HAL
open science

Efficacité des techniques de récupération en réponse à la charge induite par le tennis de haut niveau

Mathilde Poignard

To cite this version:

Mathilde Poignard. Efficacité des techniques de récupération en réponse à la charge induite par le tennis de haut niveau. Physiologie [q-bio.TO]. Université Paris Cité, 2020. Français. NNT : 2020UNIP5174 . tel-03525104v2

HAL Id: tel-03525104

https://insep.hal.science//tel-03525104v2

Submitted on 30 Aug 2023

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

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

Université de Paris

Ecole doctorale 566 : Sciences du sport, de la motricité et du mouvement humain

Laboratoire Sport, Expertise, Performance – EA 7370

Efficacité des techniques de récupération en réponse à la charge induite par le tennis de haut niveau

Par Mathilde Poignard

Thèse de doctorat en Sciences du Sport et du Mouvement Humain

Dirigée par Gaël Guilhem et co-encadré par François Bieuzen

Présentée et soutenue publiquement le 07 septembre 2020

Devant un jury composé de :

Rapporteurs

Laurent Bosquet, Professeur des universités, Université de Poitiers
Olivier Girard, Associate Professor, The University of Western Australia, Australie

Examinateurs

Edith Filaire, Professeur des universités, Université d'Orléans
Murielle Garcin, Professeur des universités, Université de Lille
Nicola Maffiuletti, Senior Researcher, Schulthess Clinic, Suisse

Directeur de thèse

Gaël Guilhem, Chercheur HDR, Institut National du Sport de l'Expertise et de la Performance

Membres invités

François Bieuzen, Chercheur, Institut National du Sport Québec, Canada
Bernard Montalvan, Médecin, Fédération Française de Tennis

Except where otherwise noted, this work is licensed under
https://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/fr/

A ma tante, **Patricia Beaudoin-Almanric**,

A mon grand-père, **Robert Poignard**,

Remerciements

L'ensemble des travaux de recherche présentés dans ce manuscrit ont été réalisés au Laboratoire Sport, Expertise et Performance EA 7370, de l'Institut National du Sport, de l'Expertise et de la Performance (INSEP) ainsi qu'au Centre National d'Entraînement de la Fédération Française de Tennis (FFT). La recherche scientifique est bel et bien un travail d'équipe et je tiens à remercier l'ensemble des personnes avec qui j'ai échangé, collaboré, et celles qui ont contribué à la réalisation de ces travaux. Je tiens également à remercier l'ensemble des personnes qui m'ont accompagnée et soutenue, de l'initiation jusqu'à l'aboutissement de cette thèse. Certaines d'entre elles pourront d'ailleurs témoigner de mon enthousiasme lorsque l'on m'a donné l'opportunité d'associer mon projet professionnel à ma passion pour le tennis.

En premier lieu, je remercie le **Dr. Olivier Girard** et le **Pr. Laurent Bosquet** d'avoir accepté d'évaluer ce travail. **Pr. Murielle Garcin**, **Pr. Edith Filaire**, **Dr. Nicola Maffiuletti,** merci d'avoir accepté d'examiner ce travail. Je suis honorée de votre participation à mon jury de thèse. Votre expertise et vos conseils avisés seront d'une aide précieuse. Je suis impatiente de pouvoir échanger à propos de ces travaux à l'occasion de la soutenance orale.

Je souhaite remercier **François Bieuzen** qui m'a donné l'opportunité d'effectuer mon stage de Master 2 sous sa direction. Ta vision de la recherche a été une source d'inspiration pour moi et m'a conforté dans mon souhait de poursuivre dans cette voie. A l'origine de ce travail, je tiens également à te remercier de m'avoir fait confiance puis de m'avoir encadré et encouragé tout au long de la réalisation de ce projet, et cela même à 5502 km de distance.

Je remercie chaleureusement **Gaël Guilhem** d'avoir accepté de diriger ces travaux de thèse en cours de route. C'est un honneur que de m'être immiscée en douce, parmi ton équipe de doctorants bioméca' de l'époque, malgré ma passion pour la physiologie. Evidemment, je tiens également à te remercier pour ton accompagnement, ta disponibilité et ton soutien. Tout au long de cette thèse, nos échanges ont toujours été enrichissants et tes conseils m'ont permis de progresser. Je suis certaine qu'ils seront également précieux pour mon avenir.

Je remercie également **Bernard Montalvan**, à l'initiative de ce projet au sein de la Fédération Française de Tennis. Je vous remercie de m'avoir immédiatement intégrée au sein du département médical du Centre National d'Entraînement. Votre confiance et nos nombreux échanges m'ont été très précieux. Par votre dévouement et votre passion pour votre métier, vous êtes un exemple pour moi.

Je remercie **Christophe Hausswirth** qui a initié ce projet de thèse avec la Fédération Française de Tennis.

Je tiens aussi à remercier **Marc Jubeau** pour son aide et son expertise, qui m'ont permis de m'initier rapidement aux méthodes d'enregistrement et d'analyse neurophysiologiques du muscle.

Je suis également reconnaissante envers la **Fédération Française de Tennis**, qui m'a donné l'opportunité d'effectuer ce projet. Je tiens à remercier chaleureusement **Etienne Barbiche**, **Christophe Ceccaldi**, **Anne Gires** et **Marie-Christine Calