. *J Bodyw Mov Ther*. 2013;17(4):560–2. <https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2013.09.005>.
  69. Tomaras EK, MacIntosh BR. Less is more: standard warm-up causes fatigue and less warm-up permits greater cycling power output. *J Appl Physiol*. 2011;111(1):228–35. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00253.2011>.
  70. Bishop D. Warm up I. *Sports Med*. 2003;33(6):439–54. <https://doi.org/10.2165/00007256-200333060-00005>.
  71. Altavilla G, Gaetano R. Physiological effects of warm-up and problems related to team sports. *Sport Sci*. 2018;11:83–8.
  72. Bishop D. Warm Up II. *Sports Med*. 2003;33(7):483–98. <https://doi.org/10.2165/00007256-200333070-00002>.
  73. Baumgart C, Freiwald J, Kühnemann M, Hotfiel T, Hüttel M, Hoppe MW. Foam rolling of the calf and anterior thigh: biomechanical Loads and acute effects on vertical jump height and muscle stiffness. *Sports (Basel, Switzerland)*. 2019;7:27.
  74. Wilke J, Vogt L, Banzer W. Immediate effects of self-myofascial release on latent trigger point sensitivity: a randomized, placebo-controlled trial. *Biol Sport*. 2018;35(4):349–54. <https://doi.org/10.5114/biolSport.2018.78055>.
- ### Publisher's Note
- Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

## RÉSUMÉ

Cette étude visant à comparer différentes techniques de massage autogène (pression roulée vs pression glissée) a permis de mettre en exergue l'intérêt de leur pratique respective. En effet, indépendamment du groupe, des gains immédiats ont été observés sur la flexibilité et les sensations subjectives de flexibilité, de douleur musculaire et de relaxation. Seul l'indice de chaleur perçue était supérieur dans le groupe de pression roulée avec rouleau. De plus, dans ce même groupe, cette sensation subjective de chaleur était corrélée à une forte augmentation de la température cutanée enregistrée par caméra thermique. En revanche, aucune relation de cause à effet n'a été admise entre les gains de flexibilité et cette augmentation de température cutanée. La combinaison des techniques ne semblait ni profiter d'un effet additionnel, ni de lutter contre l'influence négative du temps. En effet, pour chaque variable, un retour progressif jusqu'aux valeurs de pré-test était au bout de 15 min depuis l'arrêt de l'intervention. Le massage autogène reste une pratique pertinente pour accroître de manière transitoire la flexibilité et le bien-être perçu. Son utilisation à l'échauffement ou en récupération se justifie pour les préparateurs physiques et les entraîneurs. En revanche, cette technique ne doit pas avoir pour but de se substituer à un protocole d'échauffement conventionnel.



**CHAPITRE 4 : MASSAGE MANUEL ET MASSAGE  
AUTOGÈNE : DIFFÉRENCE DE NATURE DU  
CONTRÔLE MOTEUR**

## INTRODUCTION

Contrairement à nos hypothèses initiales, les études menées sur le massage autogène ont démontré des résultats contradictoires. Les techniques de pression glissée n'ont par exemple induit aucun bénéfice additionnel sur l'élévation de la température cutanée, de l'amplitude articulaire et des sensations physiques. Nous avons supposé que les techniques de pression glissée bénéficieraient d'un mécanisme combinant pression et friction. Cependant, d'après nos résultats, la technique offrant la plus grande augmentation de la température cutanée était celle effectuée au moyen d'un rouleau de massage, donc de pression roulée. Contre toute attente, nous n'avons par ailleurs constaté aucun lien de causalité entre l'augmentation de la température cutanée et l'amplitude articulaire du genou, puisque toutes les interventions ont induit des bénéfices comparables. En résumé, malgré certaines différences, les techniques paraissent offrir des effets comparables sur l'amplitude articulaire et les sensations perçues. D'autre part, le massage autogène intégré à l'entraînement interfère avec les capacités de récupération immédiates. Comparé au repos passif, le massage autogène inter-série diminue la charge de travail et la puissance musculaire. La nature proactive de cette pratique apparaît comme la cause principale de ces effets indésirables. Bien qu'une diminution des douleurs musculaires post-entraînement fut constatée, la contrepartie de ce surcoût énergétique et attentionnel constitue un frein indiscutable à son utilisation. Cette étude présente le double intérêt de démontrer à la fois le caractère contreproductif du massage autogène inter-série, et de capturer pour la première fois la prédominance de l'influence de sa nature proactive sur la charge de travail. Ces résultats restent toutefois insuffisants pour conclure sur l'efficacité relative du massage autogène et du massage manuel. Pour ces raisons, ce deuxième volet expérimental avait pour but de répondre au troisième sous-objectif de cette thèse : déterminer

la signature neurophysiologique du massage manuel et du massage autogène. Le massage manuel place l'utilisateur principalement dans un mode de contrôle rétroactif, tandis que le massage autogène suscite l'effet inverse, un mode principalement proactif. Nous posons l'hypothèse que cette différence pourrait se refléter par une signature neuronale partiellement distincte.

## **ÉTUDE 3**

# **SIGNATURES NEURONALES DES DIFFÉRENTES FORMES DE MASSAGE : UN ESSAI CONTRÔLÉ RANDOMISÉ**

(Kerautret et al., 2021)

#### ARTICLE 4:

Foam rolling elicits neuronal relaxation patterns distinct from manual massage: a randomized controlled trial, Yann Kerautret, Aymeric Guillot, Daligault Sébastien and Franck Di Rienzo (2021), Brain Sci., 11(6), 818.


<https://doi.org/10.3390/brainsci11060818>

#### CONTRIBUTION DES CO-AUTEURS

Les co-auteurs de l'étude sont Yann Kerautret, Aymeric Guillot, Daligault Sébastien et Franck Di Rienzo. Ce travail de recherche a été mis en place lors de discussion entre Yann Kerautret, Aymeric Guillot et Franck Di Rienzo. Le recueil de données a été réalisé par Yann Kerautret au sein des différences au Laboratoire Interuniversitaire de Biologie de la Motricité de Lyon. Le traitement et l'analyse des données ont été menés par Yann Kerautret, Daligault Sébastien et Franck Di Rienzo. L'article a été rédigé par Yann Kerautret, puis Aymeric Guillot et Franck Di Rienzo ont effectué diverses corrections et ont fait part de leurs critiques.

## Article

# Foam Rolling Elicits Neuronal Relaxation Patterns Distinct from Manual Massage: A Randomized Controlled Trial

Yann Kerautret<sup>1,2</sup>, Aymeric Guillot<sup>1,3</sup>, Sébastien Daligault<sup>4</sup> and Franck Di Rienzo<sup>1,\*</sup> 

<sup>1</sup> Laboratoire Interuniversitaire de Biologie de la Motricité, Université Claude Bernard Lyon 1, EA 7424, F-69622 Villeurbanne, France; yann@capsix-robotics.com (Y.K.); aymeric.guillot@univ-lyon1.fr (A.G.)

<sup>2</sup> CAPSIX, 69002 Lyon, France

<sup>3</sup> Institut Universitaire de France, F-75000 Paris, France

<sup>4</sup> CERMEP, Imagerie du Vivant, F-69500 Bron, France; daligault@cermep.fr

\* Correspondence: franck.di-rienzo@univ-lyon1.fr; Tel.: +33-(0)4-7243-1625

**Abstract:** The present double-blinded, randomized controlled study sought to compare the effects of a full-body manual massage (MM) and a foam rolling (FR) intervention on subjective and objective indexes of performance and well-being. A total of 65 healthy individuals were randomly allocated to an FR, MM, or a control group who received a cognitively oriented relaxation routine. Self-report ratings of perceived anxiety, muscle relaxation, and muscle pain were used to index changes in affect and physical sensations. The sit-and-reach and toe-touch tests, as well as a mental calculation task, were used to index motor and cognitive performances, respectively. We also conducted resting-state electroencephalography and continuous skin conductance recordings before and after the experimental intervention. Both FR and MM groups exhibited neural synchronization of alpha and beta oscillations during the posttest. Skin conductance increased from the pretest to the posttest in the relaxation group, but decreased in the FR group. All interventions improved range of motion, although only the MM group outperformed the relaxation group for the toe-touch performance. MM was associated with reduced muscle pain and increased muscle relaxation. Reduced perceived anxiety after the intervention was observed in the FR group only. Overall, MM and FR both improved objective and subjective indexes of performance and well-being. Differences between the two massage interventions are discussed in relation to the effects of pressure stimulation on autonomic regulations and the proactive vs. retroactive nature of FR, compared to MM.

**Keywords:** electroencephalography; electrodermal activity; flexibility; alertness



**Citation:** Kerautret, Y.; Guillot, A.; Daligault, S.; Di Rienzo, F. Foam Rolling Elicits Neuronal Relaxation Patterns Distinct from Manual Massage: A Randomized Controlled Trial. *Brain Sci.* **2021**, *11*, 818. <https://doi.org/10.3390/brainsci11060818>

Academic Editor: Melissa Bowerman

Received: 22 April 2021

Accepted: 15 June 2021

Published: 20 June 2021

**Publisher's Note:** MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



**Copyright:** © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Introduction

Manual massage (MM) refers to a wide range of techniques such as effleurage, petrissage, tapping, friction, and vibration yielding pressures on soft tissues [1–3]. MM has ancestral roots across human civilizations [4]. Beck [5] underlined three main purposes to MM. First, MM can be used to promote a psychophysiological state of relaxation. Second, MM can be used to benefit a variety of health outcomes (e.g., management of pain symptoms). Eventually, MM can be used as a conditioning technique to promote motor performance and recovery [6,7].

MM requires a trained physiotherapist, and only one person can be massaged at the same time, which makes MM a difficult intervention to scale [7]. Additionally, the physiotherapist regulates subtle parameters while performing the massage routine and integrates with real-time patient feedback to adjust his/her gestures. For these reasons, it appears difficult to standardize MM interventions in experimental research protocols [7]. During MM, the massaged person has no control over massage gestures as MM puts the individual in a passive state. Conversely, self-myofascial release techniques, which consist in the self-administration of mechanical pressures on soft tissues using a tool such as a foam roller or a roller massager, require voluntary movement. There is thus

a fundamental distinction between MM and self-myofascial release techniques such as foam rolling (FR). MM engages participants in a primarily retroactive mode of action control, whereas FR emphasizes proactive modes of action control (for a comprehensive review, see [7]). FR has gained popularity in sports and fitness communities and consists of back and forth movements, eliciting pressures and frictions on the soft tissues [7–11]. As MM, FR stimulates proprioceptive organs such as the Golgi tendon organ, Pacinian, Meissner, and Ruffini corpuscles, and interstitial type III and IV receptors [12–14]. Both FR and MM elicit muscle tone relaxation patterns similar to those elicited by myofascial manipulations [14,15]. It is thus suggested that these techniques have the potential to impact autonomic regulations. Nonetheless, presumably due to methodological limitations, direct investigations of the mechanisms underlying the effects of FR remain sparse [7].

Behavioral data suggest that both FR and MM have beneficial effects on range of motion and contribute to alleviate muscle pain [7,9–11,16,17]. Both techniques were found to be associated with decreased tissue stiffness, fibrous adhesions, and scar tissue [18]. Contrary to passive stretching, MM and FR practice during warm-up and recovery routines did not hamper subsequent physical performances [6,7]. They contributed to reduce anxiety, depression, and attenuate hormonal markers of stress responses, as indicated by the concomitant decrease in cortisol and increase in dopamine/serotonin concentrations after MM [19–21]. Heart rate variability measures confirmed a shift from sympathetic to parasympathetic dominance in autonomous nervous system activity as a result of MM and FR [22–25]. The effects of MM eventually appeared to improve cognitive performances, possibly due to a more relaxed and alert psychophysiological state. After a 5-week intervention of MM, Field et al. [19] measured an anxiety reduction and an improvement in mental calculation performances. These results suggest that massage interventions have the potential to affect cognitive states. Using electroencephalography (EEG), Jodo [26] investigated, in a pioneering study, the effects of a facial massage on electric brain potentials. MM was found to be associated with decreased alpha and beta power (see also [19]). MM might thus have elicited a pattern of enhanced alertness, while a pattern of drowsiness was observed in the autogenic training and control groups. Comparable brain rhythms and psychological factors were elicited in elderly people after hand and foot massage [27]. However, conflicting results were found depending on the pressure level and massage type. Diego et al. [28] emphasized that a light pressure massage increased arousal response, while a moderate pressure massage was associated with lower arousal and relaxation. Surprisingly, a comparable relaxing effect also occurred after a unilateral massage [29]. However, to the best of our knowledge, whether such effects might also be obtained after FR remains unknown. This issue is of specific interest considering the proactive nature of FR, compared to MM, with regard to motor control strategies primed for the participant throughout the massage interventions.

In the present experiment, we compared the effects of MM and FR on objective and subjective indexes of performance and well-being. We implemented resting-state EEG measures to investigate the effects of these two interventions on electric brain potentials. We hypothesized that both MM and FR would impact autonomic nervous system regulations through bottom-up regulatory processes in response to the stimulation of proprioceptive organs. Comparable relaxation brain states were expected in the resting state as a result of FR and MM since both techniques are likely to involve comparable pressures on soft tissues. Yet, we hypothesized that improvements in cognitive performances would be reduced after FR. Indeed, the physical and cognitive demands associated with the proactive nature of FR might interfere with the optimal psychophysiological relaxation state.

## 2. Materials and Methods

### 2.1. Participants

In total, 65 healthy adults volunteered to participate in the present experiment (Table 1). Recruitment strategies consisted of poster advertising and personal contact between CrossFit® coaches and practitioners. Inclusion criteria were the regular practice of

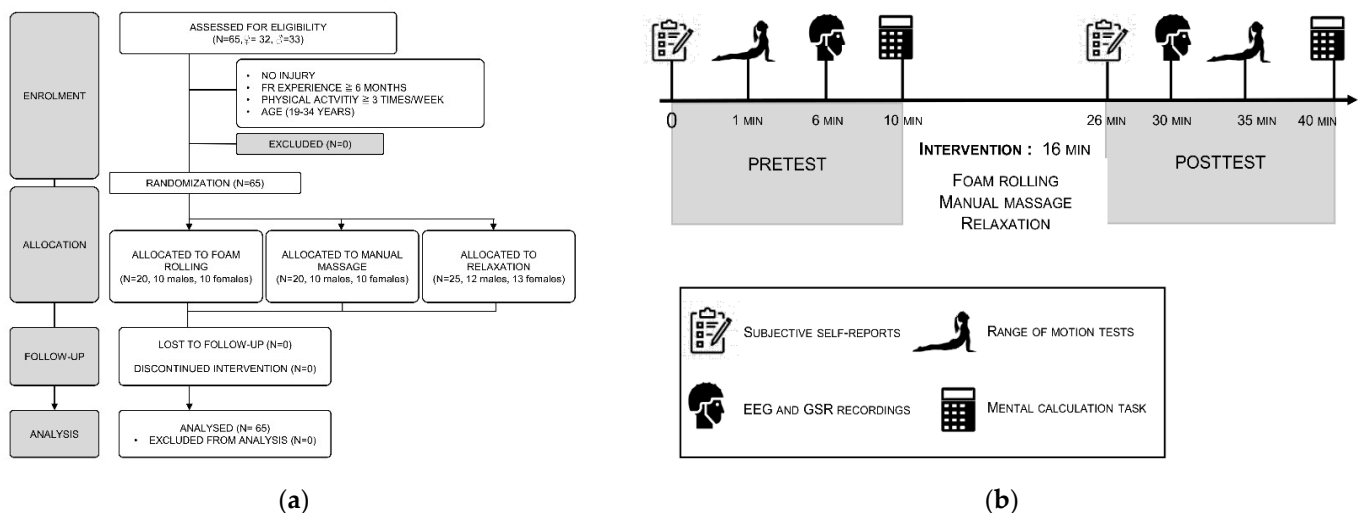
FR (10 min routines, 2–3 times per week over the past 6 months) to ensure proper execution of techniques, especially the pressure level. Participants were free from any chronic medical conditions (including functional limitations) that might affect proprioception and/or pain perception [30]. They were also asked to refrain from physical activity, alcohol, and caffeinated beverages 24 h prior to testing. All participants signed a written informed consent form prior to enrolment. The experiment was approved by the local ethics committee (IRB 2019-A01732-55), and conducted in accordance with the ethical standards laid down in the Declaration of Helsinki and its later amendments [31].

**Table 1.** Baseline characteristics ( $M \pm SD$ ). There were no adverse events and no subjects withdrew from the study. BMI: body mass index.

Characteristics	Age (years)	Height (m)	Mass (kg)	BMI ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )
<b>Relaxation</b>	$25.9 \pm 3.2$ (range 20–34)	$1.71 \pm 10.5$ (range 1.53–1.91)	$67.3 \pm 11.1$ (range 48–98)	$23 \pm 2.3$ (range 19.8–28.8)
<b>Foam Rolling</b>	$26.1 \pm 3.1$ (range 19–31)	$1.73 \pm 7$ (range 1.62–1.83)	$70.9 \pm 10.4$ (range 53–90)	$23.6 \pm 2.4$ (range 19.5–30.1)
<b>Manual Massage</b>	$24.8 \pm 3$ (range 20–32)	$1.72 \pm 12.3$ (range 1.53–1.97)	$70.3 \pm 13.4$ (range 51–95)	$23.6 \pm 2.6$ (range 19–27.8)

## 2.2. Experimental Design

The present double-blinded, randomized controlled trial involved two experimental sessions (Figure 1A) supervised by the same experimenter over an inclusion period of 6 months. Participants first completed a familiarization session before being randomly allocated to one of the experimental groups: (i) relaxation ( $n = 25$ ), (ii) foam rolling ( $n = 20$ ), and (iii) manual massage ( $n = 20$ ) (see below for further descriptions). Then, pretest and posttest measures were implemented. Testing was conducted between 12 a.m. and 6 p.m. The assessor was blinded to the group assignment and remained the same throughout the study to ensure reproducibility of assessment methods.



**Figure 1.** (a) Flowchart (inspired from CONSORT guidelines [32]) describing participants' inclusion and randomization procedures; (b) flowchart of the experimental procedures and measurements. GSR: galvanic skin resistance; EEG: electroencephalography.

### 2.2.1. Familiarization

The familiarization session took place 2 days before the experimental session and was used to collect demographic information (Table 1). The experimenter demonstrated the range of motion tests and neurophysiological measurement procedures, provided instructions regarding the subjective ratings, and explained the mental calculation task.



The purpose of this familiarization was to minimize potential errors and save time between measurements on the day of the experimental session.

### 2.2.2. Foam Rolling Intervention

Participants in the FR group completed a 16 min routine using two commercial tools: a foam roller of 15 × 30 cm length (Blackroll, Bottighofen, Switzerland), and a lacrosse ball (WODFitters, USA). Participants were instructed to perform back and forth movements at a rate of one inch per second, for 60 s and for each target muscle (i.e., feet plantar muscles, triceps surae, hamstrings, quadriceps, hip adductors, iliotibial band, gluteus, inferior and superior spine region). The timing was externally cued by an auditory device to ensure reproducibility. In keeping with the methods emphasized in previous FR experiments [7,10], participants were instructed to regulate the rolling pressure so that the perceived pain would not exceed 7 on a numerical rating scale (NRS) ranging from 0 (“Absence of pain”) to 10 (“Worst possible pain”). The FR routine consisted of unilateral exercises alternatively performed on both legs and bilateral exercises on lower and back muscles. All participants started with their feet in a stand-up position with a lacrosse ball. Then, participants performed on the ground the FR exercises with the foam roller targeting leg and back muscles. FR movements were first performed in a seated position between the Achilles tendon and the popliteal fossa for the triceps surae. Then, between the popliteal fossa and the ischial tuberosity to target hamstrings muscles. Then, participants rolled the quadriceps, hip adductors, and iliotibial band in plank position before returning to a seated position to apply FR to gluteus muscles, between the posterior superior iliac spine and the gluteal fold. They then had to continue the session by lying on their back, arms crossed over their chest, to target superior spine muscles (T9–T1). The last part of the routine consisted of FR inferior spine muscles (T10–L5). To limit excess pressure on the lower back, the exercise was performed in a stand-up position with the foam roller placed between the participant’s back and a wall [33]. The choice of these treatment instructions was based on the systematic review of past experiments in the field to disclose invariants in FR methods [7,34–37].

### 2.2.3. Manual Massage Intervention

Participants in the manual massage group received MM by a professional physiotherapist who was blinded to the purpose of the experiment (20 years of registered practice). Participants were lying in the prone position on a massage table. To facilitate the physiotherapist’s maneuvers, massage oil was used. The MM protocol reproduced several features of the FR intervention, i.e., order of the areas massaged, massage time per muscle, and total duration of the session. Obviously, it was not possible to control pressures applied by the physiotherapist, who was explicitly encouraged to apply usual pressure from classical practice to improve the ecological validity of the findings. The physiotherapist declared that massage pressures were adjusted according to the zones of perceived tension and remained consistent across participants, to fit with real-life massage scenarios.

### 2.2.4. Relaxation Intervention

Participants in the relaxation group listened to a 16 min relaxation audio soundtrack, based on the autogenic training method [38]. Participants were lying on the massage table in a supine position, wearing headphones (Beats Electronics, Culver City, CA, USA). During this desensitization–relaxation technique, they were guided to visualize bodily perceptions of heaviness and warmth in their arms, thorax, and legs. To facilitate concentration, participants were left alone in a dark room.

## 2.3. Dependent Variables

We focused on six dependent variables, all of which were collected before (pretest) and after (posttest) the experimental interventions (Figure 1B). Changes in perceived anxiety and physical sensations (muscle relaxation, warmth, and pain) were collected using Likert-

type scales. Physical performances were measured using the sit-and-reach and toe-touch tests. A mental calculation task was used to index cognitive performances. Brain activity was investigated using resting-state EEG and autonomic nervous system activation using skin conductance (SC).

### 2.3.1. Self-Report Ratings on Likert-Type Scales

Participants were requested to provide self-report ratings on a Likert-type scale ranging from 0 (“Not at all”) to 10 (“Very strong”). They provided subjective ratings of their perceived general state of anxiety (“How anxious are you feeling right now?”), and their perceived muscle sensations. We first indexed the subjective perception of muscle relaxation (“What is your level of overall muscle relaxation right now?”), warmth (“What is your level of overall muscle warmth?”), and pain (“What is your level of overall muscle pain?”).

### 2.3.2. Motor and Cognitive Performances

We evaluated the range of motion of lower back and hamstrings muscles using the sit-and-reach test (SRT), followed by the toes touch (TT) test [39,40]. For the SRT, participants adopted a seated position with their feet, hip-width apart, and the knees extended. Then, they were instructed to lean forward slowly and gradually, without bouncing, and try to reach as far as possible with their hands on the tape measure. For the TT test, participants started from the stance on a wooden box. Legs were outstretched with feet hip-width apart. Unlike the SRT, they had to tilt the chest forward using gravity. The best score of the three trials was recorded to the nearest 0.1 cm, for both ranges of motion tests. For the trial attempt, they were instructed to hold their maximal stretching position for 2 s [41].

To index cognitive performances, we used a mental calculation task. Performance in mental calculation paradigms was positively affected in past research by massage therapy, aromatherapy, or Tai chi/yoga interventions [19,42,43]. The task consisted of iterated subtractions (−7) from a starting number randomly selected between 500 and 1000. The participants had 120 s to execute the maximal number of correct subtractions (i.e., the total number of correct answers). To avoid contamination effects on other dependent variables, including EEG and electrodermal recording, this stressful task was performed at the end of the pretest and posttest assessments [44].

### 2.3.3. Electroencephalography

Electric brain potentials were measured at rest using EEG (rsEEG). Brain electric potentials were recorded for 4 min, during both the pretest and the posttest. To limit artifacts caused by postural changes and eye movements, participants seated in a chair and kept their eyes open, staring at a cross mark placed at sight’s height. They were asked to focus on the cross mark while remaining motionless, limiting eye blinks, and not focusing their attention on anything specific for 4 min. EEG was recorded using 16 Ag-AgCl electrodes attached on a Lycra stretchable cap according to the international 10–20 system (MLAEC2 Electro-cap system 2, ADInstrument, Dunedin, New Zealand). Electrode gel was injected to keep the impedance below 5 k $\Omega$  at the following scalp sites: FP1, FP2, F3, Fz, F4, C3, Cz, C4, TP7, CP3, CP4, TP8, P3, and P4 sensors. Two additional electrodes were positioned as reference points to facilitate artifact scoring, one on the right internal canthus and the second on the right acromion. All electrodes were connected to the input box of the EEG recording system, two Octal Bio Amp (FE238, Octal Bio Amp, ADInstrument, Dunedin, New Zealand) and one Power Lab 16/35 data acquisition system (PL3516, Power Lab 16/35, ADInstrument, Dunedin, New Zealand). The EEG software used in this experiment was LabChart Pro (ADInstrument, Dunedin, New Zealand).

Data preprocessing was performed using Brainstorm [45], which is documented and freely available for download online under the GNU general public license (<https://neuroimage.usc.edu/brainstorm>, accessed on 18 June 2021). EEG data were first referenced relative to the Cz electrode and a bandpass filter was applied (0.5–60 Hz). Brainstorm

algorithms were then applied to automatically detect signal portions containing muscle and eye blinks activities. Visual inspection of the results of the automatic detection phase completed the artifact detection procedure. rsEEG recordings were finally epoched in 1 s time windows. Epochs containing artifacts were removed from the following steps of data analysis (i.e., 11.2% rejection rate).

We calculated the power spectrum densities for each epoch in the alpha (8–12 Hz) and beta (13–30 Hz) frequency bands (Welch’s method, fixed time window). These frequency domains were emphasized for their relevance in the study of sensorimotor processes [46,47]. Power spectrum densities were finally averaged for each participant and experimental condition to quantify rsEEG power over the course of the 4 min. We were specifically interested in power changes from the pretest to the posttest within the predetermined frequency domains of interest across the resting-state time window. Neural synchronizations corresponds to an increase in signal power for a given frequency range, whereas desynchronization patterns (i.e., desynchronization) or inhibition (synchronization) decrease [48,49].

#### 2.3.4. Electrodermal Activity

We investigated the electrodermal activity from continuous SC recordings. Two-finger electrodes (MLT116F, GSR Finger Electrodes, ADInstruments, Dunedin, New Zealand) with constant voltage (0.5 V) were positioned on the second phalanx of the second and third fingers of the right hand. Signals were processed online using a galvanic skin resistance amplifier (FE116 GSR Amp, ADInstruments, Dunedin, New Zealand) connected to a PowerLab 16/35 acquisition system. Data were coregistered with EEG signals using the LabChart Pro acquisition software. SC mirrors the activity of eccrine sweat glands, which are under the unique control of the sympathetic branch of the autonomous nervous system. Tonic changes reflect variations in physiological arousal, whereas phasic changes primarily reflect cognitive changes such as increased vigilance during motor preparation [50]. Here, we were interested in participants’ physiological arousal during the pretest and posttest resting-state measures. Hence, we first recorded the baseline SC, i.e., before the onset of the resting state period. Then, we continuously recorded SC over the 4 min resting-state period. To index the general physiological arousal, we finally calculated a normalized SC index (SCNorm) according to the following formula:

$$SC_{Norm} = \frac{\text{mean}(\text{Resting State SC})}{\text{Baseline SC}} \quad (1)$$

### 3. Statistical Analysis

#### 3.1. Power/Sample Size Considerations

We did not run a priori power calculation. We determined the sample size based on previous trials addressing the efficacy of self-myofascial release interventions [26,28,29]. We accounted for the fact that randomized control trial designs involving between-group comparisons usually require larger sample sizes (4–8 fold) than designs involving within-group comparisons to achieve the same statistical power [51]. Randomized control trial designs investigating the effects of FR usually involve 10–15 participants [52–54]. Hence, 65 participants ( $n > 20$  for each experimental group) was expected to constitute a reliable sample size. To overcome remaining power limitations, we ran a posteriori power calculations for statistically significant main and interaction effects using the pwrpackage in R [55].

#### 3.2. Randomization

We performed group assignments using full-blind randomization, i.e., simple randomization [56]. We generated random allocation sequences in males and female participants. To grant allocation concealment, the random sequence was matched to the predetermined list of male and female participants corresponding to their inclusion order.

### 3.3. Data Analysis

We used nlme [57] to run a linear mixed-effects analysis (with by-subjects random intercepts) of the dependent variables. We built the random-coefficient regression models and entered GROUP (foam rolling, manual massage, relaxation) and TEST (pretest, posttest) as the fixed effects (with interaction term). For the range of motion data, we included the fixed effects of TEST TYPE (toe touch, sit-and-reach) in the model. For changes in affect and physical pain measures, we, respectively, added the fixed effect of VARIABLE TYPE (i.e., muscle pain, muscle relaxation, muscle warmth). For the EEG power analysis, we included the fixed effects of SENSOR (F3, F4, C3, C4, P3, P4) and FREQUENCY BAND (Alpha, Beta). The statistical threshold was set up for a type 1 error rate of 5%. As effect sizes, we reported the proportion of explained variation (partial coefficients of determination, RP2). RP2 values were calculated using the ad hoc procedure for linear mixed-effects models implemented in the effectsize package [58]. Main and interaction effects were investigated post hoc using general linear hypotheses testing of planned contrasts from the multcomp package. We applied Holm's sequential corrections to control the false discovery rate [59].

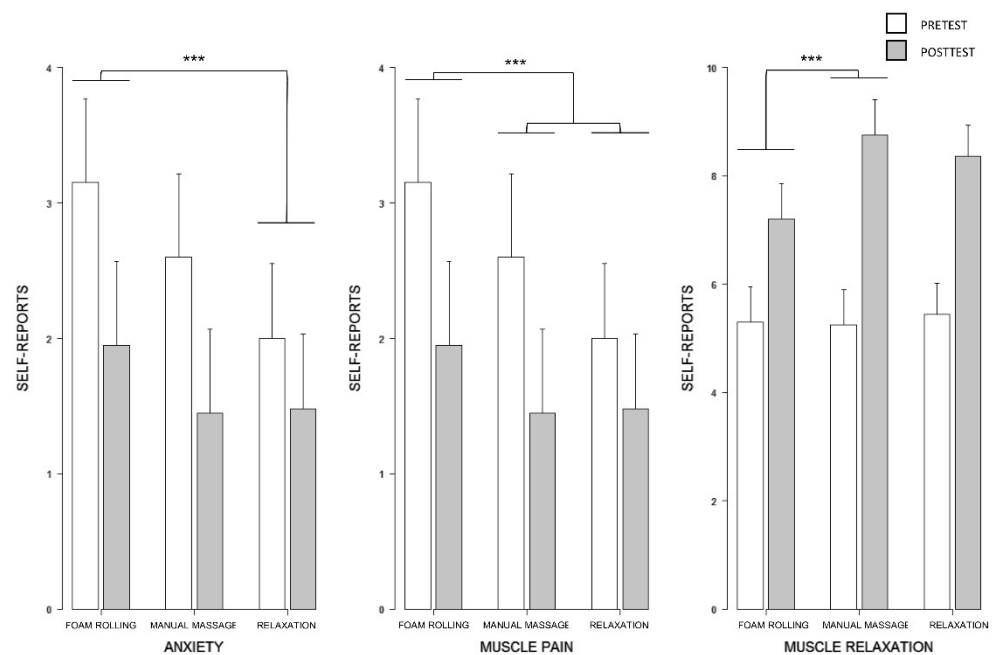
## 4. Results

Demographic information for each experimental group is provided in Table 1.

### 4.1. Change in Subjective Scores

#### 4.1.1. Anxiety Ratings

The TEST by GROUP interaction affected the subjective scores for perceived anxiety on the NRS ( $F(2,62) = 2.85, p < 0.05, R_p2 = 0.08, p1-\beta = 0.50$ ) (Figure 2). Post hoc analyses revealed that the decrease in anxiety ratings from the pretest to the posttest in the foam rolling group (pretest: 3.15, 95% CI [2.53,3.77]; posttest: 1.95, 95% CI [1.33,2.57]) was greater than that recorded in the relaxation group (pretest: 2.00, 95% CI [1.45,2.55]; posttest: 1.48, 95% CI [0.93,2.03]) ( $p < 0.05$ ). There was no difference between the foam rolling and manual massage groups (pretest: 2.60, 95% CI [1.98,3.22]; posttest: 1.45, 95% CI [0.83,2.07]), nor between the pretest to posttest differences observed in the manual massage, compared to the relaxation, group ( $p > 0.05$ ).



**Figure 2.** Barplot of the TEST  $\times$  GROUP interaction effects obtained for subjective scores. Average fitted values by the linear mixed-effects analysis are presented with 95% confidence intervals (dotted bars). \*\*\*  $p < 0.001$ .

#### 4.1.2. Muscle Relaxation, Warmth, and Pain Ratings

The TEST by GROUP interaction affected overall muscle relaxation ratings ( $F(2,62) = 4.67$ ,  $p < 0.01$ ,  $Rp2 = 0.13$ ,  $p1-\beta = 0.48$ ). Post hoc analyses revealed that participants reported a lower increase in perceived muscle relaxation from the pretest to the posttest in the foam rolling group (pretest: 5.30, 95% CI [4.65,5.95]; posttest: 7.20, 95% CI [6.55,7.85]), compared to the manual massage group (pretest: 5.25, 95% CI [4.60,5.90]; posttest: 8.75, 95% CI [8.10,9.40]) ( $p > 0.01$ ). No such difference was present between manual massage and relaxation groups (pretest: 5.44, 95% CI [4.86,6.02]; posttest: 8.36, 95% CI [7.78,8.94]), nor between foam rolling and relaxation groups (both  $p > 0.05$ ) (Figure 2).

The perceived muscle warmth was not affected by the GROUP by TEST interaction, but by a main effect of TEST ( $F(1,62) = 8.11$ ,  $p < 0.01$ ,  $Rp2 = 0.12$ ,  $p1-\beta = 0.55$ ). Posttest ratings (4.58, 95% CI [4.17,5.00]) were higher, compared to the pretest (5.26, 95% CI [4.85,5.68]) ( $p < 0.01$ ).

The TEST  $\times$  GROUP interaction affected perceived overall muscle pain scores on the NRS ( $F(2,62) = 11.00$ ,  $p < 0.001$ ,  $Rp2 = 0.26$ ,  $p1-\beta = 0.62$ ). Post hoc analyses revealed that participants experienced an increase in perceived muscle pain from the pretest to the posttest in the foam rolling group (pretest: 1.15, 95% CI [0.82,1.48]; posttest: 1.75, 95% CI [1.42,2.08]), whereas reduced pain scores were observed in the massage (pretest: 1.70, 95% CI [1.37,2.03]; posttest: 1.15, 95% CI [0.82,1.48]) and relaxation (pretest: 1.52, 95% CI [1.23,1.81]; posttest: 1.28, 95% CI [0.99,1.57]) groups (Figure 2).

### 4.2. Cognitive and Motor Performances

#### 4.2.1. Mental Calculation

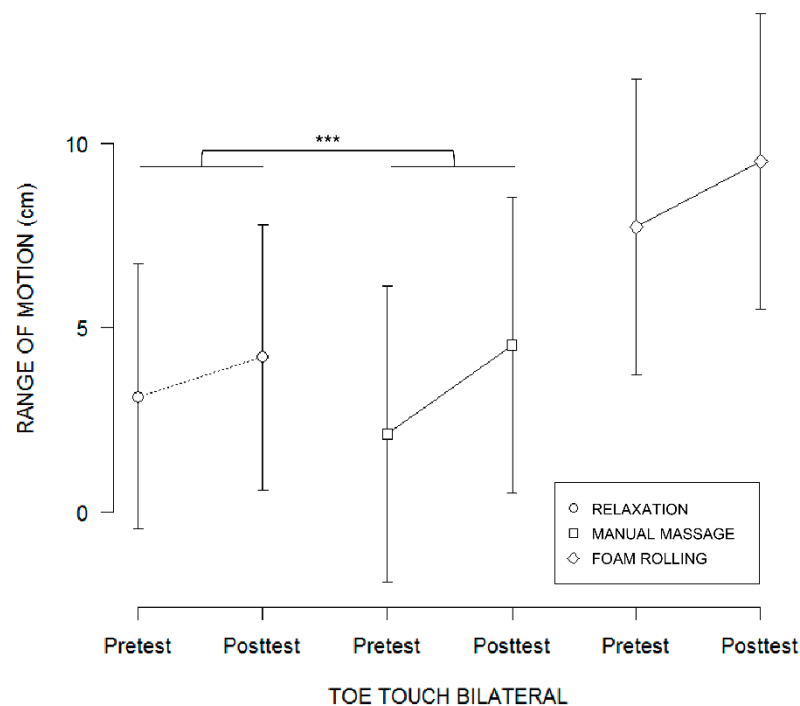
There was no TEST by GROUP interaction and no main GROUP effect on the total number of correct responses. However, we found a TEST effect ( $F(1,62) = 24.82$ ,  $p < 0.001$ ,  $Rp2 = 0.29$ ,  $p1-\beta = 0.80$ ). The number of correct answers increased from the pretest to the posttest (pretest: 20.75, 95% CI [18.15, 23.36]; posttest: 23.57, 95% CI [20.97,26.17]) ( $p < 0.001$ ).

#### 4.2.2. Sit-and-Reach Data

The GROUP by TEST interaction did not affect SRT performances but the linear mixed effects analysis revealed a main effect of TEST ( $F(1,62) = 44.85$ ,  $p < 0.001$ ,  $Rp2 = 0.42$ ,  $p1-\beta = 0.95$ ). SRT performance increased from the pretest to the posttest (pretest: 3.63, 95% CI [1.80,5.46]; posttest: 5.75, 95% CI [3.93,7.58]) ( $p < 0.001$ ). There was no main GROUP effect ( $p > 0.05$ ).

#### 4.2.3. Toe-Touch Data

TT performance was affected by the TEST by GROUP interaction ( $F(2,60) = 4.58$ ,  $p < 0.01$ ,  $Rp2 = 0.13$ ,  $p1-\beta = 0.46$ ). Post hoc analyses revealed that participants reported a greater increase in TT performance from the pretest to the posttest in the manual massage group (pretest: 2.11, 95% CI [-1.92,6.13]; posttest: 4.53, 95% CI [0.50,8.55]) than in the relaxation group (pretest: 3.13, 95% CI [-0.47,6.73]; posttest: 4.20, 95% CI [0.60,7.79]) ( $p < 0.01$ ) (Figure 3). There was no difference between foam rolling (pretest: 7.74, 95% CI [3.72,11.76]; posttest: 9.53, 95% CI [5.50,13.55]) and manual massage groups, nor between foam rolling and relaxation groups (all  $p > 0.05$ ) (Figure 3). The linear mixed-effect analysis also revealed that the main effect of TEST affected TT performance ( $F(1,60) = 86.70$ ,  $p < 0.001$ ,  $Rp2 = 0.59$ ,  $p1-\beta = 0.99$ ), by an increase from the pretest to the posttest (pretest: 4.23, 95% CI [2.00,6.46]; posttest: 5.94, 95% CI [3.70,8.17]) ( $p < 0.001$ ).



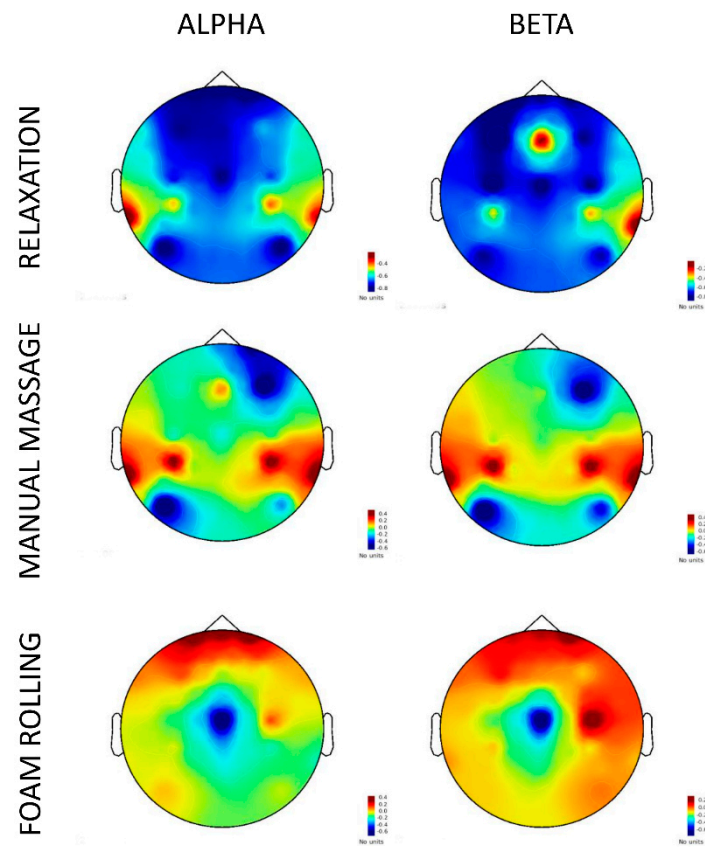
**Figure 3.** Fitted values for the TEST\*GROUP interaction effect on range of motion revealed by the linear mixed-effects analysis, represented with 95% confidence intervals (error bars). \*\*\*  $p < 0.001$ .

#### 4.3. Neurophysiological Data

##### 4.3.1. EEG Power Analysis

Spatial distributions of EEG power values in the sensors–space are provided in Figure 4. EEG power values were affected by the GROUP by TEST interaction ( $F(2,1412) = 3.33$ ,  $p = 0.03$ ,  $R_p2 = 0.02$ ,  $p1-\beta = 0.99$ ). Post hoc analyses revealed that the difference from the pretest to the posttest in the foam rolling group (pretest:  $0.15 \mu V^2$ , 95% CI [0.04, 0.25]; posttest:  $0.16 \mu V^2$ , 95% CI [0.06, 0.26]) was reduced compared to that observed in the relaxation group (pretest:  $0.33 \mu V^2$ , 95% CI [0.25, 0.41]; posttest:  $0.29 \mu V^2$ , 95% CI [0.20, 0.35]) ( $p < 0.03$ ) (Figure 4). Likewise, the difference from the pretest to the posttest in the manual massage group (pretest:  $0.23 \mu V^2$ , 95% CI [0.18, 0.28]; posttest:  $0.22 \mu V^2$ , 95% CI [0.16, 0.27]) was reduced compared to the relaxation group ( $p < 0.05$ ).

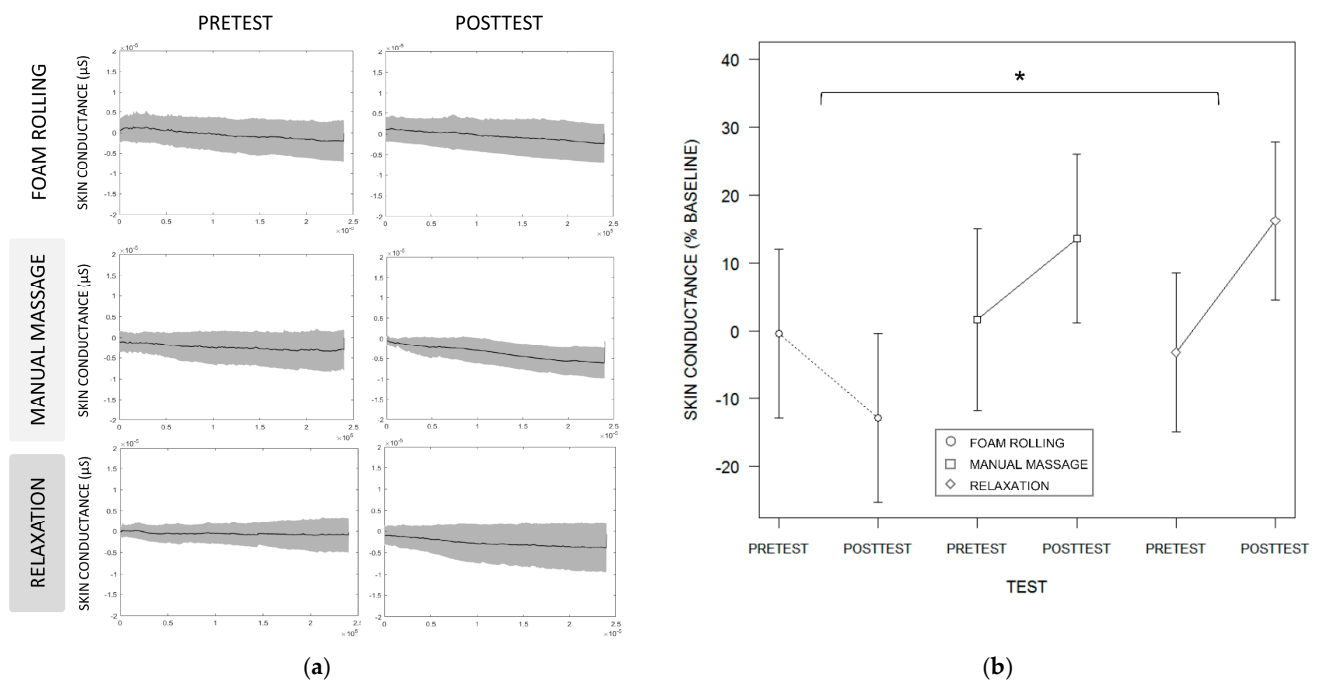
The linear mixed-effects analysis also revealed a main BAND ( $F(1,1412) = 453.89$ ,  $p < 0.001$ ,  $R_p2 = 0.18$ ,  $p1-\beta > 0.95$ ) and SENSOR effects ( $F(11,1412) = 6.13$ ,  $p < 0.001$ ,  $R_p2 = 0.24$ ,  $p1-\beta = 1$ ). Alpha power ( $0.33 \mu V^2$ , 95% CI [0.29, 0.37]) was higher than Beta power ( $0.14 \mu V^2$ , 95% CI [0.09, 0.18]) ( $p < 0.001$ ). Power analyses eventually revealed greater power values in frontal (FP1, FP2, F3, F4, and Fz sensors) than parietal regions (CP3, CP4, P3, and P4 sensors) (all  $p < 0.01$ ).



**Figure 4.** Spatial distribution within the sensors–space of the pretest vs. posttest normalized difference in EEGs power across alpha (8–12 Hz) and beta (13–30 Hz) frequency ranges  $((A - B)/(A + B))$ . Noteworthy, neural synchronization was primarily detected from parietal sensors for MM and frontal sensors for FR.

#### 4.3.2. Skin Conductance

The linear mixed effects analysis revealed that the two-way interaction between TEST and GROUP affected the SCNorm ( $F(2,38) = 3.80, p = 0.03, R^2 = 0.17, p(1-\beta) = 0.60$ ). Post hoc analyses revealed that the pretest vs. posttest difference in the foam rolling group exhibited a decrease pattern (pretest:  $-0.39\%$ , 95% CI  $[-12.83, 12.04]$ ; posttest:  $-12.86\%$ , 95% CI  $[-25.30, -0.42]$ ), whereas an increase pattern was present in the relaxation group (pretest:  $-3.20\%$ , 95% CI  $[-14.89, 8.49]$ ; posttest:  $16.20\%$ , 95% CI  $[4.52, 27.89]$ ) (Figure 5). The difference between the foam rolling and the manual massage (pretest:  $1.63\%$ , 95% CI  $[-11.73, 14.99]$ ; posttest:  $16.64\%$ , 95% CI  $[1.20, 26.09]$ ) groups did not reach the statistical significance threshold ( $p = 0.12$ , NS), while there was no difference between manual massage and relaxation groups ( $p = 0.95$ , NS).



**Figure 5.** (a) Group average (SD) for the time course of skin conductance values during the pretest and posttest resting-state recordings; (b) fitted values revealed by the linear mixed effects analysis for the TEST  $\times$  GROUP interaction on skin conductance, represented with their 95% confidence intervals (error bars). \*  $p < 0.05$ .

## 5. Discussion

This study compared the effects of FR and MM on subjective and objective indexes of performance and well-being. To the best of our knowledge, this is the first study comparing the effects of FR and MM in a single experimental design including EEG. Compared to the relaxation group, FR and MM groups exhibited distinct EEG patterns, as revealed by resting-state power values recorded in the sensors–space. All interventions were associated with improvements in range of motion and cognitive performances. FR and MM interventions had selective impacts on subjective ratings of well-being. MM positively impacted muscle sensations, whereas FR was associated with reduced general anxiety. It is noteworthy that the present trial was underpowered for effects with a low to medium effect size. A posteriori power calculation indicates that replication experiments should consider a sample of 30 participants per group to achieve adequate statistical power across all comparisons. Overall, present results add to the body of evidence suggesting that the acute effects of FR and MM benefit objective and subjective indexes of performance and well-being, despite their distinct demands in terms of motor control strategies [7].

Participants receiving MM remain passive and motionless, which promotes relaxation states but also emphasizes retroactive modes of action control [7]. On the contrary, FR requires voluntary actions and attentional focus on the components of the routine, which emphasizes proactive modes of action control [7]. Despite these fundamental distinctions, both interventions yielded increased synchronization of alpha and beta oscillations, compared to the relaxation condition. This resting-state pattern was early associated with a neurophysiological state of relaxation [26]. Our results first corroborate past reports indicative of relaxation brain states in response to massage experiments [28,60,61]. FR and MM interventions both involved mechanical pressures on soft tissues. Mechanical pressures on the skin, muscles, and fascia, exerted by the hands of a physiotherapist or an FR tool, activate interstitial receptors type III, IV, and Ruffini corpuscles. This can result in bottom-up homeostatic downregulations of the muscle tone [7,12,14,18]. The effect of mechanical pressures on sympathetic/parasympathetic regulation is a plausible account of EEG relaxation patterns [7,12,14,18]. The topography of alpha and beta power between the



pre- and posttest further exhibited a distinct profile in the FR and MM groups. Synchronization was primarily detected from frontal sensors for FR and parietal sensors for MM. This is congruent with an assumption of homeostatic regulations in response to both types of intervention. Due to its proactive nature, FR might engage to a greater degree frontal region during the intervention, whereas MM might put a specific emphasis on parietal networks specialized in the sensory integration of peripheral feedbacks [62–64]. EEG data thus indicated that the proactive nature of FR could result in qualitatively different relaxation brain states, compared to MM. This is corroborated by skin conductance data, which revealed increased physiological arousal during the posttest compared to the pretest during FR, whereas reduced physiological occurred from the pretest to the posttest in the MM and autogenic relaxation groups. This again fits a homeostatic regulation pattern, where the respective proactive and retroactive demands of FR and MM are reflected in a respective upregulation of the sympathetic/parasympathetic branch of the autonomic nervous system [6,18]. The neural synchronization patterns observed as a result of FR and MM were absent in the autogenic relaxation intervention. Autogenic relaxation elicited a neural desynchronization pattern typically associated with perceptual and judgment tasks, rather than relaxation [49,65]. This could be due to the nature of cognitive resources mobilization and the participant's inexperience of autogenic training, compared to MM and FR. Pfurtscheller and Lopes da Silva [49] emphasized that an increase of task complexity or attention results in an increased magnitude of neural desynchronization. Autogenic relaxation is a cognitively oriented (top-down) relaxation method, whereas MM and FR belong to autonomically oriented (bottom-up) relaxation techniques, in the framework for relaxation interventions laid down by Lehrer [66]. During this relaxation condition, participants pay specific attention to body sensations and breathing movements [67,68]. The autogenic training routine further involves various forms of motor imagery, i.e., the voluntary build-up of motor representations from proprioceptive and/or visual information stored within procedural memory [69,70]. Motor imagery involves cortical activation patterns during mental representation as well as during the subsequent resting-state periods [70–72]. Involvement of motor imagery during autogenic relaxation, but not during FR and MM, might thus account for the differences observed in the synchronization patterns of resting-state neural oscillations.

Motor performances indexed from range-of-motion measurements is a physical quality commonly targeted by massage interventions [73,74]. All groups improved their stretching performances. Possibly, the relaxation condition in the present study failed to depart from MM and FR, compared to a strict no-intervention condition. Indeed, while autogenic relaxation does not involve mechanical pressure on soft tissues, improvement in body awareness has the potential to reduce muscle tension and improve flexibility [70]. Autonomic regulation of the muscle tone indeed plays a key role in flexibility performance and was associated with neural synchronization patterns in past massage interventions [12,75]. Crommert et al. [76] observed, using ultrasound shear wave elastography, that the effects of massage interventions on muscle stiffness returned to basal level after 3 min. Here, the end of the massage intervention was separated from range of motion tests by 4 min, which were allocated to the resting state recordings. This time delay could have attenuated the effects of the intervention. As for SRT, TT performances increased from the pretest to the posttest in all groups. Yet, improvements in the MM group outperformed those recorded in the relaxation group, while there was no difference between the FR and relaxation groups. We thus postulate that the physiotherapist's expertise represents a crucial factor for efficient stimulation of proprioceptive organs, compared to FR pressure [7]. Moraska [77] provided evidence that therapists with 950 h of didactic training achieved significantly better results than with 450 or 700 h of training. MM by a physiotherapist enables a greater variety of movements, thus promoting more precise regulation of pressure points in the three dimensions, compared to FR. The FR tools are limited to on-dimension trajectories and thus have a possibly reduced impact on autonomic regulations of muscle tone. We hypothesize that increased physical and cognitive demands associated with active FR, compared to

passive MM and relaxation interventions, could have interfered with cognitive performances, as underlined in previous research (for an overview, see [7]). Performances on the mental calculation task improved across all experimental groups, which refutes our working hypothesis. Progress in the relaxation group prevents from drawing firm conclusions regarding the benefits of FR and MM on cognitive performances. Yet, improvements from the pre- to the posttest could purely reflect task habituation. Cognitively oriented relaxation routines, such as autogenic training, were indeed shown to improve cognitive performances [78]. MM and FR, which belong to the category of autonomically oriented relaxation methods, could hence be considered as equally beneficial as cognitively oriented relaxation methods on cognitive performances.

FR and MM both affected participants' subjective reports. FR, but not MM, was further associated with reduced perceived anxiety. However, FR was also associated with increased pain and reduced perceived relaxation, compared to MM. MM thus appeared more effective than FR to improve overall perceived muscle sensations. This is in keeping with differences between FR and MM observed for range of motion and suggests a more efficient stimulation of the soft tissues during MM. The gestures of the physiotherapist appear to outperform self-administration of pressures through FR, although FR presents the advantage of greater reproducibility and reduced reliance on external intervention. Understanding why FR promoted a reduction of the perceived anxiety while concomitantly being associated with reduced beneficial effects on muscle sensations is not straightforward. A first hypothesis is that the proactive nature of FR emphasized the mind–body connection, which is a critical factor contributing to emotional release in massage therapy [79]. A more speculative hypothesis is that FR yields pressures up to 516 mm/Hg, which is fivefold greater than pressures elicited during MM (100 mm/Hg) [7,80,81] and was here associated with higher pain discomfort. Past research emphasized that pain perception is likely to shortcut the allocation of attentional resources to internal states [82]. Psychobiological models of fatigue emphasized that sensorial systems tend to allocate more attentional resources to the perception of effort than to external/environmental factors [83]. FR possibly acted as a distracting agent from the general anxiety state due to increase pain in response to more intense pressure stimulation.

As with all research, there are several limitations to consider before drawing final conclusions. First, the present design did not involve a no-intervention group. We prioritized controlling for the relaxation effects of the massage interventions by administering a cognitively orientated relaxation routine that did not involve pressure stimulation on the soft tissues [84–86]. Rather than a no-intervention group, we opted for a more discriminant form of control intervention, which appeared a higher methodological standard to discriminate the effects of autonomically oriented vs. cognitively oriented relaxation interventions [66]. Nonetheless, a no-intervention control group would enable to control for learning/task habituation effects from the pretest to the posttest. This particularly applies to the evaluations of cognitive and motor performances using a mental calculation paradigm and standardized flexibility tests where progress from the pretest to the posttests was present in all groups. This might reflect task habituation rather than the effect of the experimental interventions. However, habituation effects cannot account for interaction effects indicating distinct response profiles from the pretest to the posttest between experimental groups. A second limitation relates to the randomization procedure. The simple randomization yielded a different number of participants across groups. Simple randomization is preferable for experimental designs involving larger sample sizes, where it can be trusted to generate a similar number of participants per group [56]. Block randomization would have been a more appropriate methodological approach to allocate participants randomly to FR, MM, and relaxation groups while simultaneously minimizing sample size differences across groups.

## 6. Conclusions

FR and MM both positively impacted the flexibility of posterior chain muscles and cognitive performances on a mental calculation task. However, their effects remain difficult to dissociate from those resulting from a cognitively oriented relaxation routine that did not involve pressures on soft tissues. Although FR and MM groups exhibited distinct patterns profiles of resting-state activity, both interventions promoted brain states of relaxation, characterized by alpha and beta synchronizations in the frontal and parietal region, respectively [19,28,87–89]. Conversely, a desynchronization was observed after autogenic training. Similar to others before us, we suggest that the effects of MM and FR may involve autonomic nervous system regulations as a result of the bottom-up stimulation of proprioceptive organs as a result of mechanical pressures [12,13]. From a practical standpoint, present results seem to support the hypothesis that MM and FR are relevant to promote recovery in athletic populations [6,90,91]. FR and MM should, however, certainly not be restricted to high-level athletes. Sedentary people and patients suffering from depression/anxiety could benefit as well from regular MM and FR, considering their potential effects on subjective and objective indexes of performance and well-being [7]. Spurred by present findings, examining the therapeutic relevance of FR interventions in clinical populations definitely represents a promising research avenue.

**Author Contributions:** Conceptualization, Y.K., A.G. and F.D.R.; data curation, Y.K., S.D. and F.D.R.; formal analysis, Y.K., S.D. and F.D.R.; investigation, Y.K.; methodology, Y.K., S.D. and F.D.R.; project administration, A.G.; software, S.D.; supervision, A.G. and F.D.R.; validation, A.G. and F.D.R.; visualization, F.D.R.; writing—original draft preparation, Y.K.; writing—review and editing, A.G. and F.D.R. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research was funded by the University of Claude Bernard Lyon 1 and the company Capsix Robotics.

**Institutional Review Board Statement:** The study was conducted according to the guidelines of the Declaration of Helsinki and approved by the Ethics Committee (IRB 2019-A01732-55).

**Informed Consent Statement:** Informed consent was obtained from all subjects involved in the study. Written informed consent has been obtained from the patient(s) to publish this paper.

**Data Availability Statement:** The datasets used and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## References

1. Guimberteau, J.C. *Promenades Sous La Peau*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2004; ISBN 978-2-84299-649-9.
2. Standley, R.A.; Miller, M.G.; Binkley, H. Massage's Effect on Injury, Recovery, and Performance: A Review of Techniques and Treatment Parameters. *Strength Cond. J.* **2010**, *32*, 64–67. [[CrossRef](#)]
3. Guimberteau, J.C.; Findley, T.W.; Kapandji, A.I.; Armstrong, C. *L'architecture Du Corps Humain Vivant: Le Monde Extracellulaire, Les Cellules et Le Fascia Révélés Par l'endoscopie Intratissulaire*; Ed Sully: Vannes, France, 2016; ISBN 978-2-35432-200-7.
4. Estradère, J.D.J. *Du Massage Son Historique, Ses Manipulations, Ses Effets Physiologiques et Thérapeutiques*; Delahaye: Paris, France, 1863.
5. Beck, M.F. *Theory and Practice of Therapeutic Massage*, 5th ed.; Milady Publishing Compagny: Albany, NY, USA, 2010; ISBN 1-133-01086-5.
6. Weerapong, P.; Hume, P.A.; Kolt, G.S. The Mechanisms of Massage and Effects on Performance, Muscle Recovery and Injury Prevention. *Sports Med.* **2005**, *35*, 235–256. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
7. Kerautret, Y.; Di Rienzo, F.; Eyssautier, C.; Guillot, A. Selective Effects of Manual Massage and Foam Rolling on Perceived Recovery and Performance: Current Knowledge and Future Directions toward Robotic Massages. *Front. Physiol.* **2020**, *11*, 1567. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
8. Freiwald, J.; Baumgart, C.; Kühnemann, M.; Hoppe, M.W. Foam-Rolling in Sport and Therapy—Potential Benefits and Risks: Part 1—Definitions, Anatomy, Physiology, and Biomechanics. *Thema Konsero. Ther. Sportorthopädie* **2016**, *32*, 258–266. [[CrossRef](#)]
9. Guillot, A.; Kerautret, Y.; Queyrel, F.; Schobb, W.; Di Rienzo, F. Foam Rolling and Joint Distraction with Elastic Band Training Performed for 5–7 Weeks Respectively Improve Lower Limb Flexibility. *J. Sports Sci. Med.* **2019**, *18*, 160–171.

10. Kerautret, Y.; Guillot, A.; Di Rienzo, F. Evaluating the Effects of Embedded Self-Massage Practice on Strength Performance: A Randomized Crossover Pilot Trial. *PLoS ONE* **2021**, *16*, e0248031. [[CrossRef](#)]
11. Kerautret, Y.; Guillot, A.; Eyssautier, C.; Gibert, G.; Di Rienzo, F. Effects of Self-Myofascial Release Interventions with or without Sliding Pressure on Skin Temperature, Range of Motion and Perceived Well-Being: A Randomized Control Pilot Trial. *BMC Sports Sci Med Rehabil.* **2021**, *13*, 43. [[CrossRef](#)]
12. Schleip, R. Fascial Plasticity—A New Neurobiological Explanation: Part 1. *J. Bodyw. Mov. Ther.* **2003**, *7*, 11–19. [[CrossRef](#)]
13. Schleip, R. Fascial Plasticity—A New Neurobiological Explanation Part 2. *J. Bodyw. Mov. Ther.* **2003**, *7*, 104–116. [[CrossRef](#)]
14. Wilke, J.; Müller, A.-L.; Giesche, F.; Power, G.; Ahmedi, H.; Behm, D.G. Acute Effects of Foam Rolling on Range of Motion in Healthy Adults: A Systematic Review with Multilevel Meta-Analysis. *Sports Med.* **2020**, *50*, 387–402. [[CrossRef](#)]
15. Schleip, R.; Müller, D.G. Training Principles for Fascial Connective Tissues: Scientific Foundation and Suggested Practical Applications. *J. Bodyw. Mov. Ther.* **2013**, *17*, 103–115. [[CrossRef](#)]
16. Kaur, P. Comparative Study of Myofascial Release Technique and Transverse Friction Massage with Thermotherapy in Cervical Trigger Points. *Int. J. Sci. Res.* **2019**, *8*, 75–76.
17. Leivadi, S.; Hernandez-Reif, M.; Field, T.; O'Rourke, M.; D'Arienzo, S.; Lewis, D.; del Pino, N.; Schanberg, S.; Kuhn, C. Massage Therapy and Relaxation Effects on University Dance Students. *J. Dance Med. Sci.* **1999**, *3*, 108–112.
18. Behm, D.G.; Wilke, J. Do Self-Myofascial Release Devices Release Myofascia? Rolling Mechanisms: A Narrative Review. *Sports Med.* **2019**, *49*, 1173–1181. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
19. Field, T.; Ironson, G.; Scafidi, F.; Nawrocki, T.; Goncalves, A.; Burman, I.; Pickens, J.; Fox, N.; Schanberg, S.; Kuhn, C. Massage Therapy Reduces Anxiety and Enhances Eeg Pattern of Alertness and Math Computations. *Int. J. Neurosci.* **1996**, *86*, 197–205. [[CrossRef](#)]
20. Field, T.; Hernande-Reif, M.; Diego, M.; Schanberg, S.; Kuhn, C. Cortisol Decreases and Serotonin and Dopamine Increase Following Massage Therapy. *Int. J. Neurosci.* **2005**, *115*, 1397–1413. [[CrossRef](#)]
21. Wu, J.-J.; Cui, Y.; Yang, Y.-S.; Kang, M.-S.; Jung, S.-C.; Park, H.K.; Yeun, H.-Y.; Jang, W.J.; Lee, S.; Kwak, Y.S.; et al. Modulatory Effects of Aromatherapy Massage Intervention on Electroencephalogram, Psychological Assessments, Salivary Cortisol and Plasma Brain-Derived Neurotrophic Factor. *Complement. Ther. Med.* **2014**, *22*, 456–462. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
22. Diego, M.A.; Field, T. Moderate Pressure Massage Elicits a Parasympathetic Nervous System Response. *Int. J. Neurosci.* **2009**, *119*, 630–638. [[CrossRef](#)]
23. Lee, Y.-H.; Park, B.N.R.; Kim, S.H. The Effects of Heat and Massage Application on Autonomic Nervous System. *Yonsei Med. J.* **2011**, *52*, 982–989. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
24. Field, T. Massage Therapy Research Review. *Complement. Ther. Clin. Pract.* **2014**, *20*, 224–229. [[CrossRef](#)]
25. Lastova, K.; Nordvall, M.; Walters-Edwards, M.; Allnutt, A.; Wong, A. Cardiac Autonomic and Blood Pressure Responses to an Acute Foam Rolling Session. *J. Strength Cond. Res.* **2018**, *32*, 2825–2830. [[CrossRef](#)]
26. Jodo, E.; Yamada, Y.; Hatayama, T.; Abe, T.; Kinya, M. Effects of Facial Massage on the Spontaneous EEG. *Tohoku Psychol. Folia* **1988**, *47*, 8–15.
27. Nakano, H.; Kodama, T.; Ueda, T.; Mori, I.; Tani, T.; Murata, S. Effect of Hand and Foot Massage Therapy on Psychological Factors and EEG Activity in Elderly People Requiring Long-Term Care: A Randomized Cross-over Study. *Brain Sci.* **2019**, *9*, 54. [[CrossRef](#)]
28. Diego, M.A.; Field, T.; Sanders, C.; Hernandez-Reif, M. Massage therapy of moderate and light pressure and vibrator effects on eeg and heart rate. *Int. J. Neurosci.* **2004**, *114*, 31–44. [[CrossRef](#)]
29. Kaewcum, N.; Siripornpanich, V. The Effects of Unilateral Swedish Massage on the Neural Activities Measured by Quantitative Electroencephalography (EEG). *J. Health Res.* **2018**, *32*, 36–46. [[CrossRef](#)]
30. Krause, F.; Wilke, J.; Niederer, D.; Vogt, L.; Banzer, W. Acute Effects of Foam Rolling on Passive Stiffness, Stretch Sensation and Fascial Sliding: A Randomized Controlled Trial. *Hum. Mov. Sci.* **2019**, *67*, 102514. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
31. World Medical Association. World Medical Association Declaration of Helsinki: Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subjects. *JAMA* **2013**, *310*, 2191–2194. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
32. Schulz, K.F.; Altman, D.G.; Moher, D. CONSORT 2010 Statement: Updated Guidelines for Reporting Parallel Group Randomized Trials. *Ann. Intern. Med.* **2010**, *152*, 726–732. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
33. Cometta, M.; Falquet, B. *L'efficacité de l'utilisation Du Foam Roller Sur l'extensibilité Musculaire Des. Ischio-Jambiers*; Haute Ecole de Santé Valais: Leukerbad, Switzerland, 2018.
34. Cheatham, S.W.; Baker, R. Differences in Pressure Pain Threshold among Men and Women after Foam Rolling. *J. Bodyw. Mov. Ther.* **2017**, *21*, 978–982. [[CrossRef](#)]
35. Cheatham, S.W.; Kolber, M.J. Does Roller Massage with a Foam Roll Change Pressure Pain Threshold of the Ipsilateral Lower Extremity Antagonist and Contralateral Muscle Groups? An Exploratory Study. *J. Sport Rehabil.* **2018**, *27*, 165–169. [[CrossRef](#)]
36. Cheatham, S.W.; Stull, K.R. Comparison of Three Different Density Type Foam Rollers on Knee Range of Motion and Pressure Pain Threshold: A Randomized Controlled Trial. *Int. J. Sports Phys. Ther.* **2018**, *13*, 474–482. [[CrossRef](#)]
37. Cheatham, S.W.; Stull, K.R. Comparison of a Foam Rolling Session with Active Joint Motion and without Joint Motion: A Randomized Controlled Trial. *J. Bodyw. Mov. Ther.* **2018**, *22*, 707–712. [[CrossRef](#)]
38. Schultz, J.H.; Luthe, W. *Autogenic Training: A Psychophysiological Approach to Psychotherapy*; Autogenic Training: A Psychophysiological Approach to Psychotherapy; Grune & Stratton: Oxford, UK, 1959; p. 289.

39. Ayala, F.; Sainz de Baranda, P.; De Ste Croix, M.; Santonja, F. Reproducibility and Criterion-Related Validity of the Sit and Reach Test and Toe Touch Test for Estimating Hamstring Flexibility in Recreationally Active Young Adults. *Phys. Ther. Sport* **2012**, *13*, 219–226. [CrossRef]
40. Mayorga-Vega, D.; Merino-Marban, R.; Viciano, J. Criterion-Related Validity of Sit-and-Reach Tests for Estimating Hamstring and Lumbar Extensibility: A Meta-Analysis. *J. Sports Sci. Med.* **2014**, *13*, 1–14. [PubMed]
41. Chung, P.-K.; Yuen, C.-K. Criterion-Related Validity of Sit-and-Reach Tests in University Men in Hong Kong. *Percept. Mot. Skills* **1999**, *88*, 304–316. [CrossRef] [PubMed]
42. Diego, M.A.; Jones, N.A.; Field, T.; Hernandez-reif, M.; Schanberg, S.; Kuhn, C.; Galamaga, M.; McAdam, V.; Galamaga, R. Aromatherapy Positively Affects Mood, EEG Patterns of Alertness and Math Computations. *Int. J. Neurosci.* **1998**, *96*, 217–224. [CrossRef]
43. Field, T.; Diego, M.; Hernandez-Reif, M. Tai Chi/Yoga Effects on Anxiety, Heart rate, EEG and Math Computations. *Complement. Ther. Clin. Pract.* **2010**, *16*, 235–238. [CrossRef]
44. Caviola, S.; Carey, E.; Mammarella, I.C.; Szucs, D. Stress, Time Pressure, Strategy Selection and Math Anxiety in Mathematics: A Review of the Literature. *Front. Psychol.* **2017**, *8*, 1488. [CrossRef] [PubMed]
45. Tadel, F.; Baillet, S.; Mosher, J.C.; Pantazis, D.; Leahy, R.M. Brainstorm: A User-Friendly Application for MEG/EEG Analysis. *Comput. Intell. Neurosci.* **2011**, *2011*, 879716. [CrossRef]
46. Kilavik, B.E.; Zaepffel, M.; Brovelli, A.; MacKay, W.A.; Riehle, A. The Ups and Downs of Beta Oscillations in Sensorimotor Cortex. *Spec. Issue Neuronal Oscil. Mov. Disord.* **2013**, *245*, 15–26. [CrossRef]
47. Babiloni, C.; Del Percio, C.; Arendt-Nielsen, L.; Soricelli, A.; Romani, G.L.; Rossini, P.M.; Capotosto, P. Cortical EEG Alpha Rhythms Reflect Task-Specific Somatosensory and Motor Interactions in Humans. *Clin. Neurophysiol.* **2014**, *125*, 1936–1945. [CrossRef] [PubMed]
48. Pfurtscheller, G. EEG Event-Related Desynchronization (ERD) and Synchronization (ERS). *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* **1997**, *1*, 26. [CrossRef]
49. Pfurtscheller, G.; Lopes da Silva, F.H. Event-Related EEG/MEG Synchronization and Desynchronization: Basic Principles. *Clin. Neurophysiol.* **1999**, *110*, 1842–1857. [CrossRef]
50. Collet, C.; Salvia, E.; Petit-Boulanger, C. Measuring Workload with Electrodermal Activity during Common Braking Actions. *Ergonomics* **2014**, *57*, 886–896. [CrossRef] [PubMed]
51. Bellemare, C.; Bissonnette, L.; Kröger, S. Statistical Power of within and Between-Subjects Designs in Economic Experiments. *SSRN Scholarly Paper.* **2014**. [CrossRef]
52. Bradbury-Squires, D.J.; Nofthall, J.C.; Sullivan, K.M.; Behm, D.G.; Power, K.E.; Button, D.C. Roller-Massager Application to the Quadriceps and Knee-Joint Range of Motion and Neuromuscular Efficiency during a Lunge. *J. Athl. Train.* **2015**, *50*, 133–140. [CrossRef]
53. Fairall, R.R.; Cabell, L.; Boergers, R.J.; Battaglia, F. Acute Effects of Self-Myofascial Release and Stretching in Overhead Athletes with GIRD. *J. Bodyw. Mov. Ther.* **2017**, *21*, 648–652. [CrossRef] [PubMed]
54. Grabow, L.; Young, J.D.; Byrne, J.M.; Granacher, U.; Behm, D.G. Unilateral Rolling of the Foot Did Not Affect Non-Local Range of Motion or Balance. *J. Sports Sci. Med.* **2017**, *16*, 209–218.
55. Champely, S.; Ekstrom, C.; Dalgaard, P.; Gill, J.; Weibelzahl, S.; Anandkumar, A.; Ford, C.; Volcic, R.; De Rosario, H.; De Rosario, M.H. Package ‘Pwr.’ R Package Version 1.3-0. 2018. Available online: <http://cran.r-project.org/package=pwr> (accessed on 18 June 2021).
56. Suresh, K. An Overview of Randomization Techniques: An Unbiased Assessment of Outcome in Clinical Research. *J. Hum. Reprod. Sci.* **2011**, *4*, 8. [CrossRef]
57. Pinheiro, J.; Bates, D.; DebRoy, S.; Sarkar, D. *Nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models, R Package Version 3*; R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria, 2018.
58. Ben-Shachar, M.; Makowski, D.; Lüdtke, D. Compute and Interpret Indices of Effect Size. *CRAN Online Ser.* **2020**. [CrossRef]
59. Holm, S. A Simple Sequentially Rejective Multiple Test Procedure. *Scand. J. Stat.* **1979**, *6*, 65–70.
60. Warrenburg, S.; Pagano, R.R.; Woods, M.; Hlastala, M. A Comparison of Somatic Relaxation and EEG Activity in Classical Progressive Relaxation and Transcendental Meditation. *J. Behav. Med.* **1980**, *3*, 73–93. [CrossRef] [PubMed]
61. Jacobs, G.D.; Benson, H.; Friedman, R. Topographic EEG Mapping of the Relaxation Response. *Biofeedback Self-Regul.* **1996**, *21*, 121–129. [CrossRef] [PubMed]
62. Rizzolatti, G.; Fogassi, L.; Gallese, V. Motor and Cognitive Functions of the Ventral Premotor Cortex. *Curr. Opin. Neurobiol.* **2002**, *12*, 149–154. [CrossRef]
63. Ouchi, Y.; Kanno, T.; Okada, H.; Yoshikawa, E.; Shinke, T.; Nagasawa, S.; Minoda, K.; Doi, H. Changes in Cerebral Blood Flow under the Prone Condition with and without Massage. *Neurosci. Lett.* **2006**, *407*, 131–135. [CrossRef]
64. Kodama, K.; Takamoto, K.; Nishimaru, H.; Matsumoto, J.; Takamura, Y.; Sakai, S.; Ono, T.; Nishijo, H. Analgesic Effects of Compression at Trigger Points Are Associated with Reduction of Frontal Polar Cortical Activity as Well as Functional Connectivity between the Frontal Polar Area and Insula in Patients with Chronic Low Back Pain: A Randomized Trial. *Front. Syst. Neurosci.* **2019**, *13*, 68. [CrossRef]

65. Gómez-Ramírez, J.; Freedman, S.; Mateos, D.; Pérez Velázquez, J.L.; Valiante, T.A. Exploring the Alpha Desynchronization Hypothesis in Resting State Networks with Intracranial Electroencephalography and Wiring Cost Estimates. *Sci. Rep.* **2017**, *7*, 15670. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
66. Lehrer, P.M.; Carr, R.; Sargunraj, D.; Woolfolk, R.L. Stress Management Techniques: Are They All Equivalent, or Do They Have Specific Effects? *Biofeedback Self-Regul.* **1994**, *19*, 353–401. [[CrossRef](#)]
67. Blizard, D.A.; Cowings, P.; Miller, N.E. Visceral Responses to Opposite Types of Autogenic-Training Imagery. *Biol. Psychol.* **1975**, *3*, 49–55. [[CrossRef](#)]
68. Mohammadi Ziabari, S.S.; Treur, J. Cognitive Modeling of Mindfulness Therapy by Autogenic Training. In Proceedings of the Information Systems Design and Intelligent Applications; Satapathy, S.C., Bhateja, V., Somanah, R., Yang, X.-S., Senkerik, R., Eds.; Springer: Singapore, 2019; pp. 53–66.
69. Mulder, T.; de Vries, S.; Zijlstra, S. Observation, Imagination and Execution of an Effortful Movement: More Evidence for a Central Explanation of Motor Imagery. *Exp. Brain Res.* **2005**, *163*, 344–351. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
70. Ajimsha, M.S.; Majeed, N.A.; Chinnavan, E.; Thulasyammal, R.P. Effectiveness of Autogenic Training in Improving Motor Performances in Parkinson's Disease. *Complement. Ther. Med.* **2014**, *22*, 419–425. [[CrossRef](#)]
71. Lehrer, P.M.; Woolfolk, R.L.; Sime, W.E. *Principles and Practice of Stress Management, Third Edition*; Guilford Press: New York, NY, USA, 2007; ISBN 978-1-60623-828-8.
72. Leonova, A.B.; Kuznetsova, A.S.; Barabanshchikova, V.V. Job Specificity in Human Functional State Optimization by Means of Self-Regulation Training. *Procedia-Soc. Behav. Sci.* **2013**, *86*, 29–34. [[CrossRef](#)]
73. Arabaci, R. Acute Effects of Pre-Event Lower Limb Massage on Explosive and High Speed Motor Capacities and Flexibility. *J. Sports Sci. Med.* **2008**, *7*, 549–555. [[PubMed](#)]
74. Arazi, H.; Asadi, A.; Hoseini, K. Comparison of Two Different Warm-Ups (Static-Stretching and Massage): Effects on Flexibility and Explosive Power. *Acta Kinesiol.* **2012**, *6*, 55–59.
75. Kanthack, T.F.D.; Guillot, A.; Papaxanthis, C.; Guizard, T.; Collet, C.; Di Rienzo, F. Neurophysiological Insights on Flexibility Improvements through Motor Imagery. *Behav. Brain Res.* **2017**, *331*, 159–168. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
76. Eriksson Crommert, M.; Lacourpaille, L.; Heales, L.J.; Tucker, K.; Hug, F. Massage Induces an Immediate, Albeit Short-Term, Reduction in Muscle Stiffness. *Scand. J. Med. Sci. Sports* **2015**, *25*, e490–e496. [[CrossRef](#)]
77. Moraska, A. Therapist Education Impacts the Massage Effect on Postrace Muscle Recovery. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2007**, *39*, 34–37. [[CrossRef](#)]
78. Sharp, C.; Coltharp, H.; Hurford, D.; Cole, A. Increasing Mathematical Problem-Solving Performance through Relaxation Training. *Math. Educ. Res. J.* **2000**, *12*, 53–61. [[CrossRef](#)]
79. Mazzeo, C.A. *Nurturing the Mind/Body Connection: A Phenomenological Analysis of Emotional Release in Massage Therapy*; Proquest Umi Dissertation Publishing: Chicago, IL, USA, 2011; ISBN 978-1-243-45223-8.
80. Eliska, O.; Eliskova, M. Are Peripheral Lymphatics Damaged by High Pressure Manual Massage? *Lymphology* **1995**, *28*, 21–30.
81. Freiwald, J.; Baumgart, C.; Kühnemann, M.; Hoppe, M.W. Foam-Rolling in Sport and Therapy—Potential Benefits and Risks: Part 2—Positive and Adverse Effects on Athletic Performance. *Thema Konserv. Ther. Sportorthopädie* **2016**, *32*, 267–275. [[CrossRef](#)]
82. Wiech, K.; Tracey, I. Pain, Decisions, and Actions: A Motivational Perspective. *Front. Neurosci.* **2013**, *7*, 46. [[CrossRef](#)]
83. Bigliassi, M. Corollary Discharges and Fatigue-Related Symptoms: The Role of Attentional Focus. *Front. Psychol.* **2015**, *6*, 1002. [[CrossRef](#)]
84. Kaada, B.; Torsteinb, O. Increase of Plasma  $\beta$ -Endorphins in Connective Tissue Massage. *Gen. Pharmacol. Vasc. Syst.* **1989**, *20*, 487–489. [[CrossRef](#)]
85. Arroyo-Morales, M.; Olea, N.; Martínez, M.M.; Hidalgo-Lozano, A.; Ruiz-Rodríguez, C.; Díaz-Rodríguez, L. Psychophysiological Effects of Massage-Myofascial Release after Exercise: A Randomized Sham-Control Study. *J. Altern. Complement. Med.* **2008**, *14*, 1223–1229. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
86. Kalichman, L.; Ben David, C. Effect of Self-Myofascial Release on Myofascial Pain, Muscle Flexibility, and Strength: A Narrative Review. *J. Bodyw. Mov. Ther.* **2017**, *21*, 446–451. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
87. Field, T.; Diego, M.; Hernandez-Reif, M. Massage Therapy Research. *Dev. Rev.* **2007**, *27*, 75–89. [[CrossRef](#)]
88. Butttagat, V.; Eungpinichpong, W.; Kaber, D.; Chatchawan, U.; Arayawichanon, P. Acute Effects of Traditional Thai Massage on Electroencephalogram in Patients with Scapulocostal Syndrome. *Complement. Ther. Med.* **2012**, *20*, 167–174. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
89. Von Mohr, M.; Crowley, M.J.; Walthall, J.; Mayes, L.C.; Pelphrey, K.A.; Rutherford, H.J.V. EEG Captures Affective Touch: CT-Optimal Touch and Neural Oscillations. *Cogn. Affect. Behav. Neurosci.* **2018**, *18*, 155–166. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
90. Schroeder, A.N.; Best, T.M. Is Self Myofascial Release an Effective Preexercise and Recovery Strategy? A Literature Review. *Curr. Sports Med. Rep.* **2015**, *14*, 200–208. [[CrossRef](#)]
91. Wiewelhoeve, T.; Döweling, A.; Schneider, C.; Hottenrott, L.; Meyer, T.; Kellmann, M.; Pfeiffer, M.; Ferrauti, A. A Meta-Analysis of the Effects of Foam Rolling on Performance and Recovery. *Front. Physiol.* **2019**, *10*, 376. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

## RÉSUMÉ

L'objet de cette étude consistait à comparer les signatures neuronales induites par deux formes de massage distinctes : le massage manuel et le massage autogène. Les données recueillies ont par ailleurs démontré que ces deux formes de massage induisaient toutes deux une synchronisation neuronale des ondes alpha et beta. Toutefois, les analyses topographiques ont indiqué également que la localisation de ce phénomène était différente. En effet, après un massage manuel cette synchronisation se situerait dans la région pariétale du cortex tandis que le massage autogène susciterait cette synchronisation au niveau de la région frontale. A partir des indices psychométriques, comportementaux et neurophysiologiques complémentaires, il semble que le massage manuel favorise une réduction de la douleur musculaire et une augmentation de la relaxation musculaire. De son côté, le massage autogène serait plus efficace pour diminuer le sentiment d'anxiété. Concernant les performances cognitives et les gains de flexibilité, seul le massage manuel est parvenu à se distinguer sur le test du toe touch avec des scores plus élevés que les groupes contrôle et massage autogène. Autre caractéristique remarquable, le massage autogène susciterait une baisse de la conductance cutanée comparé au groupe contrôle, s'expliquant vraisemblablement par sa nature proactive. Dans l'ensemble, ces deux formes de massage suscitent des bénéfices comparables sur la performance et le bien-être. Le massage autogène est donc une alternative intéressante pour les sportifs visant à améliorer leur récupération psychophysologique du fait de sa simplicité d'utilisation. Néanmoins, lorsque le choix est possible il semble que le massage manuel, avec sa nature rétroactive, reste la meilleure solution pour optimiser la relaxation, et donc la récupération.

**CHAPITRE 5 : MASSAGE ROBOTIQUE ET  
MASSAGE MANUEL : AUX PORTES D'UNE  
NOUVELLE EXPÉRIENCE**



## INTRODUCTION

L'étude précédente a montré certains effets comparables lors d'une routine de massage autogène et d'un massage manuel effectué par un masseur-kinésithérapeute expérimenté. Malgré leur modalité de pratique divergente, des bénéfices comparables sur la relaxation ont été observés à partir de mesures subjectives et objectives. En particulier, nous avons recueilli une synchronisation neuronale des ondes alpha et beta au cours des deux modalités de massage dans des régions corticales différentes. Le massage manuel induisait pour sa part une synchronisation neuronale au niveau pariétal tandis que la synchronisation était située dans les régions frontales lors du massage autogène. Les autres mesures réalisées au cours de cette étude ont montré une efficacité du massage manuel légèrement supérieure. Il s'agit de la première étude comparant les signatures neuronales des deux formes de massage à celle de la relaxation dans un seul et même plan expérimental. Parallèlement à la démocratisation du massage autogène, des progrès techniques et technologiques ont eu lieu dans le domaine de la robotique, laissant présager de nouvelles formes de massage. Autrefois limité par des protocoles et des manœuvres standardisés, le développement de la cobotique offre de nouvelles perspectives aux massages robotisés. Du fait de la nouveauté de cet objet de recherche, il n'existe à ce jour aucune donnée expérimentale permettant d'évaluer son efficacité. Théoriquement, ce système de massage robotisé, autonome et interactif offrirait aux utilisateurs une expérience sensori-motrice entièrement nouvelle. En effet, l'interaction avec le robot étant dorénavant possible, certaines sociétés comme Capsix Robotics intègrent dans leur système de massage robotisé, autonome et interactif une commande de contrôle à destination de leur utilisateur, permettant un positionnement mixte alternant les modes de contrôle rétroactif et proactif. Cette étude explore les effets de cette nouvelle approche conceptuelle du massage et devrait permettre de

répondre au dernier sous-objectif de cette thèse en comparant les effets d'un massage robotique à celui d'un masseur-kinésithérapeute expérimenté. Parallèlement, nous nous sommes intéressés à la fatigabilité que peut susciter la répétition des massages sur le praticien, ce qui pourrait représenter un autre intérêt de ce type de solutions.

## **ÉTUDE 4**

# **ÉVALUATION ET COMPARAISON DU MASSAGE ROBOTIQUE ET MANUEL : UN ESSAI CROISÉ RANDOMISÉ**

(En cours de rédaction 2021)

## ARTICLE 5:

Evaluation and comparison of robotic and manual massage: a randomized crossover trial, Yann Kerautret, Aymeric Guillot, Carole Eyssautier and Franck Di Rienzo, In press.

## CONTRIBUTION DES CO-AUTEURS

Les co-auteurs de l'étude sont Yann Kerautret, Aymeric Guillot et Franck Di Rienzo. Ce travail de recherche a été mis en place lors de discussion entre Yann Kerautret, Aymeric Guillot, Franck Di Rienzo et Carole Eyssautier. Le recueil de données a été réalisé par Yann Kerautret au sein du CHU de St Etienne. Le traitement et l'analyse des données ont été menés par Yann Kerautret et Franck Di Rienzo. L'article a été rédigé par Yann Kerautret, puis Aymeric Guillot, Franck Di Rienzo et Carole Eyssautier ont effectué diverses corrections et ont fait part de leurs critiques.

Evaluation and comparison of robotic and manual massage: a randomized crossover trial.

#### Abstract

**Background.** Manual and robotic massage are two forms of soft tissue treatment. Manual massage (MM) is an ancient practice requiring the intervention of an experienced physiotherapist and commonly used in the warm-up and/ or recovery process. However, robotic massage (RM) is a recent yet unexplored treatment. **Objective.** The present study sought to compare the effects of a back MM and RM on psychometric, behavioral and neurophysiological indexes of performance and well-being. **Methods.** We conducted a blinded randomized crossover trial design in 21 healthy individuals. Participants experienced two intervention (20 minutes back massage), one by a physiotherapist, and another by a massage robot. Physiotherapist's self-report ratings of perceived sensations and participants perceived sensations, mood profile and mental workload were the psychometric variables. Flexibility tests and mental calculation performances were the behavioral variables. Resting state of heart rate variability and skin conductance recordings were the neurophysiological variables. These measurements were carried on before and after each massage intervention. **Results.** Both massages intervention elicited a physiological de-arousal response. Skin conductance gradually decreased while the LF/HF increased from the pretest to the posttest. MM and RM increased cognitive performances but not the flexibility. MM was also associated with better results on perceived physical sensations, but induced physiotherapist's fatigability compared to RM. **Conclusion.** Overall, although RM exhibited a comparable effect to MM on objective and subjective indexes, the diversity and complexity of human hands remained more effective.

Findings are discussed in relation to the effects of repeatability of massages on physiotherapist's fatigability and the alternative offered by the RM to assist professionals in their daily tasks.

**Key Words:** physiotherapy, manual massage, cobots, robotic, skin conductance, HRV, flexibility, alertness.

## **A. INTRODUCTION**

Manual massage (MM) has ancestral roots among a variety of human civilizations (Estradère, 1863). Beck (2012) clarified three distinct purposes to MM. First, MM can be used to promote a psychophysiological state of relaxation. Second, MM can benefit a variety of health outcomes, e.g. alleviate pain symptoms. Third, MM can be used as a conditioning technique to increase the capacity to face physical demands and/or promote recovery. Typically, MM is used in sports as part of warm-up and recovery routines (Weerapong et al., 2005). MM target soft tissues such as the skin, muscles, tendons and fascia, to achieve biomechanical and neurophysiological mechanisms (Guimberteau, 2004; Weerapong et al., 2005; Guimberteau et al., 2016). More precisely, this mechanical pressure would stimulate mechanoreceptors such as the Golgi tendon organ, Pacinian, Meissner, Ruffini corpuscles and interstitial type III and IV receptors (Schleip, 2003a, 2003b; Wilke et al., 2020). However, these empirical attributions are not always confirmed by scientific data (Weerapong et al., 2005). Indeed, MM is a difficult intervention to scale due to its part of subjectivity. The pressure and the distinct techniques such as effleurage, kneading, friction, vibrating, static or slide pressures, light and deep pressures, are determined and adjusted by the physiotherapist, thus making his intervention impossible to reproduce (Standley et al., 2010). To achieve the adequate adjustment, the physiotherapist can also benefit in real time from both direct and indirect patient's feedbacks as the maneuvers progresses (Kerautret et al., 2020). MM is therefore a complex practice requiring sufficient experience (Moraska, 2007). Although the benefits of MM are widely demonstrated in the literature in individuals with or without motor disorders (Poppendieck et al., 2016), MM remains expensive and time-consuming for medical or sports staff (Callaghan, 1993; Vickers et al., 2004). Hence, the main obstacle to the democratization of the MM can be explained by

the deficit of masseurs (Golovin et al., 2018). Indeed, only one patient can be treated at a time. Hence, MM represents an unscalable practice.

Also, MM involves a passive position of the person receiving the massage. Indeed, the individual remains lying on the massage table in dorsal or ventral decubitus with no direct means to regulate the massage gestures. The patient, athlete, elderly person or child, can adjust muscle tone at his convenience but remains primarily confronted to a retroactive mode of action control (Kerautret et al., 2020). The physiotherapist's maneuvers cannot be anticipated, involving a well-known phenomenon in massage therapy, the emotional liberation of people being massaged (Mazzeo, 2011). To overcome these limits, the limits of human faculties, and spurred by an economic purpose, it is possible to observe the development of robotic massage (RM). Similar to the medical field, massage was first instrumentalized before gradually robotizing (Kerautret et al., 2020). For example, the da Vinci™ surgical robot and ROSA™ spine robot are high-precision robots allowing minimally invasive procedures such as arthroscopy and laparoscopic splenectomy (Chapman et al., 2002; Lefranc and Peltier, 2016). In the sphere of massage, the Waseda Asahi Oral-Rehabilitation Robot 1 (WAO-1) specialized in temporomandibular disorders was one of the first massage robots to be the subject of scientific research (Takanishi et al., 2008, 2009). This WAO-1 robot project is particularly interesting. Indeed, although the massage offered by this robot was standardized, its effectiveness has been demonstrated by several scientific experiments. After the RM, the patients attested to a decrease in pathological disorders (Koga et al., 2008; Ariji et al., 2009a; Ishii et al., 2009; Ariji et al., 2010). However, the doctor's intervention remained more convincing, further improving the perceived comfort, heat, muscle pain management, and promoted functional motor recovery (Koga et al., 2008; Ariji et al., 2009a, 2010, 2015).



Nonetheless, despite its operating autonomy and promising results, this robot did not allow individualization of massage *per se*. In an attempt to achieve the same benefits as MM, hopes seem to be turning to collaborative robotics. This new branch of robotics, safer and more precise, would open up the field of possibilities. Indeed, the main interests of these collaborative robots lies in the real-time interaction between man and machine. Hence, several companies such as AiTreat, Massage robotics, Adamo Robot and Capsix Robotics offer promising and innovative RM solutions. Overall, it seems that these companies share a common vision, to equal the efficiency of a physiotherapist with a robot. To achieve this, Massage robotic and Capsix Robotics, for example, rely their functionality to adapt to the morphology of their users. Also, to offer a novel stochastic sensorimotor user experience, Capsix Robotics integrated a remote control in this iYU<sup>®</sup> Pro. With this remote control, the user could adjust the intensity of the pressure and an innovative conceptual approach to switch from retroactive to proactive mode of action control, and vice versa, depending to their needs. In theory, this function could allow to definitively resolve the main issues mentioned previously, and perhaps even benefit from a more effective massage.

In the present experiment, we aimed at comparing the effects of MM and RM interventions on neurophysiological, behavioral and psychometric measures. We also implemented resting state of heart rate variability and skin conductance response measures to index orthosympathetic activity and sympathovagal balance. We hypothesized that these two techniques would increase flexibility of the hamstrings and lower back and promote a decrease of orthosympathetic activity. Compared to MM, we hypothesized that RM would increase alertness and math computations scores, due to its semi-proactive nature. Overall, we aimed to

extend current RM knowledge with regards to the neurophysiological effects and determined the level of effectiveness compared to MM.

## **B. MATERIALS AND METHODS**

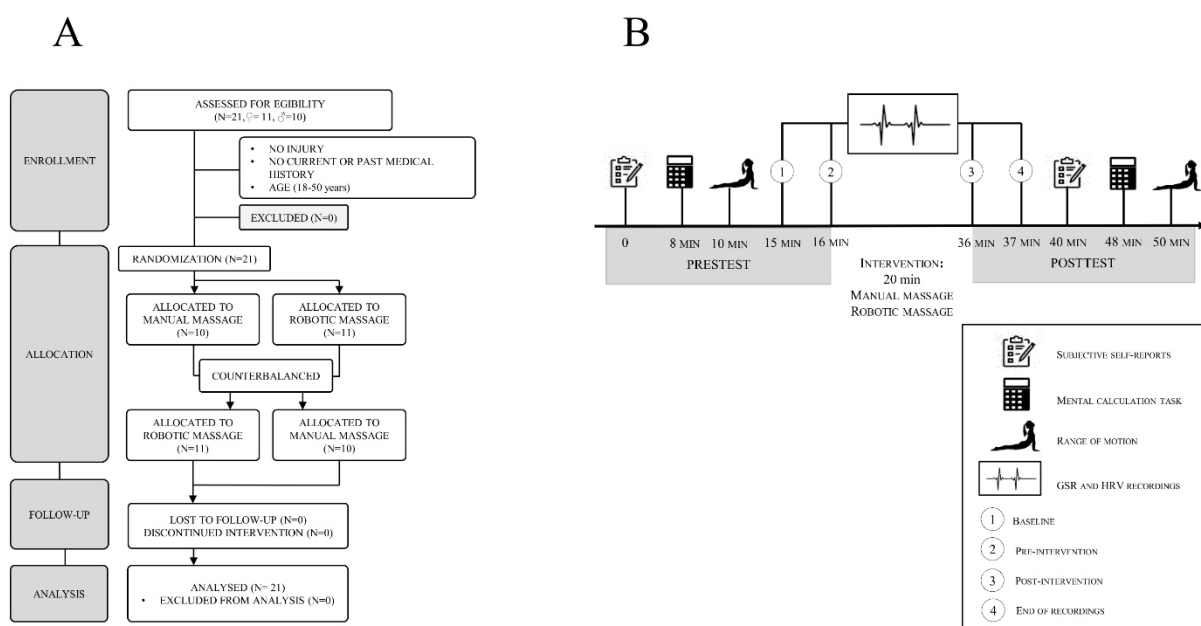
### **1. Participants**

Twenty-one healthy adults (10 males, 11 females) volunteered to participate in the present experiment a blinded randomized crossover trial (Table 1). Recruitment strategies consisted in poster advertising and personal addressing. Participants had no current or past medical history (including functional limitations) which could have compromised the results. They were off medication and not allowed to consume alcoholic and caffeinated beverages before participating in the study. The experiment was approved by the local ethical review board (IRB 2019-A01732-55). All participants signed informed consent prior to study enrollment in accordance with the ethical standards laid down in the Declaration of Helsinki and its later amendments (World Medical Association, 2013).

#### **a) Experimental design**

The present blinded randomized crossover trial involved two experimental sessions separated from each other by one week. Each session was supervised by the same experimenter over an inclusion period of 8 weeks between June to August 2020. During the first visit, participants completed a questionnaire on demographic information. Then participants were randomly assigned to one of the following experimental conditions i) Manual massage and ii) Robotic massage (see Figure 1). For both conditions the room temperature was controlled and maintained between 24 and 27°C. Participants were instructed to not engage in any strenuous form of exercise that could induce delayed-onset muscle soreness during the experimental

period. Experimental sessions were scheduled between 9 am and 6 pm. Nonetheless, to avoid bias in the results, the time slots allocated to the two experimental sessions of the same participant were similar. The experiment consisted in pretest and posttest measures before and after each experimental intervention. All subjects underwent pretest measures, followed by the intervention, and then immediate posttest measures. The investigator remained the same throughout the study to ensure reproducibility of the measures and no feedback was provide to the participants until after completion of the design.



**Figure 1. A.** Flowchart (inspired from CONSORT guidelines (Schulz et al., 2010) describing participants' inclusion and randomization procedure); **B.** Flowchart of the experimental procedures and measurements for the psychometric, behavioral and neurophysiological dependent variables.

## **b) Experimental sessions**

### Manual massage intervention

Participants in the Manual massage condition underwent a manual massage by a physiotherapist blinded to the purpose of the experiment (20 years of experience). The physiotherapist was trained on the protocol and did not play another role in the study. Participants were lying in the prone position on a massage table. The protocol was 20 min in duration and included: traditional bilateral effleurage (1 min) with the palmar aspect of the hands over the entire back and paravertebral muscles followed by deep bilateral sliding pressure (1 min 30), then unilateral (4 min 30), of the paravertebral, trapezius, and rhomboids muscles. Then, the protocol continued with deep kneading, unilateral sinusoids (4 min 30) and bilateral rotational friction (7 min) of the paravertebral muscles. To conclude, the physiotherapist again used the unilateral (1 min 30), bilateral (1 min 30) deep sliding pressures on the paravertebral, trapezius and rhomboid muscles, before targeting the entire back by a simple light touch. To facilitate the physiotherapist's maneuvers, massage cream was used. Manual massage protocol a standardized protocol for all participants, i.e., the order of the areas massaged, the type and the frequency of maneuvers performed. Only the treatment time per muscle and the total duration of the session have been slightly adapted depending on the morphology of the participant, i.e., tall or short. Indeed, each participant received an identical number of movements. Hence, the trajectories being greater on tall people. The duration of these same movements was therefore slightly longer, which lengthened the duration of the treatment accordingly. Obviously, we could not control the pressures applied by the physiotherapist. To avoid interfering with the physiotherapist's manual massage practices, he was free to apply a similar pressure in this experiment to that in his usual practice. The physiotherapist declared

that he adjusted the massage pressures according to the zones of perceived tension and that he remained consistent across participants.

### Robotic massage intervention

Participants in the Robotic massage condition underwent a massage by a robotic massage device (iYU<sup>®</sup> Pro, Capsix Robotics, Lyon, France). This robotic massage device consisted of a collaborative robot (LBR Med R820, Kuka Robotics, Augsburg, Germany), a homemade remote control, a 3D vision camera (Azure Kinect DK, Microsoft, Washington, USA) and a motorized massage table. The robotic massage protocol, defined by a physiotherapist, could be adapted to the morphology of each participant. As for the previous condition, the participants were lying in the prone position on a massage table. Robotic massage protocol respected the same criteria of the manual massage condition, i.e., the order of the maneuvers and the areas massaged, the treatment time per muscle and the total duration of the session. Unlike Manual massage condition, participants could adjust the pressure using a remote control according to their feelings/ needs. Hence, the pressure was not standardized and the pressure values were not analyzed during this study. To support the experimenter, an operator was tasked with calibrating and starting the massage protocols. This operator was also present to guarantee the safety of the participants. Except these functions, this operator played no other role in the study.

## **2. Dependent variables**

For this study, we focused on 9 dependent variables, including one for the physiotherapist. All of these variables were collected before (PRETEST) and after (POSTTEST)

the experimental intervention. Only the neurophysiological variables were also recorded during the two massage conditions (i.e. manual and robotic).

The first measures consisted neurophysiological indexes (i.e. galvanic skin response, heart rate variability). Three behavioral variables (i.e. two flexibility tests and a mental arithmetic task) completed the protocol. The other measures consisted in psychometric indexes collected from visual analogue scale (VAS) (i.e. well-being, relaxation, warmth, muscle pain, flexibility, anxiety), the Brunel Mood Scale (BRUMS) and the National Aeronautical and Space Administration Task Load Index (NASA-TLX). An additional questionnaire, dedicated to the physiotherapist, was composed of VAS (i.e. fatigue, muscle tension/ pain, satisfaction regarding effectiveness, frequency, range of motion and pressure level).

**a) Neurophysiological variables**

Electrodermal activity

The electrodermal activity was recorded from continuous skin conductance using twofinger electrodes, snap lead (MLT116F, GSR Finger Electrodes, ADInstruments, Dunedin, New Zeland) with constant voltage (0.5 Volt) were positioned in the index and the medium fingers at the second phalanx on the right hand. Signals were recorded with a Galvanic Skin Resistance amplifier (FE116 GSR Amp, ADInstruments, Dunedin, New Zeland) connected to aPowerLab 16/35 acquisition system (PL3516, Power Lab 16/35, ADInstrument, Dunedin, New Zealand). The skin conductance software used in this experiment was LabChart Pro (ADInstrument, Dunedin, New Zealand). Skin conductance (SC) mirrors the activity of eccrine sweat glands, which are under the control of the orthosympathetic branch of the autonomous nervous system. Tonic changes reflect variations in physiological arousal, whereas phasic

changes primarily reflect cognitive changes such as increased vigilance during the motor preparation (Collet et al., 2014). Here, this recording was continuous, i.e. it started 1 min before the massage and ended 1 min after. To index the general physiological arousal, we calculated a normalized SC index ( $SC_{NORM}$ ) according to the following formulae:

$$SC_{Norm} = \frac{\text{mean}(\text{RestingStateSC})}{\text{BaselineSC}}$$

#### Cardiac activity

The heart rate variability (HRV) was recorded from the R-R intervals using a finger pulse transducer (TN1012/ST, Finger Pulse Transducers, ADInstrument, Dunedin, New Zealand) attached at the first phalanx on the right hand. Data were co-registered with SC signals using the LabChart Pro acquisition software. The mean square root of successive differences (RMSSD) was calculated as an index of the time domain of HRV, reflecting cardiac parasympathetic modulation (Electrophysiology, 1996). The LF/HF ratio was also used as an index of the frequency domain of HRV to quantify the sympathovagal balance, the relationship between sympathetic and parasympathetic nervous system activities (Goldberger, 1999). An increase in HRV is explained by an opposite reaction of the LF / HF ratio, i.e., a decrease in the sympathovagal balance, indicative of a predominance of parasympathetic activity. Increased HRV may be associated with a decreased risk of sudden death (Maheshwari et al., 2016).

#### Motor and cognitive performances

To evaluate flexibility of the lower back and hamstrings muscles, participants completed the sit-and-reach test (SRT) first, followed by the toes touch (TT) test (Ayala et al., 2012; Mayorga-Vega et al., 2014). For the SRT test, participants adopted a seated position with their

feet, hip-width apart, and the knees extended. Then, they were instructed to lean forward slowly and gradually, without bouncing, and try to reach as far as possible with their hands on the tape measure. For the TT test, participants started from the stance on a wooden box. Their legs were outstretched with feet hip-width apart. Unlike the SRT, they had to tilt the chest forward using only gravity. The best score of the three trial was recorded to the nearest 0.1 cm, for both flexibility tests. For trial attempt, they were instructed to hold their maximal stretching position for 2 sec (Chung and Yuen, 1999).

To index cognitive performances, we used a mental calculation task. Performance in mental calculation paradigms was positively affected in past research by massage therapy, foam rolling, aromatherapy or Tai chi/ yoga interventions (Field et al., 1996; Diego et al., 1998; Field et al., 2005, 2010; Kerautret et al., In press). The task consisted in iterated subtractions (-7) from a starting number randomly selected between 500 and 1 000. The participants had 120 s to execute the maximal number of correct subtractions (i.e. total number of correct answers). This mental arithmetic task have been used in prior research (Kerautret et al., In press). To avoid contamination effects on other dependent variables, including skin conductance and heart rate variability recordings, this stressful task was performed at the end of the Pretest and Posttest assessments (Caviola et al., 2017).

## **b) Subjective variables**

### Participant's self-report ratings

Participants were requested to provide self-reports of their physical sensations on VAS ratings (0-100mm: 0 = “*Not at all*” to 10 = “*Strongly*”). They were asked to rate their subjective



sensations of WELL-BEING, RELAXATION, WARMTH, MUSCLE PAIN, PERCEIVED SIT-AND-REACH TEST FLEXIBILITY, PERCEIVED TOE TOUCH TEST FLEXIBILITY and ANXIETY.

### Physiotherapist's self-report ratings

Physiotherapist was requested to provide self-reports of their physical sensations on VAS ratings (0-100mm: 0 = “*Not at all*” to 10 = “*Strongly*”). They were asked to rate their subjective sensations of FATIGUE, TENSION, PRESSURE, FREQUENCY, AMPLITUDE and EFFICIENCY.

### Mood profile

Mood was evaluated using the BRUMS, including 24 descriptors divided in six subscales: fatigue, tension, vigor, mental confusion, depression and anger (Brandt et al., 2016). Each descriptor is ranked according to the question “How do you feel now?”. They were asked to rate their subjective sensations on a 5-point numerical rating scale (0-4 points: 0 = “None” to 4 = “Extremely”). The total score of each subscale is given by the sum of the points and varies between 0 and 16; high scores mean greater presence of the respective mood parameter.

### Mental workload

Mental workload was evaluated using the NASA-TLX based on a weighted average of ratings on six subscales: mental demands, physical demands, temporal (time) demands, performance, effort, and frustration (Hart and Staveland, 1988). They were asked to rate their feelings for each component on a 20-point Likert scale.

### C. STATISTICAL ANALYSIS

We used R (TeamR, 2018) and the package *nlme* (Pinheiro et al., 2018) to run linear mixed effects analyses on our dependent variables, with a by-subjects random intercept. We thus built random-coefficient regression models using the fixed effects of CONDITION (MANUAL MASSAGE, ROBOTIC MASSAGE) and TEST (PRETEST, POSTTEST), with interaction term. For flexibility tests, the additional fixed effects of TEST TYPE (TOE TOUCH, SIT-AND-REACH) were included in the model. For mental calculation task measure and psychometric measures, we respectively included the fixed effect of (i.e., CORRECT, FALSE and TOTAL) and VARIABLE TYPE (i.e., WELL-BEING, RELAXATION, WARMTH, MUSCLE PAIN, PERCEIVED SIT-AND-REACH TEST, PERCEIVED TOE TOUCH TEST, ANXIETY). For the GSR and HRV analysis, we included the fixed effect of TIME (PRETEST, DURING, POSTTEST).

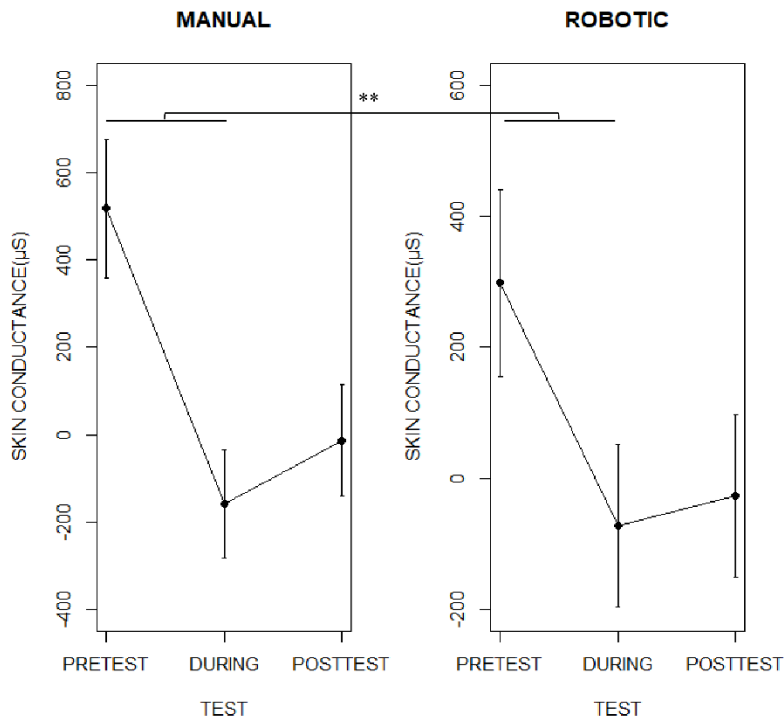
The statistical threshold was set up for a type 1 error rate of  $\alpha = 5 \%$ . As measures of partial effect sizes, we reported the proportion of explained variation, i.e., partial coefficients of determination,  $R_p^2$ .  $R_p^2$  were calculated using the *ad hoc* procedure for linear mixed effects models implemented in the *r2glmm* package (Edwards et al., 2008; Jaeger et al., 2017). Main effects and interactions were post-hoc investigated using general linear hypotheses testing of planned contrasts from the *multcomp* package. We applied Holm's sequential corrections to control the false discovery rate (Holm, 1979).

## D. RESULTS

### 1. Neurophysiological data

#### a) Skin conductance

The linear mixed effects analysis revealed that the TEST by CONDITION interaction affected GSR mean and delta measures ( $F(2,80) = 2.63, p < 0.05, R_p^2 = 0.06, p_{1-\beta} = 0.45. F(2,79) = 7.57, p < 0.001, R_p^2 = 0.16, p_{1-\beta} = 0.17$ ). Post hoc analyses revealed that GSR mean and delta BEFORE versus DURING in the MANUAL MASSAGE condition (BEFORE: 517.40, 95% CI 358.88 to 675.93; DURING: -159.01, 95% CI -282.44 to -35.58; fitted difference:  $676.41 \pm 97.88$ ; BEFORE: -581.28, 95% CI -777.36 to -385.19; DURING: 388.76, 95% CI 236.79 to -540.72; fitted difference:  $-970.03 \pm 123.84$ ) was greater than that recorded in the ROBOTIC MASSAGE condition (BEFORE: 298.00, 95% CI 155.93 to 440.07; DURING: -72.17, 95% CI -195.61 to 51.27; fitted difference:  $370.17 \pm 91.23$ ; BEFORE: 50.94, 95% CI -137.46 to 239.35; DURING: 415.19, 95% CI 263.22 to 567.16; fitted difference:  $-364.25 \pm 120.78$ ) (fitted difference of differences:  $306.2 \pm 134.0, p < 0.05$ ; fitted difference of differences:  $-605.79 \pm 173.14, p < 0.01$ ) (Figure 2). There was also a main effect of TEST for the GSR mean and delta measures ( $F(2, 80) = 31.46, p < 0.001, R_p^2 = 0.44, p_{1-\beta} = 0.45; F(2, 79) = 28.73, p < 0.001, R_p^2 = 0.42, p_{1-\beta} = 0.43$ ). Post hoc analyses revealed a decrease from BEFORE (403.56, 95% CI 294.65 to 512.48; -262.16, 95% CI -398.92 to -125.40) to the DURING (-113.95, 95% CI -204.87 to -23.03; -402.10, 95% CI 293.36 to 510.84) (fitted difference:  $-423.50 \pm 67.07, p < 0.001; 404.72 \pm 86.40, p < 0.001$ ) and from DURING (-113.95, 95% CI -204.87 to -23.03; 402.10, 95% CI 293.36 to 510.84) to FINAL (-19.94, 95% CI -111.84 to 71.96; 142.56, 95% CI 33.82 to 251.30) (fitted difference:  $517.52 \pm 66.68, p < 0.001; -664.26 \pm 86.40, p < 0.001$ ).



**Figure 2.** Fitted values revealed by the linear mixed effects analysis for the TEST\*CONDITION interaction on skin conductance, represented with their 95% confidence intervals (error bars). \*  $p < 0.05$ .

b) Cardiacactivity data

We found no CONDITION by TEST interaction effect on RMSSD and LF/HF ratio measures (all  $p > 0.05$ ). There was no main effect for RMSSD data ( $p > 0.05$ ). However, there was a main effect of TEST for the LF/HF ratio ( $F(2, 87) = 4.40, p < 0.05, R_p^2 = 0.09, p_{1-\beta} = 0.56$ ). Post hoc analyses revealed an increase from thePRETEST (0.59, 95% CI 0.39 to 0.78) to the POSTTEST (0.86, 95% CI 0.66 to 1.05) (fitted difference:  $-0.27 \pm 0.91, p < 0.01$ ).

## **2. Motor and cognitive performances**

### **a) Flexibility data**

The linear mixed effects analysis revealed no three-way interaction between CONDITION, TEST TYPE and TEST ( $p > 0.05$ ). There was no CONDITION by TEST interaction effect, nor TYPE TEST by TEST interaction effect (all  $p > 0.05$ ). However, there was a trend for a main effect of TYPE TEST in the SRT and TT tests ( $F(1,132) = 3.15$ ,  $p < 0.07$ ,  $R_p^2 = 0.02$ ,  $p_{1-\beta} = 0.76$ ). Post hoc analyses revealed that SRT test was greater than TT test (SRT: 2.25 cm, 95% CI -1.50 to 6.00; TT: 1.61, 95% CI -2.13 to 5.36; fitted difference: 0.64 cm  $\pm$  0.36).

### **b) Mental calculation**

We found no CONDITION by TEST interaction effect ( $p > 0.05$ ). However, there was a main effect of TEST for the TOTAL SCORE responses ( $F(1,57) = 12.37$ ,  $p < 0.001$ ,  $R_p^2 = 0.18$ ,  $p_{1-\beta} = 0.19$ ). Post hoc analyses revealed that PRETEST versus POSTTEST in TOTAL SCORE increase (PRETEST: 23.43, 95% CI 18.73 to 28.12; POSTTEST: 26.45, 95% CI 21.76 to 31.14; fitted difference: 3.02  $\pm$  0.86).

## **3. Change in subjective scores**

### **a) Participant's self-report**

The linear mixed effects analysis revealed that the TEST by CONDITION interaction affected VAS ratings of physical sensations ( $F(1, 536) = 4.26$ ,  $p < 0.05$ ,  $R_p^2 = 0.01$ ,  $p_{1-\beta} = 0.63$ ). Post hoc analyses revealed that PRETEST versus POSTTEST in the MANUAL MASSAGE condition (PRETEST: 6.94, 95% CI 5.95 to 7.92; POSTTEST: 7.99, 95% CI 7.01 to 8.98; fitted difference:

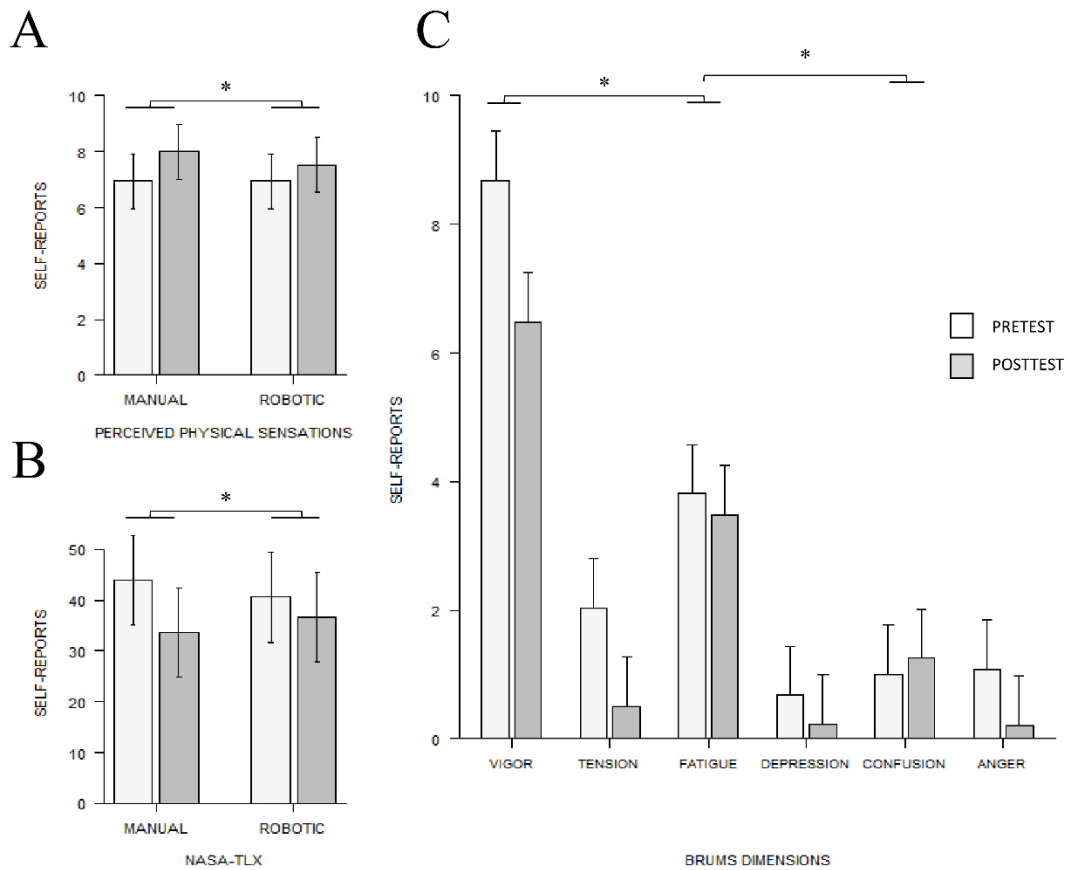
1.06 ± 0.17) was greater than that recorded in the ROBOTIC MASSAGE condition (PRETEST: 6.95, 95% CI 5.97 to 7.94; POSTTEST: 7.52, 95% CI 6.54 to 8.51; fitted difference: 0.57 ± 0.17) (fitted difference of differences: -0.49 ± 0.24,  $p < 0.04$ ).

b) Mood profile

The linear mixed effects analysis revealed that the TEST by DIMENSION interaction affected the BRUMS scores ( $F(5, 448) = 3.09$ ,  $p < 0.01$ ,  $Rp^2 = 0.03$ ,  $p_{1-\beta} = 0.82$ ). Post hoc analyses revealed that the difference in perceived VIGOR between the PRETEST versus POSTTEST (PRETEST: 8.68, 95% CI 7.92 to 9.44; POSTTEST: 6.49 95% CI 5.72 to 7.25; fitted difference: 2.20 ± 0.50) was greater than the perceived CONFUSION (PRETEST: 1.01, 95% CI 0.25 to 1.77; POSTTEST: 1.26 95% CI 0.50 to 2.02; fitted difference: -0.25 ± 0.50) (fitted difference of differences: -2.45 ± 0.71,  $p < 0.01$ ) and tends to significance in perceived FATIGUE (PRETEST: 3.81, 95% CI 3.05 to 4.57; POSTTEST: 3.49 95% CI 2.72 to 4.25; fitted difference: 0.32 ± 0.50) (fitted difference: -1.88 ± 0.71,  $p < 0.05$ ).

c) Mental workload

The linear mixed effects analysis revealed that the TEST by CONDITION interaction affected the NASA-TLX scores ( $F(1, 451) = 3.71$ ,  $p < 0.05$ ,  $Rp^2 = 0.01$ ,  $p_{1-\beta} = 0.98$ ). Post hoc analyses revealed that PRETEST versus POSTTEST in the MANUAL MASSAGE condition (PRETEST: 43.87, 95% CI 35.03 to 44.82; POSTTEST: 33.66, 95% CI 32.71 to 42.50; fitted difference: -10.21 ± 2.32) was greater than that recorded in the ROBOTIC MASSAGE condition (PRETEST: 6.95, 95% CI 5.97 to 7.94; POSTTEST: 7.52, 95% CI 6.54 to 8.51; fitted difference: -3.88 ± 2.32) (fitted difference of differences: 6.33 ± 3.29,  $p < 0.05$ ).



**Figure 3.** **A.** Barplot of the TEST\*CONDITION interaction effects obtained for subjective scores. **B.** Barplot of the TEST\*CONDITION interaction effects obtained for mental workload. **C.** Barplot of the TEST\*DIMENSION interaction effects obtained for mood profile. Average fitted values by the linear mixed-effects analysis are presented with 95% confidence intervals (dotted bars). \*  $p < 0,05$ .

d) Physiotherapist self-reports

Fatigue and tension self-reports

The ORDER by DAY interaction affected the FATIGUE and TENSION self-reports ( $F(1, 67) = 1.24, p < 0.01, R_p^2 = 0.12, p_{1-\beta} = 0.24$ ). Post hoc analyses revealed that the increase in FATIGUE and TENSION self-reports from the FIRST to the LAST participant in the FIRST DAY (FIRST:  $0.875 \pm 0.34$ ; LAST:  $2.85 \pm 0.93$ ) was greater than that recorded in the SECOND

DAY(FIRST:  $0.20 \pm 0.00$ ; LAST:  $0.975 \pm 0.26$ ) (fitted difference:  $-0.11 \pm 0.35$ ). There was also a main effect of TEST ( $F(1,67) = 2.46$ ,  $p < 0.001$ ,  $Rp^2 = 0.22$ ,  $p_{1-\beta} = 0.24$ ), DAY ( $F(1,67) = 17.71$ ,  $p < 0.001$ ,  $Rp^2 = 0.67$ ,  $p_{1-\beta} = 0.68$ ), and ORDRE ( $F(1,67) = 20.99$ ,  $p < 0.001$ ,  $Rp^2 = 0.70$ ,  $p_{1-\beta} = 0.71$ ) in FATIGUE and TENSION self-reports. Post hoc analyses revealed that PRETEST versus POSTTEST increase in FATIGUE and TENSION self-reports (PRETEST:  $1.19 \pm 0.81$ ; POSTTEST:  $1.53 \pm 0.88$ ) (fitted difference:  $0.37 \pm 0.09$ ). Post hoc analyses also revealed that FATIGUE and TENSION self-reports after the LAST ( $2.85 \pm 0.93$ ) participant was greater than the FIRST ( $0.48 \pm 0.35$ ) (fitted difference:  $0.35 \pm 0.05$ ). To conclude, post-hoc analyses revealed that FATIGUE and TENSION self-reports after the FIRST DAY ( $1.90 \pm 0.84$ ) was greater than the SECOND ( $0.90 \pm 0.43$ ) (fitted difference:  $0.28 \pm 0.19$ ).

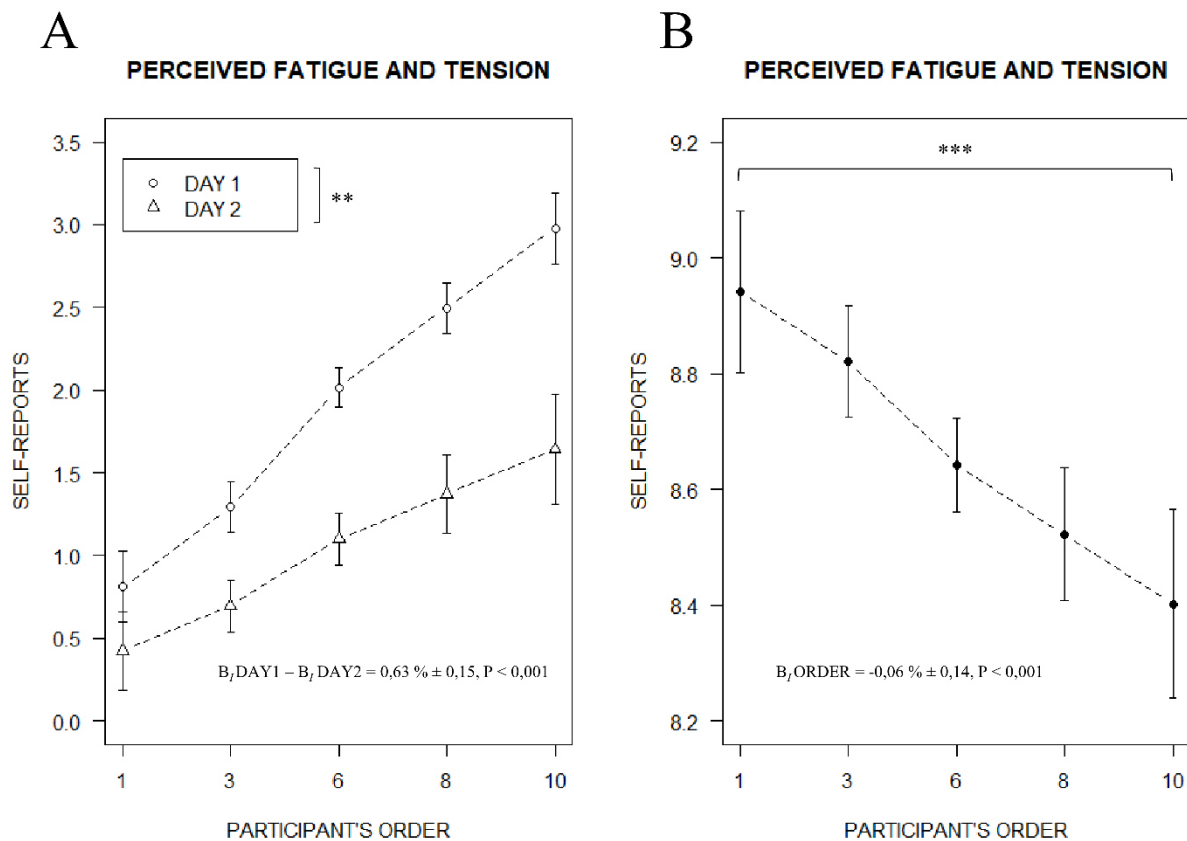
#### Pressure, frequency and amplitude self-reports

We found no ORDER by DAY interaction effect ( $p > 0.05$ ). However, there was a main effect of ORDER for the PRESSURE, FREQUENCY and AMPLITUDE self-reports ( $F(1,51) = 1.34$ ,  $p < 0.001$ ,  $Rp^2 = 0.25$ ,  $p_{1-\beta} = 0.26$ ). There was also a main effect of DAY for the PRESSURE, FREQUENCY and AMPLITUDE self-reports ( $F(1,51) = 2.31$ ,  $p < 0.001$ ,  $Rp^2 = 0.37$ ,  $p_{1-\beta} = 0.38$ ). Post hoc analyses also revealed that PRESSURE, FREQUENCY and AMPLITUDE self-reports after the FIRST ( $8.93 \pm 0.41$ ) participant was greater than the LAST ( $7.83 \pm 0.06$ ) (fitted difference:  $0.06 \pm 0.01$ ). To conclude, post-hoc analyses revealed that PRESSURE, FREQUENCY and AMPLITUDE self-reports after the SECOND DAY ( $8.93 \pm 0.26$ ) was greater than the FIRST ( $8.51 \pm 0.36$ ) (fitted difference:  $0.35 \pm 0.08$ ).



## Efficiency self-reports

We found no ORDER by DAY interaction effect ( $p > 0.05$ ). However, there was a main effect of ORDER for the EFFICIENCY self-reports ( $F(1,16) = 1.02$ ,  $p < 0.05$ ,  $Rp^2 = 0.32$ ,  $p_{1-\beta} = 0.50$ ). Post hoc analyses also revealed that EFFICIENCY self-reports after the SECOND DAY ( $9.00 \pm 0.21$ ) was greater than the FIRST ( $8.52 \pm 0.46$ ) (fitted difference:  $0.48 \pm 0.18$ ).



**Figure 4. A.** Plot display illustrating the ORDER by DAY interaction of massages on physiotherapists' fatigue and tension, represented with 95% confidence intervals (error bars). **B.** Plot display the main ORDER effect of massages on physiotherapists' pressure, frequency and amplitude, represented with 95% confidence intervals (error bars). \*\*\*  $p < 0,001$ . \*\*  $p < 0,01$ .

## **E. DISCUSSION**

The primary aim of this study was to investigate whether RM interventions yielded comparable benefits compared to MM interventions on neurophysiological, behavioral and psychometric data. To the best of our knowledge, this is the first study comparing the selective benefits of RM and MM in an experimental design including HRV and EDA activity. RM and MM exhibited comparable effects on orthosympathetic activity and sympathovagal balance indexes. However, compared to robotic massage, manual intervention by the physiotherapist benefited from better relaxation, indexed by a greater drop in skin conductance, a neurovegetative index. Without any previous experience with robotic massage, this difference in results could be explained by a deep feeling of apprehension in front of the robot. This potential psychological barrier represents a research subject, and should interest future studies within the framework of longitudinal protocols for example. Also, surprisingly no massage interventions elicited an increase in flexibility but improved cognitive performances. In addition, although MM induced better results on the participants' perceived physical sensations, MM also elicited a higher mental workload than RM. Overall, the successive repetition of MM decreases the physiotherapist's capacities as well as his sensations of productivity.

### **1. The effects of robotic massage: a relevant alternative solution**

We expected comparable results in neurophysiological and flexibility responses due to the nature of these interventions. Overall, both interventions induce mechanical pressure on soft tissue and would stimulate mechanoreceptors (Schleip, 2003a, 2003b; Wilke et al., 2020). However, MM elicited slightly greater benefit in a neurovegetative indexes while no change in flexibility was recorded in both interventions. Although speculative, we believe that the

participants' lack of experience with the robotic solution created a form of stress that could explain this difference (J. Shen et al., 2015). To also explain this difference, we suspect the dissimilarity of RM and MM interventions regarding the motor control strategy (Kerautret et al., 2020). Participants receiving MM remain passive and motionless, which promotes relaxation states but also emphasizes a predominant retroactive mode of action control (Kerautret et al., 2020, In press). Conversely, theoretically RM could benefit from more versatility with a conceptual mixed nature. In normal use, the robot positions the user in a comparable passive situation that elicited by the MM, i.e., a predominant retroactive mode of action control, due to a pre-defined massage program (Kerautret et al., 2020). However, RM can also benefit to a predominant proactive mode of action control as elicited in self-myofascial release techniques (Kerautret et al., 2020, 2021, In press). Hence, without leaving complete autonomy to users, some companies such as Capsix Robotics explore and exploit the potential of interaction offered by cobotics via a remote control available to users. By activating the remote control, the user benefits from a freedom of adjustment, therefore implying a share of responsibility in the massage success. Also, in this configuration, the user can therefore anticipate the massage robot's maneuvers, and adjust the pressure level accordingly to their needs (Kerautret et al., 2020, 2021, In press). Therefore, this human/robot interaction would thus promote a novel stochastic sensorimotor user experience byswitch from a retroactive to a proactive control mode (Kerautret et al., 2020). Despite this fundamental distinction, in this experiment RM did not appear to elicit additional benefits. Both interventions yielded a neurophysiological de-arousal, as indicated by a progressive decrease in skin conductance as well as an increase in LF/HF ratio. This dual effect is typically associated to a shift from sympathetic to parasympathetic dominance, indicative to a relaxation state as demonstrated after guided relaxation based on yoga(Pagani et al., 1997; Vempati and Telles, 2002). However,

this conclusion is not straightforward regarding the LF/HF ratio. A recent study challenges the relevance of this measure to accurately measure cardiac sympathovagal balance (Billman, 2013). Nonetheless, such comparable neurophysiological and psychophysiological responses in the RM and MM conditions are not surprising considering that both interventions involved mechanical pressures on soft tissues. While some conflicting results were observed (Hemmings et al., 2000; Drust et al., 2003), present results further corroborate past reports. MM was associated with increased cardiac parasympathetic activity as well as improved relaxation measures indexes (Delaney et al., 2002; Smith et al., 2013). Also, these results confirmed the positive influence of MM on cognitive performance, well-being and stress (Field et al., 1996; Sharpe et al., 2007; Kerautret et al., In press). Regarding the classic RM, i.e., without remote control, previous data reported comparable well-being impact (Ariji et al., 2009b; Obokawa et al., 2009; Ariji et al., 2010; Hiraiwa et al., 2013; Ariji et al., 2015, 2016). This suggests that the mixed nature induced by the RM did not interfere with cognitive performance and well-being, and did not allow to benefit from an additional improvement. Hence, RM seems close to the MM effects despite the complexities and specificities of manual interventions. Overall, present results add to the body evidence suggesting that the effects of RM and MM on performance and well-being are largely comparable. A possible account to these comparable results could be due to the touch of the massage hand and the trajectories of the robotic arm. However, RM differed to MM by the addition of a remote control, thus eliciting a proactive mode of action control. During this RM condition, participants paid attention to body sensations and individual pressure level. Although it seems difficult (not to say impossible) to purely replace the massage delivered by a physiotherapist by a robot, RM can be regarded as an important support.

## **2. At the edge/frontier of the human capacities**

Present results exhibited a progressive physiotherapist's fatigability. Therefore, MM requires intense and repetitive work by the practitioner (Kerautret et al., 2020). Unsurprisingly, the succession of massages increased his perceived fatigue and tension, and this effect was accentuated over the interventions. The physiotherapist exhibited a higher level of fatigue and tension after the last massage compared to the first, and it was particularly true during the first experimental day. In addition, the physiotherapist self-reported a decrease in physical capacities. Present findings exhibited a decrease in pressure level, frequency as well as amplitude throughout the massages, thus could elicit difficulties to maintain the massage quality. Possibly, the fatigue of the physiotherapist could be due to the amount of exposure to repeated uncomfortable postures, maneuvers and manipulations over the time course (Kerautret et al., 2020). More alarming, the repetitive practice of massage can cause pathologies such as musculoskeletal disorder in many professionals (Albert et al., 2008; Suryanarayanan Murali et al., 2014; Rossetini et al., 2016). Considering this decline in physiotherapist's capacities and risk of long-term injury, RM represent a solid alternative to provide massage with a constant quality, and therefore assist the physiotherapist in their workload and meet the high demand (Kerautret et al., 2020). The main strength of robots lies in their inherent abilities which are; their precision, the reliability of their reproduction as well as their non-fatigability. Also, contrary to humans, a robot does not present any availability problem, it can be used at any time (Kerautret et al., 2020). Hence, RM can alleviate some of the workload of health care professionals such as massage, a simple and reproducible task, thus releasing the physiotherapist for more complex and demanding manipulations that cannot be performed by a robot (Kerautret et al., 2020). Thus robotic solutions would also provide an opportunity to overcome the frequent limited medical

resources, and thereby democratize their accessibility (Golovin et al., 2018; Kerautret et al., 2020).

### **3. Implications and futures directions**

This study compared the effectiveness of RM to MM on neurophysiological, behavioral and psychometric indexes. To the best of our knowledge, this is the first comparative study with a collaborative and intelligent robot. Previous findings included a robot limited to oral health problems applications such as dry-mouth, temporomandibular joint. (Koga et al., 2008; Obokawa et al., 2009; Ishii et al., 2009; Ariji et al., 2009a, 2009b, 2010, 2016). The Waseda-Asahi oral-rehabilitation robot No.1 is specialized in the temporalis and masseter muscles treatment. Despite its standardized maneuvers and its lack of morphology adaptation, this robot recorded results almost as important as an experienced doctor (Koga et al., 2008). To resolve the main issues mentioned previously, collaborative robots seem to offer promising and innovative solutions. The present findings confirm the usefulness of RM to improve psychophysiological indexes (Golovin et al., 2018; Kerautret et al., 2020). Although the physiotherapist's expertise still remains unequalled, these results are promising. Due to the lack of preliminary diagnosis of users and certain physical constraints encountered by the robot in its movements, it is still impossible to purely and simply replace the intervention of a physiotherapist to perform a massage (Kerautret et al., 2020). To date, the innovative conceptual approach, i.e., the switch from a retroactive to a proactive control mode, did not elicit additional effect, eliciting by the interaction with the robot and control the parameters of the massage with a remote-control device in the way it was proposed for this experiment. Indeed, even within manual therapy, the physiotherapist's sensitivity seems to represent a key issue. Accordingly, (2007) provided evidence that different didactic training induced variability

in the results. Therapist with 950 h of didactic training achieved significantly better results in muscle soreness than with 450 or 700 h of training (Moraska, 2007). Nonetheless, despite its inability to reproduce the diversity and the complexity of human hands, RM represent a promising alternative to overcome the main obstacles of massage's democratization, i.e., the deficit of masseurs as well as their limitation in terms of reliability and reproducibility (Kerautret et al., 2020). Present study reported meaningful practical implications in manual therapy field, but further studies are expected to confirm and expand these results to elderly people and clinical populations.

#### **4. Limitations**

A main limitation of this study may be the lack of a non-intervention group, especially to decide between RM and MM flexibility results. It is possible that despite our standardization precautions, the time delay between the end of the massage interventions and the posttest was exceeded. Using ultrasound shear wave elastography, Crommert et al. (2015) observed, that the effects of massage interventions on muscle stiffness returned to basal level after only 3 minutes, which is short. The second hypothesis is that the muscles targeted in our experiment were insufficient to induce an improvement in the SRT and TT tests. Although, there is compelling evidence that massages could elicit an improvement in these flexibility tests, most of them were not limited to the back muscles, and included lower limbs muscles (Arabaci, 2008; Arazi et al., 2012). Indeed, the SRT and TT tests are widely used to estimate the hamstrings and lumbopelvic region flexibility (Ayala et al., 2012; Mayorga-Vega et al., 2014). Future research should establish in greater details whether massage interventions on a larger area of muscles would validate the comparable benefits of RM.

The second limitation could be explained by negative attitudes and emotions towards the robot in some participants. Indeed, the human's sense of apprehension towards robots is the subject of serious scientific research (J. Shen et al., 2015). In particular, psychological scales for anxiety and negative attitudes toward robots have been used (T. Nomura et al., 2006, 2008). To reduce this bias, a familiarization session with the robot could be useful and interesting. However, in order not to make our protocol more complex, we decided not to include a familiarization session in both conditions. Therefore, future studies should focus on this aspect by carrying out, for example, a longitudinal study.

Third limitation, we did not implement objective monitoring of the pressures exerted by the physiotherapist on soft tissues. MM which is above all an empirical practice, therefore there is no tool or device to objectively quantify the level of pressure exerted. Consequently, it was impossible for us to know the degree of similarity between the RM and the MM on the same participant. To overcome this limitation, researchers should use new technologies to design a custom device that controls the stability of force and speed contrary to the robot, whose logs would allow us to record pressure data at any time. However, such a device can be expensive and complex to design. The main difficulty will be not to interfere with the ecological validity of the practice. Nonetheless, these results are attractive but remain to be confirmed by further measures.

## **F. CONCLUSION**

This prospective investigation compared RM and MM interventions. Both massage interventions elicited comparable results in parasympathetic activity, cognitive performance, mood profile and flexibility. MM remained the most efficient method to induce physiological



de-arousal. Nonetheless, participants reported a higher mental workload in the MM condition, and due to the massages repetition, the physiotherapist elicited a decrease in psychophysiological capacities compared to the robot. Therefore, RM appears to be a promising alternative for practitioners despite the absence of preliminary diagnostic and fine adjustments derived from ongoing feedback. Indeed, the addition of the remote control on some robotic solutions, thus promoting the massage individualization, seems to counterbalance the main issues mentioned previously. In view of these circumstances, RM represent an opportunity to benefit from a novel stochastic sensorimotor user experience. Spurred by the present findings and this conceptual approach, further studies are expected to confirm and examine the relevance of future RM interventions. These studies should also consider the psychological factor by integrating a familiarization session or using a population already familiar by several RM sessions. Due to its more reasonable cost, RM claims to offer access to a large-scale massage practice, and to increase the appetite of individuals. These prospects for use point to future studies on the effects of long-term massage.

## G. REFERENCES

Albert, W.J., Currie-Jackson, N., Duncan, C.A., 2008. A survey of musculoskeletal injuries amongst Canadian massage therapists. *J. Bodyw. Mov. Ther.* 12, 86–93. <https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2007.03.003>

Arabaci, R., 2008. Acute effects of pre-event lower limb massage on explosive and high speed motor capacities and flexibility. *J. Sports Sci. Med.* 7, 549–555.

Arazi, H., Asadi, A., Hoseini, K., 2012. Comparison of two different warm-ups (static-stretching and massage): effects on flexibility and explosive power. *Acta Kinesiol.* 6, 55–59.

Ariji, Y., Katsumata, A., Hiraiwa, Y., Izumi, M., Iida, Y., Goto, M., Sakuma, S., Ogi, N., Kurita, K., Ariji, E., 2009a. Use of sonographic elastography of the masseter muscles for optimizing massage pressure: a preliminary study. *J. Oral Rehabil.* 36, 627–635.

Ariji, Y., Katsumata, A., Hiraiwa, Y., Izumi, M., Sakuma, S., Shimizu, M., Kurita, K., Ariji, E., 2010. Masseter muscle sonographic features as indices for evaluating efficacy of massage treatment. *Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol. Oral Radiol. Endodontology* 110, 517–526. <https://doi.org/10.1016/j.tripleo.2010.05.003>

Ariji, Y., Katsumata, A., Ogi, N., Izumi, M., Sakuma, S., Iida, Y., Hiraiwa, Y., Kurita, K., Igarashi, C., Kobayashi, K., Ishii, H., Takanishi, A., Ariji, E., 2009b. An oral rehabilitation robot for massaging the masseter and temporal muscles: a preliminary report. *Oral Radiol.* 25, 53–59. <https://doi.org/10.1007/s11282-009-0014-0>

Ariji, Y., Nakayama, M., Nishiyama, W., Ogi, N., Sakuma, S., Katsumata, A., Kurita, K., Ariji, E., 2016. Can sonographic features be efficacy predictors of robotic massage

treatment for masseter and temporal muscle in patients with temporomandibular disorder with myofascial pain? *CRANIO*® 34, 13–19. <https://doi.org/10.1179/2151090314Y.0000000037>

Ariji, Y., Nakayama, M., Nishiyama, W., Ogi, N., Sakuma, S., Katsumata, A., Kurita, K., Ariji, E., 2015. Potential clinical application of masseter and temporal muscle massage treatment using an oral rehabilitation robot in temporomandibular disorder patients with myofascial pain. *CRANIO*® 33, 256–262. <https://doi.org/10.1179/2151090314Y.0000000030>

Ayala, F., Sainz de Baranda, P., De Ste Croix, M., Santonja, F., 2012. Reproducibility and criterion-related validity of the sit and reach test and toe touch test for estimating hamstring flexibility in recreationally active young adults. *Phys. Ther. Sport* 13, 219–226. <https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2011.11.001>

Beck, M.F., 2012. *Theory and practice of therapeutic massage*. Cengage Learning.

Billman, G., 2013. The LF/HF ratio does not accurately measure cardiac sympatho-vagal balance. *Front. Physiol.* 4, 26. <https://doi.org/10.3389/fphys.2013.00026>

Brandt, R., Herrero, D., Massetti, T., Crocetta, T.B., Guarnieri, R., de Mello Monteiro, C.B., da Silveira Viana, M., Bevilacqua, G.G., de Abreu, L.C., Andrade, A., 2016. The Brunel Mood Scale rating in mental health for physically active and apparently healthy populations. *Health (N. Y.)* 8, 125–132. <https://doi.org/10.4236/health.2016.82015>

Callaghan, M.J., 1993. The role of massage in the management of the athlete: a review. *Br. J. Sports Med.* 27, 28. <https://doi.org/10.1136/bjism.27.1.28>

Caviola, S., Carey, E., Mammarella, I.C., Szucs, D., 2017. Stress, time pressure, strategy selection and math anxiety in mathematics: a review of the literature. *Front. Psychol.* 8, 1488. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01488>

Chapman, W.H.H., Albrecht, R.J., Kim, V.B., Young, J.A., Chitwood, W.R., 2002. Computer-assisted laparoscopic splenectomy with the da Vinci™ surgical robot. *J. Laparoendosc. Adv. Surg. Tech.* 12, 155–159. <https://doi.org/10.1089/10926420260188038>

Chung, P.-K., Yuen, C.-K., 1999. Criterion-related validity of sit-and-reach tests in university men in Hong Kong. *Percept. Mot. Skills* 88, 304–316. <https://doi.org/10.2466/pms.1999.88.1.304>

Collet, C., Salvia, E., Petit-Boulanger, C., 2014. Measuring workload with electrodermal activity during common braking actions. *Ergonomics* 57, 886–896. <https://doi.org/10.1080/00140139.2014.899627>

Delaney, J., Leong, K.S., Watkins, A., Brodie, D., 2002. The short-term effects of myofascial trigger point massage therapy on cardiac autonomic tone in healthy subjects. *J. Adv. Nurs.* 37, 364–371.

Diego, M.A., Jones, N.A., Field, T., Hernandez-reif, M., Schanberg, S., Kuhn, C., Galamaga, M., McAdam, V., Galamaga, R., 1998. Aromatherapy positively affects mood, EEG patterns of alertness and math computations. *Int. J. Neurosci.* 96, 217–224. <https://doi.org/10.3109/00207459808986469>

Drust, B., Atkinson, G., Gregson, W., French, D., Binningsley, D., 2003. The effects of massage on intra muscular temperature in the vastus lateralis in humans. *Int. J. Sports Med.* 24, 395–399. <https://doi.org/10.1055/s-2003-41182>

Edwards, L.J., Muller, K.E., Wolfinger, R.D., Qaqish, B.F., Schabenberger, O., 2008. An R<sup>2</sup> statistic for fixed effects in the linear mixed model. *Stat. Med.* 27, 6137–6157. <https://doi.org/10.1002/sim.3429>

Electrophysiology, T.F. of the E.S. of C. the N.A.S. of P., 1996. Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *Circulation* 93, 1043–1065. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.93.5.1043>

Eriksson Crommert, M., Lacourpaille, L., Heales, L.J., Tucker, K., Hug, F., 2015. Massage induces an immediate, albeit short-term, reduction in muscle stiffness. *Scand. J. Med. Sci. Sports* 25, e490–e496. <https://doi.org/10.1111/sms.12341>

Estradère, J.D.J., 1863. Du massage son historique, ses manipulations, ses effets physiologiques et thérapeutiques par J. Estradère. Delahaye.

Field, T., Diego, M., Hernandez-Reif, M., 2010. Tai chi/yoga effects on anxiety, heartrate, EEG and math computations. *Complement. Ther. Clin. Pract.* 16, 235–238. <https://doi.org/10.1016/j.ctcp.2010.05.014>

Field, T., Hernande-Reif, M., Diego, M., Schanberg, S., Kuhn, C., 2005. Cortisol decreases and serotonin and dopamine increase following massage therapy. *Int. J. Neurosci.* 115, 1397–1413. <https://doi.org/10.1080/00207450590956459>

Field, T., Ironson, G., Scafidi, F., Nawrocki, T., Goncalves, A., Burman, I., Pickens, J., Fox, N., Schanberg, S., Kuhn, C., 1996. Massage therapy reduces anxiety and enhances EEG pattern of alertness and math computations. *Int. J. Neurosci.* 86, 197–205. <https://doi.org/10.3109/00207459608986710>

Goldberger, J.J., 1999. Sympathovagal balance: how should we measure it? *Am. J. Physiol.-Heart Circ. Physiol.* 276, H1273–H1280. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.1999.276.4.H1273>

Golovin, V., Samorukov, A., Arkhipov, M., Kocherevskaya, L., 2018. Robotic restorative massage to increase working capacity. *Altern Integr Med* 7, 2. <https://doi.org/10.4172/2327-5162.1000261>

Guimberteau, J.C., 2004. *Promenades sous la peau*. Elsevier Masson.

Guimberteau, J.C., Findley, T.W., Kapandji, A.I., Armstrong, C., 2016. *L'architecture du corps humain vivant: Le monde extracellulaire, les cellules et le fascia révélés par l'endoscopie intratissulaire*. Ed Sully, Vannes, France.

Hart, S.G., Staveland, L.E., 1988. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research, in: Hancock, P.A., Meshkati, N. (Eds.), *Advances in Psychology*. North-Holland, pp. 139–183. [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62386-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9)

Hemmings, B., Smith, M., Graydon, J., Dyson, R., 2000. Effects of massage on physiological restoration, perceived recovery, and repeated sports performance. *Br. J. Sports Med.* 34, 109. <https://doi.org/10.1136/bjism.34.2.109>

Hiraiwa, Y., Ariji, Y., Kise, Y., Sakuma, S., Kurita, K., Ariji, E., 2013. Efficacy of massage treatment technique in masseter muscle hardness: robotic experimental approach. *CRANIO®* 31, 291–299. <https://doi.org/10.1179/crn.2013.31.4.007>

Holm, S., 1979. A Simple Sequentially Rejective Multiple Test Procedure. *Scand. J. Stat.* 6, 65–70.

Ishii, H., Koga, H., Obokawa, Y., Solis, J., Takanishi, A., Katsumata, A., 2009. Development and experimental evaluation of oral rehabilitation robot that provides maxillofacial massage to patients with oral disorders. *Int. J. Robot. Res.* 28, 1228–1239. <https://doi.org/10.1177/0278364909104295>

J. Shen, O. Rudovic, S. Cheng, M. Pantic, 2015. Sentiment apprehension in human-robot interaction with NAO, in: 2015 International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction (ACII). Presented at the 2015 International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction (ACII), pp. 867–872. <https://doi.org/10.1109/ACII.2015.7344676>

Jaeger, B.C., Edwards, L.J., Das, K., Sen, P.K., 2017. An R2 statistic for fixed effects in the generalized linear mixed model. *J. Appl. Stat.* 44, 1086–1105. <https://doi.org/10.1080/02664763.2016.1193725>

Kerautret, Y., Di Rienzo, F., Eyssautier, C., Guillot, A., 2020. Selective effects of manual massage and foam rolling on perceived recovery and performance: current knowledge and future directions toward robotic massages. *Front. Physiol.* 11, 1567. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.598898>

Kerautret, Y., Guillot, A., Daligault, S., Di Rienzo, F., 2021a. Foam rolling elicits neuronal relaxation patterns distinct from manual massage: a randomized controlled trial. *Brain Sci.* 11. <https://doi.org/10.3390/brainsci11060818>

Kerautret, Y., Guillot, A., Di Rienzo, F., 2021b. Evaluating the effects of embedded self-massage practice on strength performance: a randomized crossover pilot trial. *PLOS ONE* 16, e0248031. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0248031>

Koga, H., Usuda, Y., Matsuno, M., Ogura, Y., Ishii, H., Solis, J., Takanishi, A., Katsumata, A., 2008. Development of the oral rehabilitation robot WAO-1. Presented at the Biomedical Robotics and Biomechatronics, 2008. BioRob 2008. 2nd IEEE RAS & EMBS International Conference on, IEEE, pp. 556–561.

Lefranc, M., Peltier, J., 2016. Evaluation of the ROSA™ Spine robot for minimally invasive surgical procedures. *Expert Rev. Med. Devices* 13, 899–906. <https://doi.org/10.1080/17434440.2016.1236680>

Maheshwari, A., Norby, F.L., Soliman, E.Z., Adabag, S., Whitsel, E.A., Alonso, A., Chen, L.Y., 2016. Low heart rate variability in a 2-minute electrocardiogram recording is associated with an increased risk of sudden cardiac death in the general population: the atherosclerosis risk in communities study. *PLOS ONE* 11, e0161648. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161648>

Mayorga-Vega, D., Merino-Marban, R., Viciano, J., 2014. Criterion-Related Validity of Sit-and-Reach Tests for Estimating Hamstring and Lumbar Extensibility: a Meta-Analysis. *J. Sports Sci. Med.* 13, 1–14.



Mazzeo, C.A., 2011. Nurturing the mind/body connection: A phenomenological analysis of emotional release in massage therapy. Proquest, Umi Dissertation Publishing.

Moraska, A., 2007. Therapist education impacts the massage effect on postrace muscle recovery. *Med. Sci. Sports Exerc.* 39, 34–37.

Obokawa, Y., Solis, J., Ishii, H., Koga, H., Takanishi, A., Katsumata, A., 2009. Clinical massage therapy with the oral-rehabilitation robot in patients with temporomandibular joint disorders. Presented at the Information Technology and Applications in Biomedicine, 2009. ITAB 2009. 9th International Conference on, IEEE, pp. 1–4.  
**<https://doi.org/10.1109/ITAB.2009.5394420>**

Pagani, M., Montano, N., Alberto, P., Malliani, A., Abboud, F.M., Birkett, C., Somers, V.K., 1997. Relationship between spectral components of cardiovascular variabilities and direct measures of muscle sympathetic nerve activity in humans. *Circulation* 95, 1441–1448.  
**<https://doi.org/10.1161/01.CIR.95.6.1441>**

Pinheiro, J., Bates, D., DebRoy, S., Sarkar, D., Heisterkamp, S., Van Willigen, B., 2018. nlme: Linear and nonlinear mixed effects models. R package version 3. 1-139.

Poppendieck, W., Wegmann, M., Ferrauti, A., Kellmann, M., Pfeiffer, M., Meyer, T., 2016. Massage and performance recovery: a meta-analytical review. *Sports Med.* 46, 183–204.  
**<https://doi.org/10.1007/s40279-015-0420-x>**

Rossettini, G., Rondoni, A., Schiavetti, I., Tezza, S., Testa, M., 2016. Prevalence and risk factors of thumb pain in Italian manual therapists: an observational cross-sectional study. *Work Read. Mass* 54, 159–169. **<https://doi.org/10.3233/wor-162289>**

Schleip, R., 2003a. Fascial plasticity – a new neurobiological explanation: Part 1. *J. Bodyw. Mov. Ther.* 7, 11–19. [https://doi.org/10.1016/S1360-8592\(02\)00067-0](https://doi.org/10.1016/S1360-8592(02)00067-0)

Schleip, R., 2003b. Fascial plasticity – a new neurobiological explanation Part 2. *J. Bodyw. Mov. Ther.* 7, 104–116. [https://doi.org/10.1016/S1360-8592\(02\)00076-1](https://doi.org/10.1016/S1360-8592(02)00076-1)

Schulz, K.F., Altman, D.G., Moher, D., 2010. CONSORT 2010 statement: updated guidelines for reporting parallel group randomized trials. *Ann. Intern. Med.* 152, 726–732.

Sharpe, P.A., Williams, H.G., Granner, M.L., Hussey, J.R., 2007. A randomised study of the effects of massage therapy compared to guided relaxation on well-being and stress perception among older adults. *Complement. Ther. Med.* 15, 157–163. <https://doi.org/10.1016/j.ctim.2007.01.004>

Smith, S.L., Lux, R., Haley, S., Slater, H., Beechy, J., Moyer-Mileur, L.J., 2013. The effect of massage on heart rate variability in preterm infants. *J. Perinatol.* 33, 59–64. <https://doi.org/10.1038/jp.2012.47>

Suryanarayanan Murali, Shanmugam, S.V., Prasaad, G.A., Kumar, M.S., Manoharan, C., Devadasan, S.R., Muruges, R., 2014. Fatigue mitigation through the optimization of ergonomic positional parameters in massage therapy using virtual instrumentation. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 70, 173–184. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5259-4>

T. Nomura, T. Kanda, T. Suzuki, K. Kato, 2008. Prediction of human behavior in Human--Robot Interaction using psychological scales for anxiety and negative attitudes toward robots. *IEEE Trans. Robot.* 24, 442–451. <https://doi.org/10.1109/TRO.2007.914004>

T. Nomura, T. Suzuki, T. Kanda, K. Kato, 2006. Measurement of anxiety toward robots, in: ROMAN 2006 - The 15th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication. Presented at the ROMAN 2006 - The 15th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, pp. 372–377.  
<https://doi.org/10.1109/ROMAN.2006.314462>

Takanishi, A., Katsumata, A., Koga, H., Ishii, H., Solis, J., Obokawa, Y., 2009. Massage Robot and Control Program Thereof.

Takanishi, A., Katsumata, A., Usuda, Y., Koga, H., Matsuno, M., Ogura, Y., Ishii, H., Solis, J., 2008. Massage robot, control program therefor, and robot for specifying portion of human body.

TeamR, R.C., 2018. a language and environment for statistical computing. 2015. R Found. Stat. Comput. Vienna Austria URL [https://www R-Proj. Org](https://www.R-Project.org) Accessed Novemb. 26.

Vempati, R.P., Telles, S., 2002. Yoga-based guided relaxation reduces sympathetic activity judged from baseline Levels. Psychol. Rep. 90, 487–494.  
<https://doi.org/10.2466/pr0.2002.90.2.487>

Vickers, A., Ohlsson, A., Lacy, J., Horsley, A., 2004. Massage for promoting growth and development of preterm and/or low birth-weight infants. Cochrane Database Syst. Rev.  
<https://doi.org/10.1002/14651858.CD000390.pub2>

Weerapong, P., Hume, P.A., Kolt, G.S., 2005. The mechanisms of massage and effects on performance, muscle recovery and injury prevention. Sports Med. 35, 235–256.  
<https://doi.org/10.2165/00007256-200535030-00004>

Wilke, J., Müller, A.-L., Giesche, F., Power, G., Ahmedi, H., Behm, D.G., 2020. Acute effects of foam rolling on range of motion in healthy adults: a systematic review with multilevel meta-analysis. *Sports Med.* 50, 387–402. <https://doi.org/10.1007/s40279-019-01205-7>

World Medical Association, 2013. World Medical Association Declaration of Helsinki: Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subjects. *JAMA* 310, 2191–2194. <https://doi.org/10.1001/jama.2013.281053>

## RÉSUMÉ

Au cours de cette expérimentation, le massage manuel et le massage robotique sont parvenus à des effets comparables sur des indices psychométriques de bien-être, de performances motrice et cognitive et des indices neurophysiologiques. Plus précisément le massage manuel et le massage robotique diminuaient l'éveil physiologique, synonyme d'un sentiment de relaxation accru. Toutefois, du fait de sa meilleure précision et de sa diversité de manœuvres le massage manuel se révélait plus efficace sur le bien-être perçu. Ce résultat était néanmoins contrasté par l'augmentation du sentiment de fatigabilité de la part du praticien, et la possibilité que le bien-être perçu un peu plus faible dans le cas du massage robotisé soit lié à l'absence d'habitude d'usage de ce type de solutions. En tout état de cause, le massage robotique semble représenter une alternative prometteuse pour assister les professionnels dans leur travail et laisse présager d'une démocratisation en devenir de la pratique. Entre autres, les prochaines avancées technologiques permettront certainement d'améliorer le niveau d'efficacité du massage robotique. De futures études sont donc attendues pour rendre compte des différentes évolutions, d'une bonne compréhension des enjeux de cette pratique et in fine, du devenir du massage robotique.

## **CHAPITRE 6 : DISCUSSION GÉNÉRALE**

Cette thèse avait pour objectifs principaux la caractérisation des différentes techniques de massage et la validation des bénéfices psychophysiologiques d'un système de massage robotique, autonome et interactif. Pour y parvenir, 4 sous-objectifs ont été définis. Le premier consistait à recueillir les connaissances actuelles sur les différentes formes de massage permettant d'appréhender les possibilités émergentes de massage robotique. Le second visait à éclaircir la compréhension relative au massage autogène sur deux champs de recherche distincts. Tout d'abord, l'influence du massage autogène intégré à l'entraînement sur les performances sportives et la récupération. Ensuite, comparer l'efficacité de la technique de massage autogène par pression glissée à la technique de pression roulée conventionnelle. Enfin, évaluer les signatures neurophysiologiques et l'efficacité des massages autogène et manuels, puis l'efficacité du massage robotique et du massage manuel.

Le premier sous-objectif a été traité par une revue de synthèse répertoriant les différents effets et techniques du massage manuel et du massage autogène. D'autres auteurs avaient préalablement rédigé des articles de synthèse, mais ces publications étaient centrées sur le massage manuel ou le massage autogène (Weerapong et al., 2005; Cheatham et al., 2015), aucune ne traitait les deux approches conjointement. Notre travail conceptuel a permis d'appréhender les ressemblances et différences entre massage manuel et massage autogène. Dans l'attente de données expérimentales comparatives, cette revue de synthèse a permis de postuler sur des effets comparables malgré la singularité de ces deux méthodes. Nous avons établi entre les deux méthodes une distinction conceptuelle quant aux modes de contrôle de l'action adoptés par les personnes massées. Nous avons souligné l'existence d'un mode de contrôle d'action prédominant et différent au cours des massages manuel et autogène. Le massage manuel susciterait principalement chez la personne massée des rétroactions

sensorielles, du fait de sa position passive et allongée, soit un mode de contrôle principalement rétroactif (Hasegawa et al., 2001; Braver, 2012). À l'inverse, le massage autogène implique des mouvements volontaires. Dans ces conditions, l'utilisateur solliciterait principalement un mode de contrôle proactif dans lequel il peut anticiper les conséquences sensorielles des mouvements de pression (Cervin et al., 2002). Cette réflexion a été étendue jusqu'au domaine du massage robotique avec capacité d'interaction. Les cobots dotés d'une capacité d'interaction ouvriraient le champ des possibles avec la création de nouvelles formes de massage. En effet, ces robots pourraient offrir la possibilité aux utilisateurs de basculer entre les modes de contrôle proactifs et rétroactifs en se servant ou non du dispositif d'interaction, comme la télécommande de contrôle pour les dispositifs le proposant. Sans interaction possible avec le robot, le massage robotique positionnerait l'utilisateur sur un mode de contrôle exclusivement rétroactif. Au-delà des aspects conceptuels, les robots de massage permettraient de démocratiser le massage en adressant une limitation majeure : le déficit de praticien (Golovin et al., 2018).

Pour explorer cette approche conceptuelle de manière objective, un volet expérimental à large spectre a été envisagé. Deux études ont tout d'abord été réalisées dans le but d'approfondir les connaissances sur les effets du massage autogène. La première étude visait à évaluer l'influence supposée négative d'un massage autogène de 30 secs sur chaque quadriceps, intégré à l'entraînement. Les résultats ont confirmé l'influence négative de cette pratique malgré l'utilisation d'outils de massage et d'un protocole de fatigue différents à ceux rapportés dans de précédentes études (Monteiro and Neto, 2016; Monteiro et al., 2017a, 2017b, 2019). En effet, comparativement à la condition contrôle, les sportifs sont parvenus à une charge de travail totale et une production de puissance musculaire moindre en consacrant la moitié de la récupération à se masser. De même, au cours de ce protocole de fatigue les participants



déclaraient ressentir une plus grande difficulté pour compléter les séries. Les données objectives et subjectives réunies dressaient un tableau cohérent d'interférence avec l'atteinte de charges de travail et d'intensités d'entraînement élevées. Le massage autogène semblerait induire un surcoût énergétique et attentionnel, confirmant son caractère « actif » (Monteiro and Neto, 2016). En contrepartie, la récupération était facilitée en raison d'une moindre fatigabilité induite par l'entraînement et d'une congestion musculaire post-entraînement plus faible (Beimborn, 2019; Hendricks et al., 2019; Skinner et al., 2020). Durant les jours qui ont suivi la séance, les participants ont ainsi rapporté des douleurs musculaires moins intenses dans la condition d'automassage. Du fait de sa nature proactive et du ratio utilisé, rapport entre le temps de massage autogène et le temps de récupération passive véritable, le massage autogène intégré à l'entraînement apparaissait comme une technique contreproductive sur les performances physiques. Dans l'attente de données plus approfondies où le massage autogène serait réalisé avec des ratios plus élevés, autrement dit une récupération passive plus longue, les entraîneurs et préparateurs physiques ne devraient pas proposer ce type de récupération intégré aux entraînements.

Pour compléter les connaissances sur les effets du massage autogène, une seconde expérimentation a été réalisée. Cet essai pilote avait pour objectif de mesurer l'efficacité de deux techniques de pression glissée. En effet, à ce jour l'outil le plus utilisé reste les rouleaux de massage mais ces derniers ne permettent qu'une pression roulée. Depuis peu, les praticiens se tournent également vers l'utilisation de bâton de massage sans roulement en sollicitant une technique de pression glissée. La version testée par Gordon et al. (2018) intégrait un moteur permettant de produire des vibrations complémentaires. Le massage autogène avec cet appareil permettait d'obtenir des gains comparables aux outils conventionnels sur la raideur musculaire,

la flexibilité, la douleur, ainsi que d'autres sensations physiques. De plus, ce bâton semblait induire une augmentation locale de la température cutanée (Murray et al., 2016; Gordon et al., 2018; Adamczyk et al., 2020). Néanmoins, il était impossible de déterminer si ces effets avaient pour origine les mouvements de pression glissée ou bien les vibrations. Pour ces raisons, notre étude a été réalisée dans le but d'évaluer l'efficacité de la pression glissée axiale et transversale en utilisant un outil artisanal sans moteur qui présentait une forme similaire. Comparativement aux techniques de pression roulée avec bâton ou rouleau de massage, les techniques de pression glissée n'ont pas induit d'élévation supérieure de la température cutanée ou des sensations de chaleur perçue. Les plus fortes augmentations pour ces variables furent obtenues dans le groupe qui a utilisé le rouleau de massage. En revanche, lorsqu'il s'agissait des gains d'amplitude articulaire au niveau du genou, des bénéfices comparables furent enregistrés entre les conditions. Irrespectivement de la technique gestuelle et de l'outil, les effets sur la flexibilité étaient similaires, ce qui corrobore de précédentes observations (Cheatham et al., 2015; Dębski et al., 2019; Wiewelhove et al., 2019). Cet essai pilote confirme également l'absence de maintien des bénéfices au cours du temps, i.e., le retour inexorable des valeurs de flexibilité, de température cutanée et de bien-être perçue tournent progressivement vers le niveau de référence enregistré lors des pré-tests (MacDonald et al., 2013; Halperin et al., 2014; Jay et al., 2014; Škarabot et al., 2015; Kelly and Beardsley, 2016). Après 15 min, les effets avaient disparu. Les entraîneurs et préparateurs physiques devront veiller à ne pas dépasser un délai de 15 min entre l'arrêt du massage autogène et le début de la phase d'échauffement général. De cette manière, les effets du massage sur l'amplitude articulaire pourront faciliter les exercices au poids de corps avant la phase d'échauffement spécifique. Certains aléas en compétition peuvent inciter les entraîneurs et préparateurs physiques à allonger, voire repousser cette phase d'échauffement. Le massage autogène pourra être privilégié afin de maintenir les gains

d'amplitude articulaire et les performances au lieu d'augmenter la durée d'échauffement général ou spécifique qui peut induire une fatigue importante. En effet, Hodgson et al. (2019) ont observé que l'ajout d'une seule série de 30 secs de massage autogène toutes les 10 min permettait de maintenir l'augmentation de flexibilité du genou et de la hanche. Cette stratégie épargnerait l'énergie des sportifs avant le début d'une compétition en limitant l'allongement des phases d'échauffement général et spécifique. Dans l'attente d'une confirmation de cette hypothèse, il serait judicieux de tester un protocole comparable avec une pression glissée. Autrement dit, le rouleau de massage, suscitant une pression roulée, serait remplacé par un bâton de massage pour estimer si cette technique est susceptible d'induire des effets comparables.

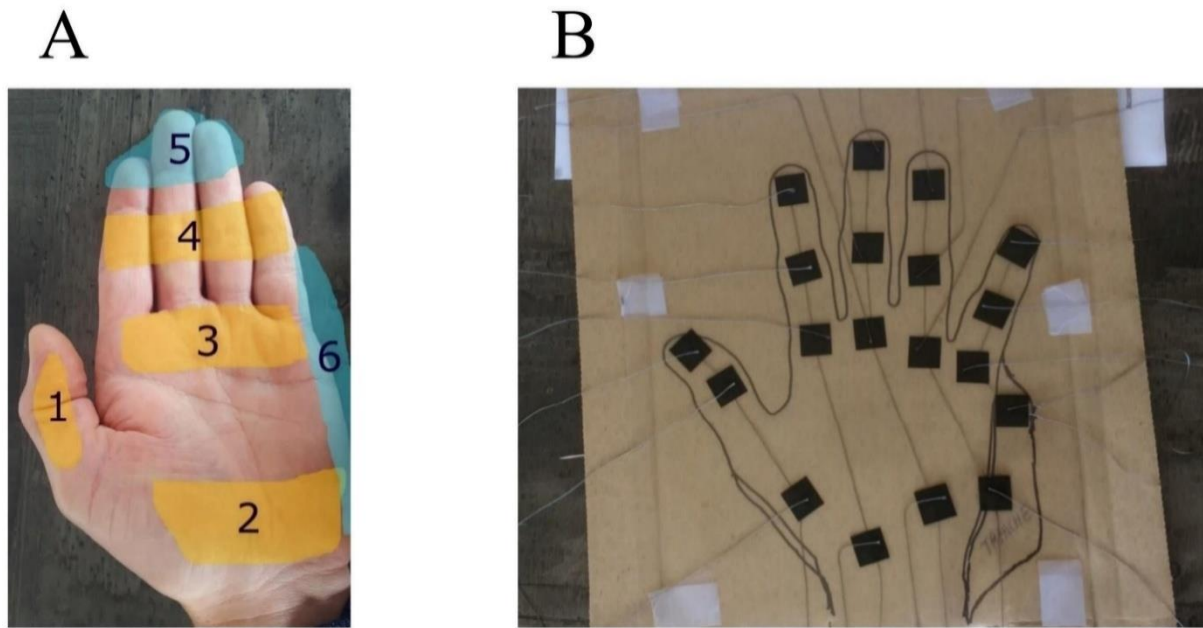
Afin de tester l'hypothèse d'une différence dans les modes de contrôle de l'action induits par le massage manuel et le massage autogène, une troisième étude a été effectuée. Nous avons recueilli et comparé les signatures neuronales des différentes formes de massage par EEG de surface. De précédentes études ont souligné que le massage manuel induisait une diminution de la puissance des ondes alpha et beta indépendamment des protocoles et des zones massées. En effet, le massage du dos, du visage, des mains et des pieds semblait influencer de manière comparable les rythmes cérébraux (Jodo et al., 1988; Field et al., 1996b; Nakano et al., 2019). Diego et al. (2004) soulignaient l'importance d'utiliser une pression modérée, car le massage constitué de pression légère semblait insuffisant pour provoquer un changement au niveau de l'activité neuronale, probablement en raison d'une stimulation limitée aux récepteurs des couches superficielles comme la peau. Néanmoins, de plus amples études sont nécessaires pour confirmer cette hypothèse. Au cours de cette expérimentation, les niveaux d'intensité étaient subjectifs. Aucune valeur de pression n'était précisément demandée au praticien. Néanmoins,

une pression mécanique modérée semble nécessaire pour stimuler les mécano-nocicepteurs des couches profondes. Aucune donnée n'était disponible à ce jour concernant l'influence du massage autogène sur l'activité cérébrale. En revanche, l'influence de cette forme de massage sur les pressions exercées avait fait l'objet de plusieurs travaux. Les pressions induites lors d'un massage autogène dépassent celles du massage manuel (Eliska and Eliskova, 1995; Sullivan et al., 2013; MacDonald et al., 2013; Bradbury-Squires et al., 2014; Freiwald et al., 2016a; Murray et al., 2016; Macgregor et al., 2018; Baumgart et al., 2019). Ceci ouvre plusieurs questionnements. Ces hauts niveaux de pression impactent-ils de manière différenciée la puissance des oscillations cérébrales dans les rythmes alpha et beta ? Existerait-il un effet de seuil quant à l'intensité des pressions exercées par les techniques de massage ? L'objectif de notre étude était de mesurer et comparer les signatures neuronales générées par ces deux types de massage. Comparativement à un groupe « contrôle » qui réalisait une session de training autogène de Schultz et Luthe (1959), le massage manuel et le massage autogène ont induit une synchronisation des oscillations alpha et beta, caractéristique des états de relaxation (Jodo et al., 1988). Dans le modèle de Lehrer et al. (1994), le massage manuel et le massage autogène appartiendraient à une catégorie de méthodes de relaxation orientée sur les fonctions automatiques de l'organisme, et non sur les fonctions cognitives, comme le training autogène de Schultz. Autrement dit, ces deux formes de massage ciblent la détente du corps pour parvenir à un état de relaxation. Cependant, les topographies EEG ont révélé des profils différents. Pour le massage manuel, la synchronisation fut surtout enregistrée dans les régions pariétales de l'espace des capteurs, tandis que pour le massage autogène la synchronisation fut enregistrée dans les régions frontales. Cette différence de localisation pourrait s'expliquer par la nature distincte de ces deux massages. En effet, lors d'un massage manuel, l'individu reste passif en position allongée. Dans cette configuration, la fonction somato-sensitive du cortex située au

niveau du lobe pariétal, serait donc principalement affectée (Sakata et al., 1973; Freund, 2003). Dans le cas du massage autogène, la région frontale serait plus particulièrement sollicitée du fait de la nécessité d'effectuer des mouvements volontaires (Gurfinkel' and Él'ner, 1988; Singh and Knight, 1990). Ces mouvements nécessiteraient l'intervention du cortex moteur responsable de l'exécution des mouvements volontaires (Dum and Strick, 1991; Chen and Hallett, 1999; Rizzolatti et al., 2002). Les données de cette étude sont prometteuses et corroborent le postulat d'un mode de contrôle de l'action distinct entre massage manuel et massage autogène. La nature proactive du massage autogène induirait des états de relaxation du cerveau qualitativement différents à ceux induits par le massage manuel pour ce qui relève des zones corticales stimulées. Du fait de son coût énergétique et attentionnel supplémentaire, Kerautret et al. ((2021), le massage autogène ne permettrait pas d'induire les mêmes niveaux de relaxation du point de vue des marqueurs neurophysiologiques. La résistance cutanée, témoin de l'activation physiologique, démontrait deux profils de réponse distincts. Après le massage autogène, la résistance cutanée était réduite tandis qu'un profil inverse de réponse fut observé après le massage manuel. En d'autres termes, le massage manuel semblait induire des niveaux toniques d'éveil physiologiques réduits comparativement au massage autogène. L'absence d'expertise d'un praticien conjugué à la nature proactive du massage autogène pourrait être à l'origine de telles différences. Néanmoins, le massage autogène représente une alternative prometteuse et potentiellement complémentaire au massage manuel, au faible coût et qui présente une facilité d'accessibilité. Cette méthode présente également l'intérêt d'être administrée sur de plus courtes durées, lui conférant ainsi davantage de flexibilité. Les professionnels de la santé et les préparateurs physiques ont intérêt à profiter des avantages qu'offrent les deux formes de massage. Sans toutefois remettre en question la pertinence du massage autogène, le massage manuel d'un professionnel permettrait d'induire de meilleurs

effets sur la relaxation. A ce titre, sous la supervision d'un professionnel de la santé, le massage autogène au domicile resterait un excellent moyen de complément aux traitements conventionnels (Leivadi et al., 1999; Grieve et al., 2013; Lee et al., 2017).

Au cours du doctorat, nous avons tenté de modéliser la pratique du masseur-kinésithérapeute en recueillant les données de pressions exercées. Le but était, de plus, d'enregistrer les trajectoires des mains sur le corps des participants. En effet, cette expérience visait à enrichir les connaissances de la pratique par des données objectives, et de modéliser un répertoire gestuel. Cette modélisation avait également pour but de faciliter l'élaboration et le paramétrage de futurs massages robotiques. Nous aurions ainsi pu caractériser les régularités propres au massage manuel d'un praticien à des fins de modélisation robotiques. Plusieurs praticiens étaient inclus dans l'étude et un gant de massage devait être utilisé. Néanmoins avec du recul, il convient d'aborder l'apparition d'une limite qui a été négligée lors de la conception de cette étude, pour les éventuelles recherches futures. En l'absence de meilleures solutions, le port de ce gant pourrait dénaturer le massage du praticien dû à une diminution, voire une perte de ses perceptions tactiles. Ce prototype de gant devait comprendre des capteurs de pression composé de Velostat® (Adafruit Industrie LLC, New York, USA), une feuille conductrice sensible à la pression, et de fil conducteur sur des zones stratégiques de la main (Figure 28).



**Figure 28.** Illustrations des zones dédiées aux capteurs.

**A.** Idée initiale des zones stratégiques sur la main lors du 1<sup>er</sup> prototype. **B.** Emplacements des capteurs Velostat et du fil conducteur pour le 3<sup>ème</sup> prototype.

Un point de référence devait être matérialisé sur le gant pour permettre le suivi par la caméra montée sur la solution iYU<sup>®</sup> Pro des mains du praticien. Malheureusement, pour des raisons techniques et suite à un incendie des locaux en Octobre 2019, ce projet ambitieux fut abandonné (Figure 29).



**Figure 29.** Illustrations des gants de massage.

**A.** 1er prototype du gant de massage. **B.** 3ème prototype du gant de massage avec carte Arduino.

L'une des principales difficultés fut le choix de la taille des capteurs afin d'éviter les artefacts. Des capteurs plus petits avaient été confectionnés pour la troisième version du prototype de gant. Le second challenge avait été de trouver le moyen d'installer ces capteurs sur du tissu. Au lieu de coudre directement les capteurs sur le tissu, l'idée avait été de les isoler dans des feuilles plastifiées et de coller ces feuilles sur le tissu. Ces modifications avaient également pour but d'obtenir des données suffisamment précises tout en résistant aux contraintes mécaniques occasionnées par le massage.

Dans la continuité de tous ces travaux, et après un travail de conception technologique innovante et chronophage, l'étude centrale de ce travail de thèse a consisté à évaluer l'efficacité du massage robotique et à la comparer à celle d'un massage manuel prodigué par un kinésithérapeute aguerri. Ce sujet de recherche n'étant qu'à ses débuts, la littérature ne faisait état que de quelques études en lien avec le massage robotique. De ce fait, les données demeuraient insuffisantes vis-à-vis du système de massage robotisé, autonome et interactif



envisagé et des dernières innovations technologiques (Takanishi et al., 2008, 2009). En effet, malgré les résultats prometteurs du « Waseda Oral-Rehabilitation Robot 1 » (WAO-1), les données recueillies étaient inexploitable dans le cadre de notre volet expérimental. L'intervention se limitant aux personnes souffrant de troubles temporo-mandibulaire, il nous était impensable de généraliser ces effets à ceux d'un massage du dos complet. Les patients ayant testé ce robot bénéficiaient d'une amélioration des fonctions buccales, avec une ouverture de la bouche plus importante, ainsi que d'une stimulation de la circulation sanguine et des glandes salivaires (Koga et al., 2008; Arijji et al., 2009a, 2009b, 2010, 2015, 2016; Ishii et al., 2009; Obokawa et al., 2009; Solis et al., 2009; Hiraiwa et al., 2013). Cependant, ce robot de massages'est avéré moins efficace qu'un docteur expérimenté quant à l'amélioration des indices d'une meilleure qualité de vie des patients (Koga et al., 2008). Pour ces raisons et du fait de son ultra-spécificité, la généralisation des effets observés n'a pas pu s'étendre à d'autres types de massages. L'enjeu de cette expérimentation consistait donc à déterminer les effets d'un système de massage robotisé, autonome et interactif plus complet destiné au grand public. Contrairement au robot WAO-1, les participants de notre étude devaient être exempts de toute pathologie avérée.

Les résultats ont montré des effets comparables entre le massage robotique et le massage manuel. Tous deux amélioraient les performances cognitives mais n'ont pas induit de bénéfice sur la flexibilité. L'hypothèse de ce résultat étonnant pourrait s'expliquer par un délai trop long entre la fin des massages et les tests de souplesse. En effet, en utilisant la méthode de l'élastographie ultrasonore, une méthode d'imagerie médicale, Crommert et al. (2015) ont démontré que les effets d'un massage sur la flexibilité pouvaient ne pas excéder 3 minutes. L'analyse des autres variables d'intérêt a permis de distinguer les deux formes de massage.

L'intervention du masseur-kinésithérapeute s'est avérée plus efficace pour augmenter la résistance cutanée, indicative d'une relaxation plus marquée. De même, les questionnaires relatifs aux sensations physiques perçues ont révélé des bénéfices légèrement plus élevés après le massage manuel. L'hypothèse d'une efficacité plus marquée en lien avec l'expertise du praticien nous paraît pertinente. En effet, comparativement à l'effecteur et aux mouvements du robot, les mains du masseur-kinésithérapeute bénéficient vraisemblablement d'une meilleure capacité à exercer des manœuvres complexes et précises. Il est toutefois également possible que l'intervention d'un robot ait suscité un sentiment d'appréhension, voire de septicisme, chez les participants. Cette piste représente à elle seule un véritable objet de recherche pour les scientifiques et démontre déjà l'existence de certains freins psychologiques vis-à-vis de la robotique (Nomura et al., 2006, 2008; J. Shen et al., 2015). Ces freins doivent être considérés en raison de la forte influence des croyances négatives sur le bien-être (Ciarrochi, 2004). Suite à cette étude, l'efficacité du robot semble donc avérée, mais reste légèrement inférieure à celle de soins prodigués par un professionnel de santé expérimenté. Fait intéressant, toutefois, le robot de massage ne faiblit pas et offre une reproductibilité parfaite de l'acte de massage, alors que les données subjectives recueillies auprès du masseur-kinésithérapeute ont montré une baisse des capacités physiques du praticien à mesure que les massages se succédaient. Le praticien témoignait d'une fatigue et d'une tension plus élevées entre le premier et le dernier massage de la journée. Ce constat était comparable concernant les sensations d'efficacité, de pression et d'amplitude. Le praticien se sentait moins efficace et plus fatigué en fin de journée comparativement au début. Pour ces raisons, le massage robotique représenterait une alternative prometteuse pour accompagner les professionnels dans leur travail quotidien, en plus des avantages d'interaction, de disponibilité, et d'accessibilité que ces solutions peuvent comporter pour les utilisateurs. Sans chercher à se substituer à un professionnel, le robot serait en mesure

de fonctionner sans interruption tout en garantissant une qualité d'intervention équivalente pour certains indicateurs. Le robot permet à ce jour l'application de pression statique, des pressions glissées axiales, transversales, circulaires ou encore sinusoïdales. Il paraît évident que les interventions soient, au moins dans un premier temps et dans l'attente de données expérimentales complémentaires, ciblées sur les actes de massages simples. Le praticien bénéficierait alors de davantage de temps et d'énergie pour se consacrer aux tâches à fortes valeurs ajoutées, dans lesquelles le robot serait incapable d'égaliser ses performances. Outre le fait que la technique de pétrissage exige une dextérité plus élevée, ces manoeuvres nécessiteraient aussi, mais surtout, l'ajout d'une deuxième main robotique. Au regard de la profession une autre limite semble se détacher. Le robot ou tout autre dispositif technologique ne semble être aujourd'hui en mesure d'égaliser le diagnostic d'un praticien expérimenté. Cependant, ces systèmes de massage robotisés semblent suffisamment bien armés pour d'ores et déjà promettre un massage de bien-être efficace. Plus hypothétique car dépendant de la diminution des coûts de la robotique, la démocratisation du massage robotique à grande échelle ouvrirait de nouvelles perspectives de recherche. En effet, le prix du massage diminuerait et sa disponibilité serait inédite, offrant ainsi l'opportunité d'explorer par des études longitudinales les effets chroniques du massage sur la santé mentale et physique des utilisateurs.

Les travaux de ce doctorat ont apporté des informations nouvelles relatives aux ressemblances et aux différences entre massage manuel, massage autogène et massage robotisé. Ces connaissances permettront aux professionnels de la santé et aux préparateurs physiques d'individualiser leurs protocoles de massage selon les effets recherchés sur le bien-être et les performances. Ce travail semble montrer une efficacité intéressante du massage robotique, et mettre en lumière un potentiel de développement technologique considérable. Dans l'attente de

nouvelles expérimentations, le massage robotique laisse entrevoir de nouveaux usages mais également une démocratisation dans les années à venir.

## **CONCLUSION**

Cette thèse avait pour objectif la caractérisation des techniques de massage et la validation des bénéfices physiologiques d'un système de massage robotique, autonome et interactif. Nous avons formulé 4 sous-objectifs : 1) répertorier dans la littérature les ressemblances et différences du massage manuel et du massage autogène. Ce sous-objectif a également permis d'introduire le concept lié au mode de contrôle exercé par la personne massée et les perspectives offertes par l'émergence du massage robotique ; 2) évaluer tout d'abord l'influence d'un massage autogène intégré à l'entraînement sur les performances sportives et la récupération et explorer dans un second temps l'efficacité de deux techniques de pression glissées autogènes ; 3) comparer les signatures neurophysiologiques du massage autogène et du massage manuel ; 4) évaluer l'efficacité d'un massage robotique en la comparant à celle d'un massage manuel prodigué par un professionnel de santé, tout en surveillant les capacités physiques du praticien.

L'objet de cette recherche étant particulièrement novateur, le recueil des différentes données scientifiques au travers d'une revue de synthèse a été essentiel pour fournir un axe de réflexion et organiser dans un second temps le cadre méthodologique et les approches expérimentales. À cette occasion, nous avons constaté la présence d'une grande hétérogénéité des méthodes et des protocoles testés. Sans surprise, le contre coup d'une telle disparité réside dans la différence des résultats, entraînant quelquefois des conclusions contradictoires. De même, le caractère singulier de cette revue émane de l'étendue de ces recherches qui se rapporte non pas à un domaine mais trois ; le massage manuel, le massage autogène et le massage robotique. L'intérêt de ce travail de synthèse a donc été double en soumettant tout d'abord une limite méthodologique et en proposant en second plan une approche conceptuelle inédite. Plus précisément, nous avons soumis l'idée qu'il puisse exister un continuum sur le plan du contrôle

moteur exercé par la personne recevant les soins. Au travers de ce travail, des ressemblances et différences ont été observées, permettant dans un second temps d'entreprendre plusieurs expérimentations complémentaires. La première étude visant à évaluer l'influence du massage autogène intégré à l'entraînement a permis de confirmer les résultats des études antérieures. En effet, la nature proactive du massage autogène réduit la durée effective du repos entre les séries lors du protocole de fatigue. De ce fait, les performances ont été inévitablement impactées. Cet effet indésirable démontre le caractère contreproductif de cette technique pour les préparateurs physiques et les athlètes à la recherche d'une optimisation des performances. Néanmoins, de plus amples études sont nécessaires pour confirmer ou infirmer cette influence négative dans d'autres circonstances. Il est possible que cet effet indésirable disparaisse avec l'utilisation de ratio dont le dénominateur, la récupération passive, serait nettement supérieure. Par exemple, une étude comparable pourrait être menée dans le cadre de la force maximale où les délais de récupération sont élevés, ce qui autoriserait cette recherche axée sur la notion de ratio. La seconde proposition de recherche consisterait à explorer les avantages des outils de massage autogène récents, comme les pistolets de massage vibrant/percutant. En effet, contrairement à leurs homologues traditionnels, ces appareils bénéficient d'un moteur. L'effort fourni et l'attention requise de la part de l'utilisateur sont de ce fait nettement réduits. Du fait de cette particularité, il est possible que ces pistolets de massage puissent réduire, voire effacer, les interférences sur les performances tout en profitant des avantages enregistrés.

Par la suite, nous avons mené une seconde étude pour parfaire les connaissances en lien avec le massage autogène. Par cette expérimentation, nous avons cherché à évaluer l'efficacité de deux techniques de pression glissées autogènes. En effet, depuis quelques années les outils de massage se sont popularisés sans pour autant bénéficier de support scientifique.

Étonnamment, l'effet de friction supposé sur l'augmentation de la température cutanée s'est révélé peu probant, alors que l'une des tendances des praticiens est de privilégier cette approche. Dans notre étude, la pression roulée obtenue au moyen d'un rouleau de massage a semblé nettement plus efficace. Cependant, en l'absence de relation de cause à effet sur les gains d'amplitude articulaire, l'hypothèse principale est que ce phénomène est resté limité aux couches superficielles des tissus. Pour autant, cet effet local n'est pas spécifique au massage autogène. Des études précédentes sur le massage manuel ont observé ce même phénomène (Drust et al., 2003; Hinds et al., 2004). Le choix de l'outil ou de la technique utilisés ne semble pas primordial. Dans cette étude, les gains observés sur l'amplitude articulaire n'étaient pas influencés par les différents changements de température cutanée. En revanche, l'intérêt de combiner la technique de vibration à cette pression glissée reste énigmatique. Pour ces raisons, nous pensons qu'il serait intéressant à l'avenir de comparer dans une même étude ces techniques de pression glissée axiale et transversale seules à la technique combinatoire testée par Gordon et al. (2018). Une attention particulière devra être apportée à la fréquence de ces vibrations. Depuis peu, des études ont été publiées autour de l'utilisation des rouleaux de massage vibrants. Or une nouvelle fois, du fait de la disparité des protocoles et des fréquences utilisées qui variaient entre 18 – 35 Hz les résultats ne sont pas unanimes quant à l'intérêt de combiner pression roulée et vibration (Cheatham et al., 2017b; Han et al., 2017; Romero-Moraleda et al., 2017; Garcia-Gutiérrez et al., 2018; Lee et al., 2018; Cheatham et al., 2019; Lyu et al., 2020).

Après avoir affiné certaines connaissances du massage autogène et mis en exergue les premiers éléments objectifs démontrant sa nature proactive, nous avons entrepris une troisième étude innovante. En effet, nous avons eu l'ambition d'étendre cet objet de recherche au domaine neuroscientifique du contrôle moteur dans le but de conforter notre approche conceptuelle. Pour



cette raison, nous ne nous sommes pas contentés du caractère précurseur de cette recherche en explorant uniquement le massage autogène. Au travers de cette étude, nous avons tenté de comparer la signature neuronale du massage manuel et du massage autogène. En effet, bien que ces deux formes de massage s'avèrent être des techniques de relaxation ascendantes, une prédominance de nature de contrôle moteur semble les différencier. Contre toute attente, l'analyse des données était claire, dépassant de loin nos espérances. En effet, les deux formes de massage ont tous deux induit une synchronisation neuronale reflétant une forme de relaxation. Toutefois, les topographies EEG ont souligné différents profils d'activation. La synchronisation observée pendant le massage autogène était localisée dans la région frontale abritant le cortex moteur, confirmant la prédominance du mode de contrôle proactive. De manière tout aussi fascinante, à la suite du massage manuel ce phénomène de synchronisation était localisé dans la région pariétale en lien vraisemblablement avec la fonction somato-sensible de cette partie du cortex. Par opposition, le massage manuel se distinguait du massage autogène par la prédominance du mode de contrôle rétroactif, prédisposant ainsi à une relaxation de meilleure qualité. Régulièrement présentés de manière empirique pour leurs propriétés, le massage manuel et le massage autogène se dévoilent une nouvelle fois aux yeux de la science avec cette approche du contrôle moteur innovante. Sans nul doute, ces deux techniques de relaxation ascendantes pourraient profiter au plus grand nombre, de l'adolescent à la personne âgée, du sportif amateur à l'athlète de haut niveau. Leur utilisation sera fonction de la disponibilité d'un professionnel qualifié, du temps à allouer, du matériel en sa possession et du budget.

Dans la continuité de ces recherches et dans le but de parvenir à l'enjeu majeur de ce projet de thèse, la dernière étude au design contrebalancée a permis de montrer des résultats

prometteurs pour le massage robotique. Sur la base des données précédemment recueillies, nous escomptions du massage manuel une relaxation qualitative du fait de sa nature rétroactive. Néanmoins, nos attentes étaient encore plus conséquentes sur le massage robotique en raison de l'idée conceptuelle qu'un tel système de massage robotisé, autonome et interactif puisse offrir les deux modes de contrôle. L'utilisateur allongé sur la table et s'abandonnant au robot, dont les paramètres seraient prédéfinis par un expert, profiterait d'un mode de contrôle rétroactif comparable au massage manuel. De même, nous admettions que cette personne massée puisse également basculer à tout moment dans un mode de contrôle proactif dès lors qu'il utiliserait la télécommande de contrôle pour ajuster le niveau de pression à sa convenance, comme dans le cadre d'un massage autogène. Dans l'éventualité que ces systèmes de massages robotisés, autonomes et interactifs, puissent accorder une alternance de la prédominance du mode de contrôle, nous pensons que le massage robotique pourrait se révéler être aussi efficace que le massage manuel. Or les bénéfices restent légèrement plus élevés lorsque le soin est prodigué par un praticien qualifié, dont l'expérience et la maîtrise des manœuvres complexes restent un atout difficile à égaler, et qui n'a pas besoin de temps d'adaptation de la part de l'utilisateur. Néanmoins, ces données témoignent de la qualité de massage que les systèmes robotisés sont déjà en mesure de produire. En effet, le massage robotisé bénéficie de certains avantages. Le robot se révèle infatigable, permettant de pallier à la baisse d'énergie constatée chez le praticien au fil des massages. Cette différence de résultats pourrait s'expliquer en partie par la présence éventuelle dans l'esprit des participants de freins culturels et dogmatiques. Ces barrières psychologiques ont été avérées dans le domaine de la robotique, et feront sans nul doute partie des sujets de recherches scientifiques centraux dans les années à venir. Pour le massage robotique plus particulièrement, cet enjeu de taille lié aux éventuelles réticences de recevoir un massage robotisé nécessite probablement d'organiser dans les prochaines études, une à deux

séances préalables, afin d'amener l'utilisateur à ne plus être dans la découverte de la solution, mais bien dans le vécu d'une séance de massage. Bien que le massage robotique est un objet d'études récent et les perspectives nombreuses, nous pensons qu'il serait judicieux d'orienter les recherches autour d'études longitudinales. Ces études offriront notamment la possibilité d'arbitrer la part de contingence de ces freins psychologiques et d'étudier la convergence ou non des bénéfices sur le long terme avec le massage manuel.

Dans leur globalité, ces travaux ont permis le recueil d'informations utiles s'agissant des différentes formes de massage et de l'approche conceptuelle du contrôle moteur exercé par la personne massée. Le volet expérimental offre l'opportunité d'ouvrir le champ des possibles au regard de la recherche du massage robotique et de présenter des pistes séduisantes pour les recherches futures.

## RÉFÉRENCES

Abhang, P.A., Gawali, B.W., Mehrotra, S.C., 2016. Introduction to EEG- and Speech-Based Emotion Recognition. Academic Press, London, UK ; San Diego, CA, USA.

Aboodarda, S., Spence, A., Button, D.C., 2015. Pain pressure threshold of a muscle tender spot increases following local and non-local rolling massage. *BMC Musculoskelet. Disord.* 16, 265. <https://doi.org/10.1186/s12891-015-0729-5>

Abrantes, R., Nunes, S., Monteiro, E., Fiuza, A., Cesar Cunha, J., Ribeiro, M., Martins, C., Novaes, G., Serra, R., Vianna, J., 2019. Massage acutely increased muscle strength and power force. *J. Exerc. Physiol. Online* 22.

Acharya, J.N., Hani, A.J., Thirumala, P., Tsuchida, T.N., 2016. American clinical neurophysiology society guideline 3: a proposal for standard montages to be used in clinical EEG. *Neurodiagnostic J.* 56, 253–260. <https://doi.org/10.1080/21646821.2016.1245559>

Adamczyk, J.G., Gryko, K., Boguszewski, D., 2020. Does the type of foam roller influence the recovery rate, thermal response and DOMS prevention? *PLOS ONE* 15, e0235195. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235195>

Albert, W.J., Currie-Jackson, N., Duncan, C.A., 2008. A survey of musculoskeletal injuries amongst Canadian massage therapists. *J. Bodyw. Mov. Ther.* 12, 86–93. <https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2007.03.003>

Arabaci, R., 2008. Acute effects of pre-event lower limb massage on explosive and high speed motor capacities and flexibility. *J. Sports Sci. Med.* 7, 549–555.

Arazi, H., Asadi, A., Hoseini, K., 2012. Comparison of two different warm-ups (static-stretching and massage): effects on flexibility and explosive power. *Acta Kinesiol.* 6, 55–59.

Ariji, Y., Katsumata, A., Hiraiwa, Y., Izumi, M., Iida, Y., Goto, M., Sakuma, S., Ogi, N., Kurita, K., Ariji, E., 2009a. Use of sonographic elastography of the masseter muscles for optimizing massage pressure: a preliminary study. *J. Oral Rehabil.* 36, 627–635. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2842.2009.01977>

Ariji, Y., Katsumata, A., Hiraiwa, Y., Izumi, M., Sakuma, S., Shimizu, M., Kurita, K., Ariji, E., 2010. Masseter muscle sonographic features as indices for evaluating efficacy of massage treatment. *Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol. Oral Radiol. Endodontology* 110, 517–526. <https://doi.org/10.1016/j.tripleo.2010.05.003>

Ariji, Y., Katsumata, A., Ogi, N., Izumi, M., Sakuma, S., Iida, Y., Hiraiwa, Y., Kurita, K., Igarashi, C., Kobayashi, K., Ishii, H., Takanishi, A., Ariji, E., 2009b. An oral rehabilitation robot for massaging the masseter and temporal muscles: a preliminary report. *Oral Radiol.* 25, 53–59. <https://doi.org/10.1007/s11282-009-0014-0>

Ariji, Y., Nakayama, M., Nishiyama, W., Ogi, N., Sakuma, S., Katsumata, A., Kurita, K., Ariji, E., 2016. Can sonographic features be efficacy predictors of robotic massage treatment for masseter and temporal muscle in patients with temporomandibular disorder with myofascial pain? *CRANIO®* 34, 13–19. <https://doi.org/10.1179/2151090314Y.0000000037>

Ariji, Y., Nakayama, M., Nishiyama, W., Ogi, N., Sakuma, S., Katsumata, A., Kurita, K., Ariji, E., 2015. Potential clinical application of masseter and temporal muscle massage

treatment using an oral rehabilitation robot in temporomandibular disorder patients with myofascial pain. *CRANIO®* 33, 256–262. <https://doi.org/10.1179/2151090314Y.0000000030>

Arroyo-Morales, M., Olea, N., Martínez, M.M., Hidalgo-Lozano, A., Ruiz-Rodríguez, C., Díaz-Rodríguez, L., 2008. Psychophysiological effects of massage-myofascial release after exercise: a randomized sham-control study. *J. Altern. Complement. Med.* 14, 1223–1229. <https://doi.org/10.1089/acm.2008.0253>

Ault, P., Plaza, A., Paratz, J., 2018. Scar massage for hypertrophic burns scarring—a systematic review. *Burns* 44, 24–38. <https://doi.org/10.1016/j.burns.2017.05.006>

Awang, S.A., Pandiyan, P.M., Yaacob, S., Ali, Y.M., Ramidi, F., Mat, F., 2011. Spectral density analysis: theta wave as mental stress indicator, in: Kim, T., Adeli, H., Ramos, C., Kang, B.-H. (Eds.), *Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition, Communications in Computer and Information Science*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 103–112. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-27183-0\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-642-27183-0_12)

Ayala, F., Sainz de Baranda, P., De Ste Croix, M., Santonja, F., 2012. Reproducibility and criterion-related validity of the sit and reach test and toe touch test for estimating hamstring flexibility in recreationally active young adults. *Phys. Ther. Sport* 13, 219–226. <https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2011.11.001>

Banyard, H.G., Nosaka, K., Sato, K., Haff, G.G., 2017. Validity of various methods for determining velocity, force, and power in the back squat. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 12, 1170–1176. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2016-0627> 10.1123/ijsp.2016-0627  
10.1123/ijsp.2016-0627 10.1123/ijsp.2016-0627

Baumgart, C., Freiwald, J., Kühnemann, M., Hotfiel, T., Hüttel, M., Hoppe, M.W., 2019. Foam rolling of the calf and anterior thigh: biomechanical Loads and acute effects on vertical jump height and muscle stiffness. *Sports Basel Switz.* 7, 27. <https://doi.org/10.3390/sports7010027>

Behara, B., Jacobson, B.H., 2017. Acute effects of deep tissue foam Rolling and dynamic stretching on muscular strength, power, and flexibility in division I linemen. *J. Strength Cond. Res.* 31, 888–892.

Behm, D., Duffett, C., Wiseman, S., Halperin, I., 2018. Use of topical analgesic and rolling alone or in combination does not increase flexibility, pain pressure threshold, and fatigue endurance - a repeated-measures randomized, within-Subjects, exploratory study. *J. Perform. Health Res.* 2, 4279. <https://doi.org/10.25036/jphr.2018.2.1.behm>

Behm, D.G., Wilke, J., 2019. Do self-myofascial release devices release myofascia? rolling mechanisms: a narrative review. *Sports Med.* 49, 1173–1181. <https://doi.org/10.1007/s40279-019-01149-y>

Beier, Z., Earp, I., Korak, J.A., 2019. Self-myofascial release does not improve back squat range of motion, alter muscle activation, or aid in perceived recovery 24-hours following lower body resistance training. *Int. J. Exerc. Sci.* 12, 839–846.

Beimborn, B., 2019. *The Effects of Foam Rolling on Exercise-Induced Muscle Damage.* California State University, Long Beach.

Bellar, D., Hatchett, A., Judge, L.W., Breaux, M.E., Marcus, L., 2015. The relationship of aerobic capacity, anaerobic peak power and experience to performance in CrossFit exercise. *Biol. Sport* 32, 315–320. <https://doi.org/10.5604/20831862.1174771>

Bendel, O., 2020. Co-Robots as Care Robots. *ArXiv E-Prints* arXiv:2004.04374.

Best, T.M., Hunter, R., Wilcox, A., Haq, F., 2008. Effectiveness of sports massage for recovery of skeletal muscle from strenuous exercise. *Clin. J. Sport Med.* 18, 446–460. <https://doi.org/10.1097/JSM.0b013e31818837a1>

Billman, G., 2011. Heart Rate Variability – A Historical Perspective. *Front. Physiol.* 2, 86. <https://doi.org/10.3389/fphys.2011.00086>

Billman, G.E., Huikuri, H.V., Sacha, J., Trimmel, K., 2015. An introduction to heart rate variability: methodological considerations and clinical applications. *Front. Physiol.* 6, 55. <https://doi.org/10.3389/fphys.2015.00055>

Boguszewski, D., Falkowska, M., Adamczyk, J.G., Białoszewski, D., 2017. Influence of foam rolling on the functional limitations of the musculoskeletal system in healthy women. *Biomed. Hum. Kinet.* 9, 75–81. <https://doi.org/10.1515/bhk-2017-0012>

Bradbury-Squires, D.J., Nofall, J.C., Sullivan, K.M., Behm, D.G., Power, K.E., Button, D.C., 2014. Roller-massager application to the quadriceps and knee-Joint range of motion and neuromuscular efficiency during a lunge. *J. Athl. Train.* 50, 133–140. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-49.5.03>

Braver, T.S., 2012. The variable nature of cognitive control: a dual mechanisms framework. *Trends Cogn. Sci.* 16, 106–113. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.12.010>



Brummitt, J., 2008. The role of massage in sports performance and rehabilitation: current evidence and future direction. *North Am. J. Sports Phys. Ther. NAJSPT* 3, 7–21.

Bruno, I., 2014. *Massages du monde: Californien, lomi-lomi, ayurvédique, suédois et autres horizons...* Hachette Pratique.

Buchheit, M., 2014. Monitoring training status with HR measures: do all roads lead to Rome? *Front. Physiol.* 5, 73. <https://doi.org/10.3389/fphys.2014.00073>

Buchheit, M., Voss, S.C., Nybo, L., Mohr, M., Racinais, S., 2011. Physiological and performance adaptations to an in-season soccer camp in the heat: Associations with heart rate and heart rate variability. *Scand. J. Med. Sci. Sports* 21, e477–e485. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2011.01378.x>

Byers, J.C., Bittner, A., Hill, S., 1989. Traditional and raw task load index (TLX) correlations: Are paired comparisons necessary? *undefined* 481–485.

Cafarelli, E., Flint, F., 1992. The Role of Massage in Preparation For and Recovery From Exercise. *Sports Med.* 14, 1–9. <https://doi.org/10.2165/00007256-199214010-00001>

Calvert, R.N., 2002. *The history of massage: an illustrated survey from around the world.* Inner Traditions/Bear & Co.

Cañadas, E., García, C.M., Sanchis, C., Fargueta, M., Herráiz, E.B., 2017. Spanish validation of BRUMS in sporting and non-sporting populations. *Eur. J. Hum. Mov.* 105–117.

Capobianco, R.A., Mazzo, M.M., Enoka, R.M., 2019. Self-massage prior to stretching improves flexibility in young and middle-aged adults. *J. Sports Sci.* 37, 1543–1550. <https://doi.org/10.1080/02640414.2019.1576253>

Carcano, Y., Isebrand, B., Wieczorek, G., Boudjemaa, B., 2010. Le ressenti de sportifs lors d'un massage de récupération en termes de douleur et fatigue musculaires et de bien-être. *Rôle Place Bandages Adhésifs Act. Coul.* 10, 46–50. [https://doi.org/10.1016/S1779-0123\(10\)74907-X](https://doi.org/10.1016/S1779-0123(10)74907-X)

Carey, M.A., Laird, D.E., Murray, K.A., Stevenson, J.R., 2010. Reliability, validity, and clinical usability of a digital goniometer. *Work* 36, 55–66. <https://doi.org/10.3233/WOR-2010-1007>

Casanova, N., Reis, J.F., Vaz, J.R., Machado, R., Mendes, B., Button, D.C., Pezarat-Correia, P., Freitas, S.R., 2017. Effects of roller massager on muscle recovery after exercise-induced muscle damage. *J. Sports Sci.* 36, 56–63. <https://doi.org/10.1080/02640414.2017.1280609>

Caviola, S., Carey, E., Mammarella, I.C., Szucs, D., 2017. Stress, time pressure, strategy selection and math anxiety in mathematics: a review of the literature. *Front. Psychol.* 8, 1488. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01488>

Ceca, D., Elvira, L., Guzmán, J.F., Pablos, A., 2017. Benefits of a self-myofascial release programme on health-related quality of life in people with fibromyalgia: a randomized controlled trial. *J. Sports Med. Phys. Fitness* 57, 993–1002. <https://doi.org/10.23736/S0022-4707.17.07025-6>

Ceca, D., Pablos, A., Elvira, L., López-Hernández, L., Ortega, A.L., 2020. Effectiveness of a self-myofascial conditioning programme on pain, depression, anxiety and sleep quality in people with Fibromyalgia. *Cuad. Psicol. Deporte* 20, press-press.

Cegarra, J., Morgado, N., 2009. Étude des propriétés de la version francophone du NASA-TLX. *EPIQUE 2009 5ème Colloq. Psychol. Ergon.* 233–239.

Cella, D.F., Perry, S.W., 1986. Reliability and concurrent validity of three visual-analogue mood scales. *Psychol. Rep.* 59, 827–833. <https://doi.org/10.2466/pr0.1986.59.2.827>

Cervin, A., Eker, J., Bernhardsson, B., Årzén, K.-E., 2002. Feedback–feedforward Scheduling of control tasks. *Real-Time Syst.* 23, 25–53. <https://doi.org/10.1023/A:1015394302429>

Chabance, M., Cattan, G., Maureille, B., 2016. Rapport Technique.

Chan, Y.-C., Wang, T.-J., Chang, C.-C., Chen, L.-C., Chu, H.-Y., Lin, S.-P., Chang, S.-T., 2015. Short-term effects of self-massage combined with home exercise on pain, daily activity, and autonomic function in patients with myofascial pain dysfunction syndrome. *J. Phys. Ther. Sci.* 27, 217–221. <https://doi.org/10.1589/jpts.27.217>

Cheatham, S.W., Baker, R., 2017. Differences in pressure pain threshold among men and women after foam rolling. *J. Bodyw. Mov. Ther.* 21, 978–982. <https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2017.06.006>

Cheatham, S.W., Kolber, M.J., 2018. Does roller massage with a foam roll change pressure pain threshold of the ipsilateral lower extremity antagonist and contralateral muscle

groups? an exploratory study. *J. Sport Rehabil.* 27, 165–169. <https://doi.org/10.1123/jsr.2016-0196>

Cheatham, S.W., Kolber, M.J., Cain, M., Lee, M., 2015. The effects of self-myofascial release using a foam roll or roller massager on joint range of motion, muscle recovery, and performance: a systematic review. *Int. J. Sports Phys. Ther.* 10, 827–838.

Cheatham, S.W., Kolber, M.J., Cain, Matt., 2017a. Comparison of video-guided, live instructed, and self-guided foam roll interventions on knee joint range of motion and pressure pain threshold: a randomized controlled trial. *Int. J. Sports Phys. Ther.* 12, 242–249.

Cheatham, S.W., Lee, M., Cain, M., Baker, R., 2016. The efficacy of instrument assisted soft tissue mobilization: a systematic review. *J. Can. Chiropr. Assoc.* 60, 200–211.

Cheatham, S.W., Stull, K.R., 2019. Roller massage: Comparison of three different surface type pattern foam rollers on passive knee range of motion and pain perception. *J. Bodyw. Mov. Ther.* 23, 555–560. <https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2019.05.002>

Cheatham, S.W., Stull, K.R., 2018a. Comparison of a foam rolling session with active joint motion and without joint motion: A randomized controlled trial. *J. Bodyw. Mov. Ther.* 22, 707–712. <https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2018.01.011>

Cheatham, S.W., Stull, K.R., 2018b. Comparison of three different density type foam rollers on knee range of motion and pressure pain threshold: a randomized controlled trial. *Int. J. Sports Phys. Ther.* 13, 474–482. <https://doi.org/10.26603/ijsp20180474>

Cheatham, S.W., Stull, K.R., Kolber, M.J., 2019. Comparison of a vibration roller and a nonvibration roller intervention on knee range of motion and Pressure pain threshold: a randomized controlled trial. *J. Sport Rehabil.* 28. <https://doi.org/10.1123/jsr.2017-0164>

Cheatham, S.W., Stull, K.R., Kolber, M.J., 2017b. Comparison of a vibrating foam roller and a non-vibrating foam roller Intervention on knee range of motion and pressure pain threshold: a randomized controlled trial. *J. Sport Rehabil.* 0, 1–23. <https://doi.org/10.1123/jsr.2017-0164>

Chen, R., Hallett, M., 1999. The time course of changes in motor cortex excitability associated with voluntary movement. *Can. J. Neurol. Sci.* 26, 163–169. <https://doi.org/10.1017/S0317167100000196>

Choi, J.-H., 2019. Effect of an exercise program using a foam roller on shoulder height and muscle activity in adults in their twenties with round shoulder. *Indian J. Public Health Res. Dev.* 10, 1112–1118. <https://doi.org/10.5958/0976-5506.2019.01220.8>

Chung, P.-K., Yuen, C.-K., 1999. Criterion-related validity of sit-and-reach tests in university men in Hong Kong. *Percept. Mot. Skills* 88, 304–316. <https://doi.org/10.2466/pms.1999.88.1.304>

Ciarrochi, J., 2004. Relationships between dysfunctional beliefs and positive and negative indices of well-being: a critical evaluation of the common beliefs survey-III. *J. Ration.-Emotive Cogn.-Behav. Ther.* 22, 171–188. <https://doi.org/10.1023/B:JORE.0000047306.55720.4e>

Claverie, B., Le Blanc, B., Fouillat, P., 2013. La cobotique. La robotique soumise. *Commun. Organ.* 44, 203–214. <https://doi.org/10.1007/s10796-019-09921-1>

Code de la santé publique - Article R4321-1, n.d. , Code de la santé publique.

Cole, G., 2018. The evidence behind foam rolling: a review. *Sport Olymp.-Paralympic Stud. J.* 3, 194–206.

Collet, C., Guillot, A., Lebon, F., MacIntyre, T., Moran, A., 2011. Measuring motor imagery using psychometric, behavioral, and psychophysiological tools. *Exerc. Sport Sci. Rev.* 39, 85–92. <https://doi.org/10.1097/JES.0b013e31820ac5e0>

Collura, T.F., 1993. History and evolution of electroencephalographic instruments and techniques. *J. Clin. Neurophysiol.* 10, 476–504.

Comstock, B.A., Solomon-Hill, G., Flanagan, S.D., Earp, J.E., Luk, H.-Y., Dobbins, K.A., Dunn-Lewis, C., Fragala, M.S., Ho, J.-Y., Hatfield, D.L., Vingren, J.L., Denegar, C.R., Volek, J.S., Kupchak, B.R., Maresh, C.M., Kraemer, W.J., 2011. Validity of the Myotest® in measuring force and power production in the squat and bench press. *J. Strength Cond. Res.* 25.

Crane, J.D., Ogborn, D.I., Cupido, C., Melov, S., Hubbard, A., Bourgeois, J.M., Tarnopolsky, M.A., 2012. Massage therapy attenuates inflammatory signaling after exercise-induced muscle damage. *Sci. Transl. Med.* 4, 119ra13. <https://doi.org/10.1126/scitranslmed.3002882>

Crewther, B., Kilduff, L., Cunningham, D., Cook, C., Owen, N., Yang, G.-Z., 2011. Validating two systems for estimating force and power. *Int. J. Sports Med.* 32 4, 254–8.

Crisan, A., 2010. Appareil et procede de massage expert. WO2010103243A1.

Crisan, A., 2009. Procede et appareil de massage. WO2009007597A1.

Cupido, C., 2010. Effects of massage therapy after exhaustive endurance exercise in young healthy males (Submitted to the School of Graduate Studies in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Masters of Science in Kinesiology). MC Master Univeristy, Hamilton, Ontario.

Davis, D.S., Quinn, R.O., Whiteman, C.T., Williams, J.D., Young, C.R., 2008. Concurrent validity of four clinical tests used to measure hamstring flexibility. *J. Strength Cond. Res.* 22. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31816359f2>

de Boer, A.G.E.M., van Lanschot, J.J.B., Stalmeier, P.F.M., van Sandick, J.W., Hulscher, J.B.F., de Haes, J.C.J.M., Sprangers, M.A.G., 2004. Is a single-item visual analogue scale as valid, reliable and responsive as multi-item scales in measuring quality of life? *Qual. Life Res.* 13, 311–320. <https://doi.org/10.1023/B:QURE.0000018499.64574.1f>

DeBruyne, D.M., Dewhurst, M.M., Fischer, K.M., Wojtanowski, M.S., Durall, C., 2016. Self-mobilization using a foam roller versus a roller massager: which is more effective for increasing hamstrings flexibility? *J. Sport Rehabil.* 26, 94–100. <https://doi.org/10.1123/jsr.2015-0035>

Dębski, P., Białas, E., Gnat, R., 2019. The parameters of foam rolling, self-myofascial release treatment: a review of the literature. *Biomed. Hum. Kinet.* 11, 36–46. <https://doi.org/10.2478/bhk-2019-0005>

Delaney, J., Leong, K.S., Watkins, A., Brodie, D., 2002. The short-term effects of myofascial trigger point massage therapy on cardiac autonomic tone in healthy subjects. *J. Adv. Nurs.* 37, 364–371.

Delextrat, A., Calleja-González, J., Hippocrate, A., Clarke, N.D., 2013. Effects of sports massage and intermittent cold-water immersion on recovery from matches by basketball players. *J. Sports Sci.* 31, 11–19. <https://doi.org/10.1080/02640414.2012.719241>

Diego, M.A., Field, T., Sanders, C., Hernandez-Reif, M., 2004. Massage therapy of moderate and light pressure and vibrator effects on EEG and heart rate. *Int. J. Neurosci.* 114, 31–44. <https://doi.org/10.1080/00207450490249446>

Drust, B., Atkinson, G., Gregson, W., French, D., Binningsley, D., 2003. The effects of massage on intra muscular temperature in the vastus lateralis in humans. *Int. J. Sports Med.* 24, 395–399. <https://doi.org/10.1055/s-2003-41182>

Dufour, M., Colné, P., Gouilly, P., 2016. *Massothérapie: effets, techniques et applications*. Maloine.

Dum, R.P., Strick, P.L., 1991. The origin of corticospinal projections from the premotor areas in the frontal lobe. *J. Neurosci.* 11, 667–689. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.11-03-00667.1991>

Eliska, O., Eliskova, M., 1995. Are peripheral lymphatics damaged by high pressure manual massage ? *Lymphology* 28, 21–30.



Else, J.W.A., 2016. The effectiveness of foam rolling treatment versus chiropractic manipulative therapy in the management of iliotibial band friction syndrome in runners and cyclists. University of Johannesburg.

Eriksson Crommert, M., Lacourpaille, L., Heales, L.J., Tucker, K., Hug, F., 2015. Massage induces an immediate, albeit short-term, reduction in muscle stiffness. *Scand. J. Med. Sci. Sports* 25, e490–e496. <https://doi.org/10.1111/sms.12341>

Estradère, J.D.J., 1863. Du massage son historique, ses manipulations, ses effets physiologiques et thérapeutiques par J. Estradère. Delahaye.

Eyssautier, F., Gibert, G., 2020. Device for managing the movements of robot, and associated treatment robot. CN110785269A.

Fairall, R.R., Cabell, L., Boergers, R.J., Battaglia, F., 2017. Acute effects of self-myofascial release and stretching in overhead athletes with GIRD. *J. Bodyw. Mov. Ther.* 21, 648–652. <https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2017.04.001>

Fama, B.J., Bueti, D.R., 2011. The acute effect of self-myofascial release on lower extremity plyometric performance. Sacred Heart University.

Farr, T., Nottle, C., Nosaka, K., Sacco, P., 2002. The effects of therapeutic massage on delayed onset muscle soreness and muscle function following downhill walking. *J. Sci. Med. Sport* 5, 297–306. [https://doi.org/10.1016/S1440-2440\(02\)80018-4](https://doi.org/10.1016/S1440-2440(02)80018-4)

Field, T., 2016. Massage therapy research review. *Complement. Ther. Clin. Pract.* 24, 19–31. <https://doi.org/10.1016/j.ctcp.2016.04.005>

Field, T., Grizzle, N., Scafidi, F., Abrams, S., Richardson, S., Kuhn, C., Schanberg, S., 1996a. Massage therapy for infants of depressed mothers. *Infant Behav. Dev.* 19, 107–112. [https://doi.org/10.1016/S0163-6383\(96\)90048-X](https://doi.org/10.1016/S0163-6383(96)90048-X)

Field, T., Ironson, G., Scafidi, F., Nawrocki, T., Goncalves, A., Burman, I., Pickens, J., Fox, N., Schanberg, S., Kuhn, C., 1996b. Massage therapy reduces anxiety and enhances EEG pattern of alertness and math computations. *Int. J. Neurosci.* 86, 197–205. <https://doi.org/10.3109/00207459608986710>

Fieldman, H., 1968. Relative contribution of the back and hamstring muscles in the performance of the toe-touch test after selected extensibility exercises. *Res. Q. Am. Assoc. Health Phys. Educ. Recreat.* 39, 518–523. <https://doi.org/10.1080/10671188.1968.10616574>

Fransoo, P., 2009. L'algomètre de pression. *Orthèses Main Principes Confect.* 9, 44–47. [https://doi.org/10.1016/S1779-0123\(09\)70066-X](https://doi.org/10.1016/S1779-0123(09)70066-X)

Freiwald, J., Baumgart, C., Kühnemann, M., Hoppe, M.W., 2016a. Foam-rolling in sport and therapy – potential benefits and risks: Part 1 – definitions, anatomy, physiology, and biomechanics. *Thema Konserv. Ther. Sportorthopädie* 32, 258–266. <https://doi.org/10.1016/j.orthtr.2016.07.001>

Freiwald, J., Baumgart, C., Kühnemann, M., Hoppe, M.W., 2016b. Foam-rolling in sport and therapy – potential benefits and risks: Part 2 – positive and adverse effects on athletic performance. *Thema Konserv. Ther. Sportorthopädie* 32, 267–275. <https://doi.org/10.1016/j.orthtr.2016.07.002>

Frenot, C., 2012. La goniométrie chez les patients porteurs d'une prothèse totale du genou: quelle position pour la mesure de flexion? Institut Lorrain de formation en masso-kinésithérapie de Nancy, Lorraine, Nancy.

Freund, H.-J., 2003. Somatosensory and motor disturbances in patients with parietal lobe lesions. *Adv. Neurol.* 93, 179–193.

Gajdosik, R., Lusin, G., 1983. Hamstring Muscle Tightness: Reliability of an Active-Knee-Extension Test. *Phys. Ther.* 63, 1085–1088. <https://doi.org/10.1093/ptj/63.7.1085>

Garcia-Gutiérrez, M., Guillén-Rogel, P., Cochrane, D., Marin, P., 2018. Cross transfer acute effects of foam rolling with vibration on ankle dorsiflexion range of motion. *J. Musculoskelet. Neuronal Interact.* 18, 262–267.

Goats, G.C., 1994. Massage--the scientific basis of an ancient art: Part 1. The techniques. *Br. J. Sports Med.* 28, 149. <https://doi.org/10.1136/bjism.28.3.149>

Golovin, V., Samorukov, A., Arkhipov, M., Kocherevskaya, L., 2018. Robotic restorative massage to increase working capacity. *Altern Integr Med* 7, 2. <https://doi.org/10.4172/2327-5162.1000261>

Gordon, C.-M., Lindner, S.M., Birbaumer, N., Montoya, P., Ankney, R.L., Andrasik, F., 2018. Self-myofascial vibro-shearing: a randomized controlled trial of biomechanical and related changes in male breakdancers. *Sports Med. - Open* 4, 13. <https://doi.org/10.1186/s40798-018-0128-1>

Grabow, L., Young, J.D., Alcock, L.R., Quigley, P.J., Byrne, J.M., Granacher, U., Škarabot, J., Behm, D.G., 2018. Higher quadriceps roller massage forces do not amplify range-

of-motion increases nor impair strength and jump performance. *J. Strength Cond. Res.* 32, 3059–3069. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001906>

Grieve, R., Barnett, S., Coghill, N., Cramp, F., 2013. Myofascial trigger point therapy for triceps surae dysfunction: a case series. *Man. Ther.* 18, 519–525. <https://doi.org/10.1016/j.math.2013.04.004>

Guan, L., Collet, J.-P., Yuskiv, N., Skippen, P., Brant, R., Kisson, N., 2014. The effect of massage therapy on autonomic activity in critically ill children. *Evid. Based Complement. Alternat. Med.* 2014, e656750. <https://doi.org/10.1155/2014/656750>

Guillot, A., Kerautret, Y., Queyrel, F., Schobb, W., Di Rienzo, F., 2019. Foam rolling and joint distraction with elastic band training performed for 5-7 weeks respectively improve lower limb flexibility. *J. Sports Sci. Med.* 18, 160–171.

Guimberteau, J.C., Findley, T.W., Kapandji, A.I., Armstrong, C., 2016. L'architecture du corps humain vivant: Le monde extracellulaire, les cellules et le fascia révélés par l'endoscopie intratissulaire. Ed Sully, Vannes, France.

Gulick, D.T., Palombaro, K., Lattanzi, J.B., 2011. Effect of ischemic pressure using a Backnobber II device on discomfort associated with myofascial trigger points. *J. Bodyw. Mov. Ther.* 15, 319–325. <https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2010.06.007>

Gurfinkel', V.S., Él'ner, A.M., 1988. Contribution of the frontal lobe secondary motor area to organization of postural components in human voluntary movement. *Neurophysiology* 20, 5–11. <https://doi.org/10.1007/BF02198418>

Halperin, I., Aboodarda, S.J., Button, D.C., Andersen, L.L., Behm, D.G., 2014. Roller massager improves range of motion of plantar flexor muscles without subsequent decreases in force parameters. *Int. J. Sports Phys. Ther.* 9, 92–102.

Han, S., Lee, Y., Lee, D., 2017. The influence of the vibration form roller exercise on the pains in the muscles around the hip joint and the joint performance. *J. Phys. Ther. Sci.* 29, 1844–1847. <https://doi.org/10.1589/jpts.29.1844>

Hanten, W.P., Olson, S.L., Butts, N.L., Nowicki, A.L., 2000. Effectiveness of a home program of ischemic pressure followed by sustained stretch for treatment of myofascial trigger points. *Phys. Ther.* 80, 997–1003. <https://doi.org/10.1093/ptj/80.10.997>

Hart, S.G., Staveland, L.E., 1988. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research, in: Hancock, P.A., Meshkati, N. (Eds.), *Advances in Psychology*. North-Holland, pp. 139–183. [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62386-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9)

Hasegawa, Y., Ootsuka, T., Fukuda, T., Arai, F., Kawaguchi, M., 2001. A relaxation system adapting to user's condition-identification of relationship between massage intensity and heart rate variability, in: *Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.01CH37164)*. Presented at the Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.01CH37164), pp. 3195–3200 vol.4. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2001.933110>

Hemmings, B., Smith, M., Graydon, J., Dyson, R., 2000. Effects of massage on physiological restoration, perceived recovery, and repeated sports performance. *Br. J. Sports Med.* 34, 109. <https://doi.org/10.1136/bjism.34.2.109>

Hendricks, S., Hill, H., Hollander, S. den, Lombard, W., Parker, R., 2019. Effects of foam rolling on performance and recovery: a systematic review of the literature to guide practitioners on the use of foam rolling. *J. Bodyw. Mov. Ther.* <https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2019.10.019>

Hinds, T., McEwan, I., Perkes, J., Dawson, E., Ball, D., George, K., 2004. Effects of massage on limb and skin blood flow after quadriceps exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* 36, 1308–1313. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000135789.47716.db>

Hiraiwa, Y., Arijji, Y., Kise, Y., Sakuma, S., Kurita, K., Arijji, E., 2013. Efficacy of massage treatment technique in masseter muscle hardness: robotic experimental approach. *CRANIO®* 31, 291–299. <https://doi.org/10.1179/crn.2013.31.4.007>

Hjermstad, M.J., Fayers, P.M., Haugen, D.F., Caraceni, A., Hanks, G.W., Loge, J.H., Fainsinger, R., Aass, N., Kaasa, S., 2011. Studies comparing numerical rating scales, verbal rating scales, and visual analogue scales for assessment of pain Intensity in Adults: a systematic literature review. *J. Pain Symptom Manage.* 41, 1073–1093. <https://doi.org/10.1016/j.jpainsymman.2010.08.016>

Hodgson, D.D., Lima, C.D., Low, J.L., Behm, D.G., 2018. Four weeks of roller massage training did not impact range of motion, pain pressure threshold, voluntary contractile

properties or jump performance. *Int. J. Sports Phys. Ther.* 13, 835–845.  
<https://doi.org/10.26603/ijsp20180835>

Hodgson, D.D., Quigley, P.J., Whitten, J.H.D., Reid, J.C., Behm, D.G., 2019. Impact of 10-minute interval roller massage on performance and active range of motion. *J. Strength Cond. Res.* 33, 1512–1523. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002271>

Hoffman, J., Benson, H., Arns, P., Stainbrook, G., Landsberg, G., Young, J., Gill, A., 1982. Reduced sympathetic nervous system responsivity associated with the relaxation response. *Science* 215, 190. <https://doi.org/10.1126/science.7031901>

Holt, L.E., Pelham, T.W., Burke, D.G., 1999. Modifications to the standard sit-and-reach flexibility protocol. *J. Athl. Train.* 34, 43–47.

Homan, R.W., Herman, J., Purdy, P., 1987. Cerebral location of international 10–20 system electrode placement. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* 66, 376–382.  
[https://doi.org/10.1016/0013-4694\(87\)90206-9](https://doi.org/10.1016/0013-4694(87)90206-9)

Hotfiel, T., Swoboda, B., Krinner, S., Grim, C., Engelhardt, M., Uder, M., Heiss, R.U., 2017. Acute effects of lateral thigh foam rolling on arterial tissue perfusion determined by spectral doppler and power doppler ultrasound. *J. Strength Cond. Res.* 31, 893–900.  
<https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001641>

Hsu, C.-C., Cheng, C.-W., Chiu, Y.-S., 2017. Analyze the beta waves of electroencephalogram signals from young musicians and non-musicians in major scale working memory task. *Neurosci. Lett.* 640, 42–46. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2017.01.022>

Humbert, G., 2012. Revue de littérature sur les effets du massage. Institut Lorrain de Formation en masso-thérapie de Nancy, Nancy.

Hunter, A., Smith, I., Watt, J., Yirrell, C., Galloway, S., 2006. The Effect of Massage on Force Production and Tensiomyography: 690. *Med. Sci. Sports Exerc.* - MED SCI SPORT Exerc. 38. <https://doi.org/10.1249/00005768-200605001-00129>

Ishii, H., Koga, H., Obokawa, Y., Solis, J., Takanishi, A., Katsumata, A., 2009. Development and experimental evaluation of oral rehabilitation robot that provides maxillofacial massage to patients with oral disorders. *Int. J. Robot. Res.* 28, 1228–1239. <https://doi.org/10.1177/0278364909104295>

Iwamoto, K., Mizukami, M., Asakawa, Y., Yoshio, M., Ogaki, R., Takemura, M., 2016. Effects of friction massage of the popliteal fossa on dynamic changes in muscle oxygenation and ankle flexibility. *J. Phys. Ther. Sci.*, 10.1589/jpts.28.2713 28, 2713–2716.

J. Mišeikis, P. Caroni, P. Duchamp, A. Gasser, R. Marko, N. Mišeikienė, F. Zwillig, C. de Castelbajac, L. Eicher, M. Früh, H. Früh, 2020. Lio - A personal robot assistant for human-robot Interaction and care applications. *IEEE Robot. Autom. Lett.* 5, 5339–5346. <https://doi.org/10.1109/LRA.2020.3007462>

J. Shen, O. Rudovic, S. Cheng, M. Pantic, 2015. Sentiment apprehension in human-robot interaction with NAO, in: 2015 International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction (ACII). Presented at the 2015 International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction (ACII), pp. 867–872. <https://doi.org/10.1109/ACII.2015.7344676>



Jakeman, J.R., Byrne, C., Eston, R.G., 2010. Efficacy of lower limb compression and combined treatment of manual massage and lower limb compression on symptoms of exercise-induced muscle damage in women. *J. Strength Cond. Res.* 24, 3157–3165. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181e4f80c>

Jay, K., Sundstrup, E., Søndergaard, S.D., Behm, D., Brandt, M., Særvoll, C.A., Jakobsen, M.D., Andersen, L.L., 2014. Specific and cross over effects of massage for muscle soreness: randomized controlled trial. *Int. J. Sports Phys. Ther.* 9, 82–91.

Jimenez, G.F.C., 2019. Sistema robótico para tratamientos fisioterapéuticos, mediante robot manipulador colaborativo y aire comprimido. ES1222864Y.

Jodo, E., Yamada, Y., Hatayama, T., Abe, T., et al, 1988. Effects of facial massage on the spontaneous EEG. *Tohoku Psychol. Folia* 47, 8–15.

Jones, N.A., Field, T., 1999. Massage and music therapies attenuate frontal EEG asymmetry in depressed... *Adolescence* 34, 529.

Joshi, A., Kale, S., Chandel, S., Pal, D.K., 2015. Likert scale: Explored and explained. *Curr. J. Appl. Sci. Technol.* 7, 396–403. <https://doi.org/doi.org/10.9734/BJAST/2015/14975>

Jourdain, C., 2015. Étude des effets d'une séance de massage hebdomadaire sur la perception des douleurs musculaires et des perceptions de la récupération globale chez des jeunes athlètes de haut niveau. Direction Régionale de la Jeunesse, des Sports et de la Cohésion sociale, Ecole Nationale de Kinésithérapie et de Rééducation, Saint-Maurice.

Jung, J., Choi, W., Lee, Y., Kim, J., Kim, H., Lee, K., Lee, J., Lee, S., 2017. Immediate effect of self-myofascial release on hamstring flexibility. *Phys. Ther. Rehabil. Sci.* 6, 45–51. <https://doi.org/10.14474/ptrs.2017.6.1.45>

Kaada, B., Torsteinb, O., 1989. Increase of plasma  $\beta$ -endorphins in connective tissue massage. *Gen. Pharmacol. Vasc. Syst.* 20, 487–489. [https://doi.org/10.1016/0306-3623\(89\)90200-0](https://doi.org/10.1016/0306-3623(89)90200-0)

Kabore, C., Kaux, J.-F., 2017. Les effets de la compression externe dynamique péristaltique type Normatec sur la récupération sportive. *Sci. Sports.* <https://doi.org/10.1016/j.scispo.2017.04.012>

Kalén, A., Pérez-Ferreirós, A., Barcala-Furelos, R., Fernández-Méndez, M., Padrón-Cabo, A., Prieto, J.A., Ríos-Ave, A., Abelairas-Gómez, C., 2017. How can lifeguards recover better? A cross-over study comparing resting, running, and foam rolling. *Am. J. Emerg. Med.* 35, 5. <https://doi.org/10.1016/j.ajem.2017.06.028>

Kargarfard, M., Lam, E.T.C., Shariat, A., Shaw, I., Shaw, B.S., Tamrin, S.B.M., 2016. Efficacy of massage on muscle soreness, perceived recovery, physiological restoration and physical performance in male bodybuilders. *J. Sports Sci.* 34, 959–965. <https://doi.org/10.1080/02640414.2015.1081264>

Kaur, P., 2019. Comparative study of myofascial release technique and transverse friction massage with thermotherapy in cervical trigger points. *Int. J. Sci. Res.* 8, 75–76.

Kelly, S., Beardsley, C., 2016. Specific and cross-over effects of foam rolling on ankle dorsiflexion range of motion. *Int. J. Sports Phys. Ther.* 11, 544–551.

Kerautret, Y., Di Rienzo, F., Eyssautier, C., Guillot, A., 2020. Selective effects of manual massage and foam rolling on perceived recovery and performance: current knowledge and future directions toward robotic massages. *Front. Physiol.* 11, 1567. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.598898>

Kerautret, Y., Guillot, A., Di Rienzo, F., 2021. Evaluating the effects of embedded self-massage practice on strength performance: a randomized crossover pilot trial. *PLOS ONE* 16, e0248031. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0248031>

Kett, A.R., Sichtung, F., 2020. Sedentary behaviour at work increases muscle stiffness of the back: Why roller massage has potential as an active break intervention. *Appl. Ergon.* 82, 102947. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2019.102947>

Kim, Y., Hong, Y., Park, H.-S., 2019. A soft massage tool is advantageous for compressing deep soft tissue with low muscle tension: Therapeutic evidence for self-myofascial release. *Complement. Ther. Med.* 43, 312–318. <https://doi.org/10.1016/j.ctim.2019.01.001>

Kleinpeter, É., 2015. Le Cobot, la coopération entre l'utilisateur et la machine. *Multitudes* 58, 70–75. <https://doi.org/10.3917/mult.058.0070>

Koga, H., Usuda, Y., Matsuno, M., Ogura, Y., Ishii, H., Solis, J., Takanishi, A., Katsumata, A., 2008. Development of the oral rehabilitation robot WAO-1. Presented at the Biomedical Robotics and Biomechatronics, 2008. *BioRob 2008. 2nd IEEE RAS & EMBS International Conference on, IEEE*, pp. 556–561.

Koumantakis, G.A., Roussou, E., Angoules, G.A., Angoules, N.A., Alexandropoulos, T., Mavrokosta, G., Nikolaou, P., Karathanassi, F., Papadopoulou, M., 2020. The immediate

effect of IASTM vs. vibration vs. light hand massage on knee angle repositioning accuracy and hamstrings flexibility: a pilot study. *J. Bodyw. Mov. Ther.* 24, 96–104. <https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2020.02.007>

Lardry, J.-M., 2016. Étude de l'ouvrage intitulé «Du massage: Son historique, ses manipulations, ses effets physiologiques et thérapeutiques», du Dr Jean Dominique Joachim Estradère. *Kin Sith Rapie Rev.* 171, 88–91.

Larousse, É., 2021a. Vibration [WWW Document]. URL <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/vibration/81801> (accessed 4.30.21).

Larousse, É., 2021b. Percussion [WWW Document]. URL <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/percussion/59445> (accessed 4.30.21).

Lastova, K., Nordvall, M., Walters-Edwards, M., Allnutt, A., Wong, A., 2018. Cardiac autonomic and blood pressure responses to an acute foam rolling session. *J. Strength Cond. Res.* 32, 2825–2830. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002562>

Le Gal, J., Begon, M., Gillet, B., Rogowski, I., 2018. Effects of self-myofascial release on shoulder function and perception in adolescent tennis players. *J. Sport Rehabil.* 27, 1–6. <https://doi.org/10.1123/jsr.2016-0240>

Lee, C.-L., Chu, I.-H., Lyu, B.-J., Chang, W.-D., Chang, N.-J., 2018. Comparison of vibration rolling, nonvibration rolling, and static stretching as a warm-up exercise on flexibility, joint proprioception, muscle strength, and balance in young adults. *J. Sports Sci.* 36, 2575–2582. <https://doi.org/10.1080/02640414.2018.1469848>

Lee, J., Young, A., Erb, N.J., Herzog, V.W., 2020. Acute and residual effects of IASTM and roller massage stick on hamstring range of motion. *J. Allied Health* 49, 51E-55E.

Lee, M., Kim, M., Oh, S., Choi, Y.-J., Lee, D., Lee, S.H., Yoon, B., 2017. A self-determination theory-based self-myofascial release program in older adults with myofascial trigger points in the neck and back: A pilot study. *Physiother. Theory Pract.* 33, 681–694. <https://doi.org/10.1080/09593985.2017.1345024>

Lee, S.Y., Sung, K.H., Chung, C.Y., Lee, K.M., Kwon, S.-S., Kim, T.G., Lee, S.H., Lee, I.H., Park, M.S., 2015. Reliability and validity of the Duncan-Ely test for assessing rectus femoris spasticity in patients with cerebral palsy. *Dev. Med. Child Neurol.* 57, 963–968. <https://doi.org/10.1111/dmcn.12761>

Lehrer, P.M., Carr, R., Sargunraj, D., Woolfolk, R.L., 1994. Stress management techniques: Are they all equivalent, or do they have specific effects? *Biofeedback Self-Regul.* 19, 353–401. <https://doi.org/10.1007/BF01776735>

Lei Hu, Yun Wang, Jie Zhang, Jun Zhang, Yan Cui, Ma, L., Jiang, J., Fang, L., Zhang, B., 2013. A massage robot based on chinese massage therapy. *Ind. Robot Int. J.* 40, 158–172. <https://doi.org/10.1108/01439911311297775>

Leivadi, S., Hernandez-Reif, M., Field, T., O'Rourke, M., D'Arienzo, S., Lewis, D., Pino, N. del, Schanberg, S., Kuhn, C., 1999. Massage therapy and relaxation effects on university dance students. *J. Dance Med. Sci.* 3, 108–112.

Li, K., Rüdiger, H., Ziemssen, T., 2019. Spectral analysis of heart rate variability: time window matters. *Front. Neurol.* 10, 545. <https://doi.org/10.3389/fneur.2019.00545>

Loturco, I., Suchomel, T., Bishop, C., Kobal, R., Pereira, L.A., McGuigan, M., 2019. One-repetition-maximum measures or maximum bar-power output: which is more related to sport performance? *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 14, 33–37. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2018-0255> 10.1123/ijsp.2018-0255 10.1123/ijsp.2018-0255 10.1123/ijsp.2018-0255

Luo, R.C., Chang, C.C., 2011. Electromyographic evaluation of therapeutic massage effect using multi-finger robot hand. Presented at the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, pp. 2431–2436. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2011.5980147>

Luo, R.C., Hsu, C.-W., Chen, S.-Y., 2016. Electroencephalogram signal analysis as basis for effective evaluation of robotic therapeutic massage, in: 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Presented at the 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 2940–2945. <https://doi.org/10.1109/IROS.2016.7759455>

Lyu, B.-J., Lee, C.-L., Chang, W.-D., Chang, N.-J., 2020. Effects of vibration rolling with and without dynamic muscle contraction on ankle range of motion, proprioception, muscle strength and agility in young adults: a crossover study. *Int. J. Environ. Res. Public. Health* 17. <https://doi.org/10.3390/ijerph17010354>

MacDonald, G.Z., Button, D.C., Drinkwater, E.J., Behm, D.G., 2014. Foam rolling as a recovery tool after an intense bout of physical activity. *Med. Sci. Sports Exerc.* 46, 131–142. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3182a123db>

MacDonald, G.Z., Penney, M.D.H., Mullaley, M.E., Cuconato, A.L., Drake, C.D.J., Behm, D.G., Button, D.C., 2013. An acute bout of self-myofascial release increases range of motion without a subsequent decrease in muscle activation or force. *J. Strength Cond. Res.* 27, 812–821. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31825c2bc1>

Macgregor, L.J., Fairweather, M.M., Bennett, R.M., Hunter, A.M., 2018. The effect of foam rolling for three consecutive days on muscular efficiency and range of motion. *Sports Med. - Open* 4, 26. <https://doi.org/10.1186/s40798-018-0141-4>

Mackin, C., 2017. Robotic massage machine and method of use.

Macron, A., 2015. La profession de masseur-kinésithérapeute instituée par la loi n 46-857 du 30 avril 1946: genèse et évolutions d'une profession de santé réglementée.

Madoni, S.N., Costa, P.B., Coburn, J.W., Galpin, A.J., 2018. Effects of foam rolling on range of motion, peak torque, muscle activation, and the hamstrings-to-quadriceps strength ratios. *J. Strength Cond. Res.* 32, 1821–1830.

Magerotte, G., Willaye, É., 2010. Chapitre 6. Observer et mesurer le comportement, in: *Intervention comportementale clinique, Questions de personne*. De Boeck Supérieur, Louvain-la-Neuve, pp. 83–97.

Mancinelli, C.A., Davis, D.S., Aboulhosn, L., Brady, M., Eisenhofer, J., Foutty, S., 2006. The effects of massage on delayed onset muscle soreness and physical performance in female collegiate athletes. *Phys. Ther. Sport* 7, 5–13. <https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2005.10.004>

Mansier, P., Clairambault, J., Charlotte, N., Médigue, C., Vermeiren, C., LePape, G., Carré, F., Gounaropoulou, A., Swynghedauw, B., 1996. Linear and non-linear analyses of heart rate variability: a minireview. *Cardiovasc. Res.* 31, 371–379. [https://doi.org/10.1016/S0008-6363\(96\)00009-0](https://doi.org/10.1016/S0008-6363(96)00009-0)

Margonis, K., Fatouros, I.G., Jamurtas, A.Z., Nikolaidis, M.G., Douroudos, I., Chatzinikolaou, A., Mitrakou, A., Mastorakos, G., Papassotiriou, I., Taxildaris, K., Kouretas, D., 2007. Oxidative stress biomarkers responses to physical overtraining: Implications for diagnosis. *Free Radic. Biol. Med.* 43, 901–910. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2007.05.022>

Markovic, G., 2015. Acute effects of instrument assisted soft tissue mobilization vs. foam rolling on knee and hip range of motion in soccer players. *J. Bodyw. Mov. Ther.* 19, 690–696. <https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2015.04.010>

Marks, M.C., BS, J.A., Chambers, H., 2003. Clinical utility of the Duncan-Ely test for rectus femoris dysfunction during the swing phase of gait. *Dev. Med. Child Neurol.* 45, 763–768. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2003.tb00886.x>

Marsac, J., 2013. Variabilité de la fréquence cardiaque : un marqueur de risque cardiométabolique en santé publique. *Bull. Académie Natl. Médecine* 197, 175–186. [https://doi.org/10.1016/S0001-4079\(19\)31635-8](https://doi.org/10.1016/S0001-4079(19)31635-8)

Martínez-Cabrera, F.I., Núñez-Sánchez, F.J., 2016. Acute effect of a foam roller on the mechanical properties of the rectus femoris based on tensiomyography in soccer players. *Int. J. Hum. Mov. Sports Sci.* 4, 26–32. <https://doi.org/10.13189/saj.2016.040203>



Mayorga-Vega, D., Merino-Marban, R., Viciano, J., 2014. Criterion-Related Validity of Sit-and-Reach Tests for Estimating Hamstring and Lumbar Extensibility: a Meta-Analysis. *J. Sports Sci. Med.* 13, 1–14.

Mazzei, B.G., 2019. Different effects of static and vibrating foam rollers on ankle plantar flexion flexibility and neuromuscular activation. Georgia Southern University.

McKechnie, G.J., Young, W.B., Behm, D.G., 2007. Acute effects of two massage techniques on ankle Joint flexibility and power of the plantar flexors. *J. Sports Sci. Med.* 6, 498–504.

Melzack, R., 1996. Gate control theory: On the evolution of pain concepts. *Pain Forum* 5, 128–138. [https://doi.org/10.1016/S1082-3174\(96\)80050-X](https://doi.org/10.1016/S1082-3174(96)80050-X)

Mezencevová, V., Torok, J., Czánová, T., Zajac, J., 2017. Endermologie new approach in the medicine treatment. *Technol. Eng.* 14. <https://doi.org/10.1515/teen-2017-0008>

Mikesky, Alan E., Bahamonde, R.E., Stanton, K., Alvey, T., Fitton, T., 2002. Acute effects of the stick on strength, power, and flexibility. *J. Strength Cond. Res.* 16, 446–450.

Miñarro, P.A.L., Andújar, P.S. de B., García, P.L.R., Toro, E.O., 2007. A comparison of the spine posture among several sit-and-reach test protocols. *J. Sci. Med. Sport* 10, 456–462. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2006.10.003>

Mohr, A.R., Long, B.C., Goad, C.L., 2014. Effect of foam rolling and static stretching on passive hip-flexion range of motion. *J. Sport Rehabil.* 23, 296–299. <https://doi.org/10.1123/JSR.2013-0025>

Monet, J., 2003. Emergence de la kinésithérapie en France à la fin du XIXe et au début du XXe siècle: une spécialité médicale impossible: genèse, acteurs et intérêts de 1880 à 1914.

Monteiro, E.R., Costa, P.B., Neto, V.G.C., Hoogenboom, B.J., da Silva Novaes, J., 2019. Posterior thigh foam rolling increases knee extension fatigue and passive shoulder range-of-motion. *J. Strength Cond. Res.* 33, 987–994.

Monteiro, E.R., Neto, V.G.C., 2016. Effect of different foam rolling volumes on knee extension fatigue. *Int. J. Sports Phys. Ther.* 11, 1076–1081.

Monteiro, E.R., Škarabot, J., Vigotsky, A.D., Brown, A.F., Gomes, T.M., Novaes, J. da S., 2017a. Maximum repetition performance after different antagonist foam rolling volumes in the inter-set rest period. *Int. J. Sports Phys. Ther.* 12, 76–84.

Monteiro, E.R., Vigotsky, A., Škarabot, J., Brown, A.F., Ferreira de Melo Fiuza, A.G., Gomes, T.M., Halperin, I., da Silva Novaes, J., 2017b. Acute effects of different foam rolling volumes in the intersets rest period on maximum repetition performance. *Hong Kong Physiother. J.* 36, 57–62. <https://doi.org/10.1016/j.hkpj.2017.03.001>

Mori, H., Hideo Ohsawa, Tim Hideaki Tanaka, Eiichi Taniwaki, Gerry Leisman, Kazushi Nishijo, 2004. Effect of massage on blood flow and muscle fatigue following isometric lumbar exercise. *Med. Sci. Monit.* 10, 173–178.

Murray, A.M., Jones, T.W., Horobeanu, C., Turner, A.P., Sproule, J., 2016. Sixty seconds of foam rolling does not affect functional flexibility or change muscle temperature in adolescent athletes. *Int. J. Sports Phys. Ther.* 11, 765–776.

Myers, T.W., 2013. *Anatomy Trains E-Book: Myofascial Meridians for Manual and Movement Therapists*. Elsevier Health Sciences.

Nakano, H., Kodama, T., Ueda, T., Mori, I., Tani, T., Murata, S., 2019. Effect of hand and foot massage therapy on psychological factors and EEG activity in elderly people requiring long-term care: a randomized cross-over study. *Brain Sci.* 9. <https://doi.org/10.3390/brainsci9030054>

Nielsen, A., 2014. *Gua sha - E-Book: A Traditional Technique for Modern Practice*. Elsevier Health Sciences.

Nissim, E., 2001. *Human touch massager*.

Oathes, D.J., Ray, W.J., Yamasaki, A.S., Borkovec, T.D., Castonguay, L.G., Newman, M.G., Nitschke, J., 2008. Worry, generalized anxiety disorder, and emotion: Evidence from the EEG gamma band. *Biol. Psychol.* 79, 165–170. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2008.04.005>

Obokawa, Y., Solis, J., Ishii, H., Koga, H., Takanishi, A., Katsumata, A., 2009. Clinical massage therapy with the oral-rehabilitation robot in patients with temporomandibular joint disorders. Presented at the Information Technology and Applications in Biomedicine, 2009. ITAB 2009. 9th International Conference on, IEEE, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ITAB.2009.5394420>

Ogai, R., Yamane, M., Matsumoto, T., Kosaka, M., 2008. Effects of petrissage massage on fatigue and exercise performance following intensive cycle pedaling. *Br. J. Sports Med.* 42, 834–838. <https://doi.org/10.1136/bjism.2007.044396>

Okamoto, T., Masuhara, M., Ikuta, K., 2014. Acute effects of self-myofascial release using a foam roller on arterial function. *J. Strength Cond. Res.* 28, 69–73. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31829480f5>

Pagani, M., Lombardi, F., Guzzetti, S., Rimoldi, O., Furlan, R., Pizzinelli, P., Sandrone, G., Malfatto, G., Dell'Orto, S., Piccaluga, E., 1986. Power spectral analysis of heart rate and arterial pressure variabilities as a marker of sympatho-vagal interaction in man and conscious dog. *Circ. Res.* 59, 178–193. <https://doi.org/10.1161/01.RES.59.2.178>

Park, J.-H., Shim, J.-W., Cho, W.-Y., Kim, J.-I., Jeon, J.-Y., Kim, H.-S., Park, H.-S., Shin, W.-C., Han, J.-H., Cho, J.-H., 2016. Literature review of tool-based manipulation for musculoskeletal diseases-with focus on Guasha and IASTM. *J. Korean Med. Rehabil.* 26, 57–65.

Parker, B.A., Sturm, K., MacIntosh, C.G., Feinle, C., Horowitz, M., Chapman, I.M., 2004. Relation between food intake and visual analogue scale ratings of appetite and other sensations in healthy older and young subjects. *Eur. J. Clin. Nutr.* 58, 212–218. <https://doi.org/10.1038/sj.ejcn.1601768>

Peacock, C.A., Krein, D.D., Antonio, J., Sanders, G.J., Silver, T.A., Colas, M., 2015. Comparing acute bouts of sagittal plane progression foam rolling vs. frontal plane progression foam rolling. *J. Strength Cond. Res.* 29, 2310–2315. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000867>

Peacock, C.A., Krein, D.D., Silver, T.A., Sanders, G.J., Von Carlowitz, K.-P.A., 2014. An acute bout of self-myofascial release in the form of foam rolling improves performance testing. *Int. J. Exerc. Sci.* 7, 202.

Pearcey, G.E.P., Bradbury-Squires, D.J., Kawamoto, J.-E., Drinkwater, E.J., Behm, D.G., Button, D.C., 2015. Foam rolling for delayed-onset muscle soreness and recovery of dynamic performance measures. *J. Athl. Train.* 50, 5–13. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-50.1.01>

Peeler, J., Anderson, J.E., 2008. Reliability of the Ely's test for assessing rectus femoris muscle flexibility and joint range of motion. *J. Orthop. Res.* 26, 793–799. <https://doi.org/10.1002/jor.20556>

Peng, C.-C., Hwang, T.-S., Lin, C.-J., Wu, Y.-T., Chang, C.-Y., Huang, J.-B., 2010. Development of intelligent massage manipulator and reconstruction of massage process path using image processing technique. Presented at the 2010 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, IEEE, pp. 551–556. <https://doi.org/10.1109/RAMECH.2010.5513135>

Petit Larousse Illustré, 2020. . Larousse.

Petitdant, B., 2018. Le Docteur Macaura et son Pulsoconn, appareil de massage vibratoire. *Kinésithérapie Rev.* 18, 36–42. <https://doi.org/10.1016/j.kine.2018.02.014>

Petitdant, B., 2016. Le goniomètre médical au fil du temps. *Kinésithérapie Rev.* 16, 48–61. <https://doi.org/10.1016/j.kine.2016.04.005>

Phillips, J., Diggin, D., King, D.L., Sforzo, G.A., 2018. Effect of varying self-myofascial release duration on subsequent athletic performance. *J. Strength Cond. Res.* <https://doi.org/10.1519/jsc.0000000000002751>

Pinar, S., Kaya, F., Bicer, B., Erzeybek, M., Cotuk, H., 2012. Different recovery methods and muscle performance after exhausting exercise: comparison of the effects of electrical muscle stimulation and massage. *Biol. Sport* 29, 269–275. <https://doi.org/10.5604/20831862.1019664>

Plews, D.J., Laursen, P.B., Kilding, A.E., Buchheit, M., 2014. Heart-rate variability and training-intensity distribution in elite rowers. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 9, 1026–1032. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2013-0497>

Poppendieck, W., Wegmann, M., Ferrauti, A., Kellmann, M., Pfeiffer, M., Meyer, T., 2016. Massage and performance recovery: a meta-analytical review. *Sports Med.* 46, 183–204. <https://doi.org/10.1007/s40279-015-0420-x>

Powden, C.J., Hoch, J.M., Hoch, M.C., 2015. Reliability and minimal detectable change of the weight-bearing lunge test: A systematic review. *Man. Ther.* 20, 524–532. <https://doi.org/10.1016/j.math.2015.01.004>

Qiu, C., Zhang, Y., Kai, L., 2019.

Raisbeck, L.D., Diekfuss, J.A., Wyatt, W., Shea, J.B., 2015. Motor imagery, physical practice, and memory: the effects on performance and workload. *Percept. Mot. Skills* 121, 691–705. <https://doi.org/10.2466/23.25.PMS.121c23x6>

Rajendra Acharya, U., Paul Joseph, K., Kannathal, N., Lim, C.M., Suri, J.S., 2006. Heart rate variability: a review. *Med. Biol. Eng. Comput.* 44, 1031–1051. <https://doi.org/10.1007/s11517-006-0119-0>

Rapaport, M.H., Schettler, P., Bresee, C., 2012. A preliminary study of the effects of repeated massage on hypothalamic–pituitary–adrenal and immune function in healthy individuals: a study of mechanisms of action and dosage. *J. Altern. Complement. Med.* 18, 789–797. <https://doi.org/10.1089/acm.2011.0071>

Rapaport, M.H., Schettler, P., Bresee, C., 2010. A preliminary study of the effects of a single session of swedish massage on hypothalamic–pituitary–adrenal and immune function in normal individuals. *J. Altern. Complement. Med.* 16, 1079–1088. <https://doi.org/10.1089/acm.2009.0634>

Reina, N., 2019. Connected orthopedics and trauma surgery: New perspectives. 2018 *Instr. Course Lect. SoFCOT* 105, S15–S22. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2018.05.018>

Reina, N., Cognault, J., Ollivier, M., Dagneaux, L., Gauci, M.-O., Pailhé, R., 2018. The CJOrtho app: A mobile clinical and educational tool for orthopedics. *Orthop. Traumatol. Surg. Res.* 104, 523–527. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2018.01.022>

Remondière, R., 1996. *Le geste et la plume. Histoire d'une professionnalisation en devenir: les masseurs-kinésithérapeutes dans la France d'hier et d'aujourd'hui (1790–1990).*

Rho, K.-H., Han, S.-H., Kim, K.-S., Lee, M.S., 2006. Effects of aromatherapy massage on anxiety and self-esteem in korean elderly women: a pilot study. *Int. J. Neurosci.* 116, 1447–1455. <https://doi.org/10.1080/00207450500514268>

Ribas, V.R., Ribas, R.G., Nóbrega, J. de A., da Nóbrega, M.V., Espécie, J.A. de A., Calafange, M.T., Calafange, C. de O.M., Martins, H.A. de L., 2018. Pattern of anxiety, insecurity, fear, panic and/or phobia observed by quantitative electroencephalography (QEEG). *Dement. Neuropsychol.* 12, 264–271. <https://doi.org/10.1590/1980-57642018dn12-030007>

Richman, E.D., Tyo, B.M., Nicks, C.R., 2019. Combined effects of self-myofascial release and dynamic stretching on range of motion, jump, sprint, and agility performance. *J. Strength Cond. Res.* 33, 1795–1803. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002676>

Rioux, J.-P., 2014. *La Révolution industrielle (1770-1880). Points.*

Rivera, M., Eberman, L., Games, K., Powden, C.J., 2019. Comparison of myofascial release techniques on pectoralis minor length, glenohumeral total arc of motion, and skin temperature: a pilot study. *J. Sport Rehabil.* 0, 1–5. <https://doi.org/10.1123/jsr.2018-0130>

Rizzolatti, G., Fogassi, L., Gallese, V., 2002. Motor and cognitive functions of the ventral premotor cortex. *Curr. Opin. Neurobiol.* 12, 149–154. [https://doi.org/10.1016/S0959-4388\(02\)00308-2](https://doi.org/10.1016/S0959-4388(02)00308-2)

Robertson, A., Watt, J.M., Galloway, S.D.R., 2004. Effects of leg massage on recovery from high intensity cycling exercise. *Br. J. Sports Med.* 38, 173. <https://doi.org/10.1136/bjism.2002.003186>

Romero-Moraleda, B., La Touche, R., Lerma-Lara, S., Ferrer-Peña, R., Paredes, V., Peinado, A.B., Muñoz-García, D., 2017. Neurodynamic mobilization and foam rolling improved delayed-onset muscle soreness in a healthy adult population: a randomized controlled clinical trial. *PeerJ* 5, 18. <https://doi.org/10.7717/peerj.3908>



Rossettini, G., Rondoni, A., Schiavetti, I., Tezza, S., Testa, M., 2016. Prevalence and risk factors of thumb pain in Italian manual therapists: an observational cross-sectional study. *Work Read. Mass* 54, 159–169. <https://doi.org/10.3233/wor-162289>

Royer, A., Cecconello, R., 2004. Bilans articulaires cliniques et goniométriques. *Généralités. EMC - Podol.-Kinésithérapie* 1, 82–91. <https://doi.org/10.1016/j.emck.2004.02.001>

Rubio, S., Díaz, E., Martín, J., Puente, J.M., 2004. Evaluation of subjective mental workload: a comparison of SWAT, NASA-TLX, and Workload Profile Methods. *Appl. Psychol.* 53, 61–86. <https://doi.org/10.1111/j.1464-0597.2004.00161.x>

Sakata, H., Takaoka, Y., Kawarasaki, A., Shibutani, H., 1973. Somatosensory properties of neurons in the superior parietal cortex (area 5) of the rhesus monkey. *Brain Res.* 64, 85–102. [https://doi.org/10.1016/0006-8993\(73\)90172-8](https://doi.org/10.1016/0006-8993(73)90172-8)

Sandrey, M.A., Lancellotti, C., Hester, C., 2020. The effect of foam rolling versus IASTM on knee range of motion, fascial displacement, and patient satisfaction. *J. Sport Rehabil.*

Schacter, D.L., 1977. EEG theta waves and psychological phenomena: A review and analysis. *Biol. Psychol.* 5, 47–82. [https://doi.org/10.1016/0301-0511\(77\)90028-X](https://doi.org/10.1016/0301-0511(77)90028-X)

Schäfer, A., Vagedes, J., 2013. How accurate is pulse rate variability as an estimate of heart rate variability?: A review on studies comparing photoplethysmographic technology with an electrocardiogram. *Int. J. Cardiol.* 166, 15–29. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2012.03.119>

Schleip, R., 2003a. Fascial plasticity – a new neurobiological explanation: Part 1. *J. Bodyw. Mov. Ther.* 7, 11–19. [https://doi.org/10.1016/S1360-8592\(02\)00067-0](https://doi.org/10.1016/S1360-8592(02)00067-0)

Schleip, R., 2003b. Fascial plasticity – a new neurobiological explanation Part 2. *J. Bodyw. Mov. Ther.* 7, 104–116. [https://doi.org/10.1016/S1360-8592\(02\)00076-1](https://doi.org/10.1016/S1360-8592(02)00076-1)

Schleip, R., Baker, A., 2015. *Fascia in sport and movement*. Handspring Publishing.

Schmitt, L., Regnard, J., Millet, G.P., 2015. Monitoring fatigue status with HRV measures in elite athletes: an avenue beyond RMSSD? *Front. Physiol.* 6, 343. <https://doi.org/10.3389/fphys.2015.00343>

Schroeder, J., Renk, V., Braumann, K.-M., Hollander, K., 2017. Acute foam rolling effects on contractile properties of the m. biceps femoris. *Ger. J. Exerc. Sport Res.* 47, 294–300. <https://doi.org/10.1007/s12662-017-0467-y>

Schultz, J.H., Luthe, W., 1959. *Autogenic training: a psychophysiologic approach to psychotherapy.*, *Autogenic training: A psychophysiologic approach to psychotherapy*. Grune & Stratton, Oxford, England.

Schwabedal, J.T.C., Riedl, M., Penzel, T., Wessel, N., 2016. Alpha-wave frequency characteristics in health and insomnia during sleep. *J. Sleep Res.* 25, 278–286. <https://doi.org/10.1111/jsr.12372>

Sharpe, P.A., Williams, H.G., Granner, M.L., Hussey, J.R., 2007. A randomised study of the effects of massage therapy compared to guided relaxation on well-being and stress perception among older adults. *Complement. Ther. Med.* 15, 157–163. <https://doi.org/10.1016/j.ctim.2007.01.004>

Silbaugh, K., 2013. Validity of Instrument Assisted Soft Tissue Mobilization for detecting myofascial adhesions through secondary diagnostic ultrasound analysis.

Singh, J., Knight, R.T., 1990. Frontal lobe contribution to voluntary movements in humans. *Brain Res.* 531, 45–54. [https://doi.org/10.1016/0006-8993\(90\)90756-2](https://doi.org/10.1016/0006-8993(90)90756-2)

Škarabot, J., Beardsley, C., Štirn, I., 2015. Comparing the effect of self-myofascial release with static stretching on ankle range-of-motion in adolescent athletes. *Int. J. Sports Phys. Ther.* 10, 203–212.

Skinner, B., Moss, R., Hammond, L., 2020. A systematic review and meta-analysis of the effects of foam rolling on range of motion, recovery and markers of athletic performance. *J. Bodyw. Mov. Ther.* 24, 105–122. <https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2020.01.007>

Smith, L., Keating, M.N., Holbert, D., Spratt, D.J., McCammon, M.R., Smith, S.S., Israel, R.C., 1994. The effects of athletic massage on delayed onset muscle soreness, creatine kinase, and neutrophil count: a preliminary report. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.* 19, 93–99. <https://doi.org/10.2519/jospt.1994.19.2.93>

Solis, J., Obokawa, Y., Ishii, H., Koga, H., Takanishi, A., Katsumata, A., 2009. Development of oral rehabilitation robot WAO-1R designed to provide various massage techniques. Presented at the Rehabilitation Robotics, 2009. ICORR 2009. IEEE International Conference on, IEEE, pp. 457–462. <https://doi.org/10.1109/ICORR.2009.5209562>

Standley, R.A., Miller, M.G., Binkley, H., 2010. Massage's effect on injury, recovery, and performance: a review of techniques and treatment parameters. *Strength Cond. J.* 32, 64–67. <https://doi.org/10.1519/SSC.0b013e3181c33918>

Stanley, J., Peake, J.M., Buchheit, M., 2013. Consecutive days of cold water immersion: effects on cycling performance and heart rate variability. *Eur. J. Appl. Physiol.* 113, 371–384. <https://doi.org/10.1007/s00421-012-2445-2>

Strub, M., 2013. Etude de l'effet du massage sur le tonus musculaire; intérêt de l'électromyographie de surface.

Sullivan, K.M., Silvey, D.B., Button, D.C., Behm, D.G., 2013. Roller-massager application to the hamstrings increases sit-and-reach range of motion within five to ten seconds without performance impairment. *Int. J. Sports Phys. Ther.* 8, 228–236.

Suryanarayanan Murali, Shanmugam, S.V., Prasaad, G.A., Kumar, M.S., Manoharan, C., Devadasan, S.R., Muruges, R., 2014. Fatigue mitigation through the optimization of ergonomic positional parameters in massage therapy using virtual instrumentation. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 70, 173–184. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5259-4>

T. Nomura, T. Kanda, T. Suzuki, K. Kato, 2008. Prediction of human behavior in Human--Robot Interaction using psychological scales for anxiety and negative attitudes toward robots. *IEEE Trans. Robot.* 24, 442–451. <https://doi.org/10.1109/TRO.2007.914004>

T. Nomura, T. Suzuki, T. Kanda, K. Kato, 2006. Measurement of anxiety toward robots, in: *ROMAN 2006 - The 15th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*. Presented at the *ROMAN 2006 - The 15th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, pp. 372–377. <https://doi.org/10.1109/ROMAN.2006.314462>

Takanishi, A., Katsumata, A., Koga, H., Ishii, H., Solis, J., Obokawa, Y., 2009. Massage Robot and Control Program Thereof.

Takanishi, A., Katsumata, A., Usuda, Y., Koga, H., Matsuno, M., Ogura, Y., Ishii, H., Solis, J., 2008. Massage robot, control program therefor, and robot for specifying portion of human body.

Terada, K., Nakatani, T., 2018. Effect of concurrent self-massage and resistance training in middle-aged and older adults: a randomized controlled trial. *J. Phys. Fit. Sports Med.* 7, 47–55.

Terry, P.C., Lane, A.M., Fogarty, G.J., 2003. Construct validity of the Profile of Mood States — Adolescents for use with adults. *Psychol. Sport Exerc.* 4, 125–139. [https://doi.org/10.1016/S1469-0292\(01\)00035-8](https://doi.org/10.1016/S1469-0292(01)00035-8)

Terry, P.C., Lane, A.M., Lane, H.J., Keohane, L., 1999. Development and validation of a mood measure for adolescents. *J. Sports Sci.* 17, 861–872. <https://doi.org/10.1080/026404199365425>

Thistlethwaite, J., Vonderhaar, R., Hockenberry, K., Rindler, L., Cayot, T., Nelson, B., 2016. The effects of foam-rolling on femoral endothelial function. *Med. Sci. Sports Exerc.* 48, 1070.

Tiidus, P., Shoemaker, J., 1995. Effleurage massage, muscle blood flow and long-term post-exercise strength recovery. *Int. J. Sports Med.* 16, 478–483. <https://doi.org/10.1055/s-2007-973041>

Travell, J.G., Simons, D.G., 1983. *Myofascial Pain and Dysfunction: The Trigger Point Manual*, Myofascial Pain and Dysfunction: The Trigger Point Manual. Williams & Wilkins.

Viitasalo, J.T., Niemelä, K., Kaappola, R., Korjus, T., Levola, M., Mononen, H.V., Rusko, H.K., Takala, T.E.S., 1995. Warm underwater water-jet massage improves recovery from intense physical exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.* 71, 431–438. <https://doi.org/10.1007/BF00635877>

Wallace, R.K., 1970. Physiological effects of transcendental meditation. *Science* 167, 1751–1754. <https://doi.org/10.1126/science.167.3926.1751>

Wamontree, P., Kanchanakhan, N., Eungpinichpong, W., 2016. The effects of traditional Thai self-massage using Wilai massage stick™ in patients on upper trapezius with myofascial trigger points: a randomized control trial. *Int. J.* 11, 2834–2837.

Wamontree, P., Kanchanakhan, N., Eungpinichpong, W., 2015a. Effects of traditional Thai self-massage using a massage stick versus Ibuprofen on upper back pain associated with myofascial trigger points: a pilot study. *J Health Res* 29, 403–8. <https://doi.org/10.14456/jhr.2015.32>

Wamontree, P., Kanchanakhan, N., Eungpinichpong, W., Jeensawek, A., 2015b. Effects of traditional Thai self-massage using a Wilai massage stick™ versus ibuprofen in patients with upper back pain associated with myofascial trigger points: a randomized controlled trial. *J. Phys. Ther. Sci.* 27, 3493–3497. <https://doi.org/10.1589/jpts.27.3493>

Weerapong, P., Hume, P.A., Kolt, G.S., 2005. The mechanisms of massage and effects on performance, muscle recovery and injury prevention. *Sports Med.* 35, 235–256. <https://doi.org/10.2165/00007256-200535030-00004>

Wells, K.F., Dillon, E.K., 1952. The sit and reach - a test of back and leg flexibility. *Res. Q. Am. Assoc. Health Phys. Educ. Recreat.* 23, 115–118. <https://doi.org/10.1080/10671188.1952.10761965>

White, G.E., West, S.L., Caterini, J.E., Battista, A.P.D., Rhind, S.G., Wells, G.D., 2020. Massage therapy modulates inflammatory mediators following sprint exercise in healthy male athletes. *J. Funct. Morphol. Kinesiol.* 5. <https://doi.org/10.3390/jfmk5010009>

Wiewelhove, T., Döweling, A., Schneider, C., Hottenrott, L., Meyer, T., Kellmann, M., Pfeiffer, M., Ferrauti, A., 2019. A meta-analysis of the effects of foam rolling on performance and recovery. *Front. Physiol.* 10, 376. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00376>

Wilke, J., Müller, A.-L., Giesche, F., Power, G., Ahmedi, H., Behm, D.G., 2020. Acute effects of foam rolling on range of motion in healthy adults: a systematic review with multilevel meta-analysis. *Sports Med.* 50, 387–402. <https://doi.org/10.1007/s40279-019-01205-7>

Wilke, J., Vogt, L., Banzer, W., 2018. Immediate effects of self-myofascial release on latent trigger point sensitivity: a randomized, placebo-controlled trial. *Biol. Sport* 35, 349–354. <https://doi.org/10.5114/biolSport.2018.78055>

Willems, M.E., Hale, T., Wilkinson, C.S., 2009. Effect of manual massage on muscle-specific soreness and single leg jump performance after downhill treadmill walking. *Med. Sport.* 13, 61–66. <https://doi.org/10.2478/v10036-009-0011-8>

Williamson, A., Hoggart, B., 2005. Pain: a review of three commonly used pain rating scales. *J. Clin. Nurs.* 14, 798–804. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2702.2005.01121.x>

Wiltshire, E.V., Poitras, V., Pak, M., Hong, T., Rayner, J., Tschakovsky, M.E., 2010. Massage impairs postexercise muscle blood flow and lactic acid removal. *Med. Sci. Sports Exerc.* 42, 1062–1071. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181c9214f>

Wolpert, D.M., Flanagan, J.R., 2001. Motor prediction. *Curr. Biol.* 11, R729–R732.

Wu, J.-J., Cui, Y., Yang, Y.-S., Kang, M.-S., Jung, S.-C., Park, H.K., Yeun, H.-Y., Jang, W.J., Lee, S., Kwak, Y.S., Eun, S.-Y., 2014. Modulatory effects of aromatherapy massage intervention on electroencephalogram, psychological assessments, salivary cortisol and plasma brain-derived neurotrophic factor. *Complement. Ther. Med.* 22, 456–462. <https://doi.org/10.1016/j.ctim.2014.04.001>

Yang, J., Chen, S., Hsieh, C.-L., Lin, J., 2012. Effects and predictors of shoulder muscle massage for patients with posterior shoulder tightness. *BMC Musculoskelet. Disord.* 13, 46. <https://doi.org/10.1186/1471-2474-13-46>

Ye, X., Killen, B.S., Zelizney, K.L., Miller, W.M., Jeon, S., 2019. Unilateral hamstring foam rolling does not impair strength but the rate of force development of the contralateral muscle. *PeerJ* 7, e7028. <https://doi.org/10.7717/peerj.7028>

Yin Xiaoqin, Xu Yonggen, 2010. Design and simulation of Chinese massage robot based on parallel mechanism, in: 2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering. Presented at the 2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, pp. 2512–2515. <https://doi.org/10.1109/MACE.2010.5535326>



Zainuddin, Z., Newton, M., Sacco, P., Nosaka, K., 2005. Effects of massage on delayed-onset muscle soreness, swelling, and recovery of muscle function. *J. Athl. Train.* 40, 174–180.

Zelikovski, A., Kaye, C.L., Fink, G., Spitzer, S.A., Shapiro, Y., 1993. The effects of the modified intermittent sequential pneumatic device (MISPD) on exercise performance following an exhaustive exercise bout. *Br. J. Sports Med.* 27, 255. <https://doi.org/10.1136/bjism.27.4.255>

## **ANNEXES**

# Annexe 1



## Questionnaire médical : contre-indications aux massages

Souffrez-vous de :

(entourez votre réponse)

- Varices et talengetasies (Si oui, précisez la zone) : 

oui	non
-----	-----
- Processus inflammatoires et infectieux (fièvre, ulcères variqueux et phlébite en phase chaude, poussées inflammatoires rhumatismales...) 

oui	non
-----	-----
- Lésions osseuses en cours de consolidation ou fraîchement ostéosynthésées 

oui	non
-----	-----
- Certaines affections cutanées (eczéma, zona, herpès...), tissus infectés (Si oui, précisez la zone) : 

oui	non
-----	-----
- Athérosclérose , antécédents ou suspicions de thrombose 

oui	non
-----	-----
- Hématome de moins de 48 heures (Si oui, précisez la zone) : 

oui	non
-----	-----
- Cancers en phase évolutive 

oui	non
-----	-----
- Femmes enceintes, allaitantes, ou en âge de procréer sans moyen de contraception 

oui	non
-----	-----
- Ostéoporose 

oui	non
-----	-----
- Lithiase rénale sévère 

oui	non
-----	-----
- Fragilité cutanée (Si oui, précisez la zone) : 

oui	non
-----	-----
- Cicatrices avec fils ou agrafes (Si oui, précisez la zone) : 

oui	non
-----	-----
- Prise d'un traitement anti-coagulant 

oui	non
-----	-----
- Troubles cardio-respiratoires 

oui	non
-----	-----
- Hémophilie 

oui	non
-----	-----
- Calcification des tissus mous 

oui	non
-----	-----
- Hypertension artérielle sévère 

oui	non
-----	-----
- Diabète 

oui	non
-----	-----
- Pathologie neurologique 

oui	non
-----	-----
- Vous êtes sous tutelle ou curatelle 

oui	non
-----	-----

**Obligation vous est faite de nous signaler toute pathologie non bénigne qui pourrait ne pas apparaître dans ce questionnaire :**

Je soussigné(e) ..... certifie l'exactitude des informations ci-dessus.

Date :

Signature :

Ces données personnelles sont collectées par la société Capsix Robotics en vue de déterminer si la personne est apte à utiliser le Robot. Elles seront stockées durant 12 mois par la société à des fins de preuve de la bonne information de l'utilisateur. Elles seront détruites une fois passé ce délai. Ces données sont accessibles uniquement à un personnel habilité de Capsix Robotics et dans la seule hypothèse d'une nécessité probatoire. En tout état de cause, Capsix Robotics s'engage à respecter la législation en vigueur relative à la Protection des données personnelles et en particulier le Règlement Général de Protection des Données n°2016-679.

# Annexe 2

## Tâche de calcul mental

A partir d'un nombre aléatoire entre 0 et 500, effectuez une série de soustraction (-7) à partir de chaque résultat précédent. Sur le temps imparti de 120 secs, réalisez un maximum d'opération en faisant le minimum d'erreur. Remplissez pour cela la grille de haut en bas et de gauche à droite.

Exemple :  $407 - 7 = 400$  ;  $400 - 7 = 393$ ...

Nb de réponses		
Nb d'erreurs		
Nb de bonnes réponses		


## Annexe 3

### QUESTIONNAIRE DE BRUMS

Vous trouverez ci-dessous une liste de mots pouvant décrire votre humeur actuelle. Merci de lire chacun d'entre eux avec attention. Ensuite veuillez entourer les réponses de manière à pouvoir décrire au mieux l'humeur dans lequel vous vous sentez au moment présent.

Assurez-vous d'avoir répondu à toutes les questions.

**0 = pas du tout    1 = un peu    2 = modérément    3 = beaucoup    4 = extrêmement**

Paniqué	0	1	2	3	4
Vif	0	1	2	3	4
Embrouillé	0	1	2	3	4
Ereinté	0	1	2	3	4
Déprimé	0	1	2	3	4
Découragé	0	1	2	3	4
Agacé	0	1	2	3	4
Epuisé	0	1	2	3	4
Désorienté	0	1	2	3	4
Somnolent	0	1	2	3	4
Amer	0	1	2	3	4
Malheureux	0	1	2	3	4

Anxieux	0	1	2	3	4
Inquiet	0	1	2	3	4
Energique	0	1	2	3	4
Triste	0	1	2	3	4
Confus	0	1	2	3	4
Nerveux	0	1	2	3	4
Fâché	0	1	2	3	4
Dynamique	0	1	2	3	4
Fatigué	0	1	2	3	4
Irritable	0	1	2	3	4
Eveillé	0	1	2	3	4
Hésitant	0	1	2	3	4

# Annexe 4

## NASA Task Load Index

La méthode du NASA Task Load Index (TLX) de Hart et Staveland évalue la charge de travail sur 5 échelles de 7 points. Des incréments d'estimation élevée, moyenne et basse pour chaque point résultent en 21 graduations sur les échelles.

Nom : Tâche : Date :

Difficulté mentale Comment était la difficulté mentale de la tâche ?



Difficulté physique Comment était la difficulté physique de la tâche ?



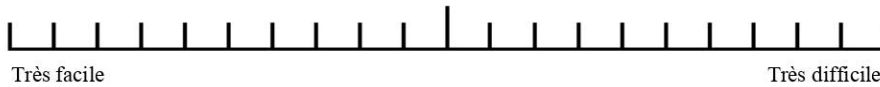
Contrainte temporelle Comment avez-vous ressenti la pression temporelle lors de l'exécution de la tâche ?



Performance Avez-vous réussi à accomplir ce qui vous était demandé ?



Effort A quel point l'exercice fut-il difficile à accomplir ?









Frustration Etiez-vous stressé, découragé, agacé, inconfortable ?



## Annexe 5

### Questionnaire des sensations physiques perçues - participants

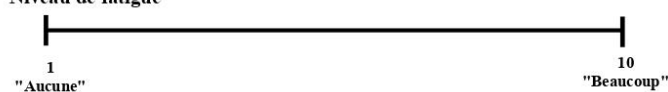
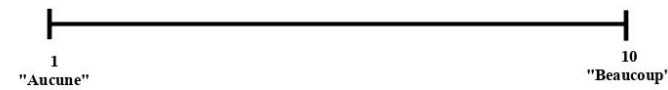
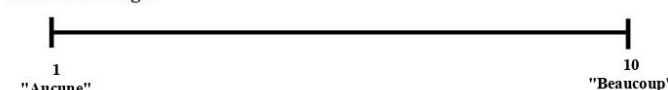
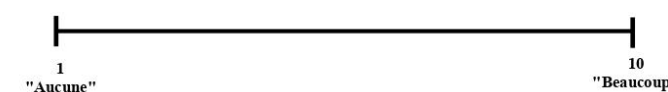

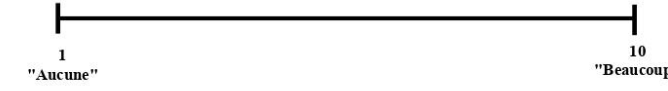

Pour chacune des rubriques suivantes, indiquez à quel point chacune est vraie pour vous en encerclant le chiffre approprié. Pour se rapprocher au plus proche de la réalité, répondre de manière automatique.

<b>Sensations de forme</b>	"Pas du tout"  "Tout à fait"
<b>Sensations de détente musculaire</b>	"Pas du tout"  "Tout à fait"
<b>Chaleur ressentie dans le dos</b>	"Pas du tout"  "Tout à fait"
<b>Sensations de souplesse</b>	"Pas du tout"  "Tout à fait"
<b>Sensations de douleur</b>	"Pas du tout"  "Tout à fait"
<b>Niveau d'anxiété</b>	"Pas du tout"  "Tout à fait"

## Annexe 6

### Questionnaire des sensations perçues - masseur-kinésithérapeute

Pour chacune des rubriques suivantes, indiquez à quel point chacune est vraie pour vous en traçant un marqueur perpendiculaire sur la ligne continue noire. Pour se rapprocher au plus proche de la réalité, répondre de manière intuitive.

<b>Avant massage manuel</b>	
Niveau de fatigue	
Niveau de tension/ douleur musculaire	
<b>Après massage manuel</b>	
Niveau de fatigue	
Niveau de tension/ douleur musculaire	
Satisfaction d'efficacité	
Satisfaction du niveau de pression appliquée	
Satisfaction de la fréquence gestuelle appliquée	
Satisfaction de l'amplitude gestuelle appliquée	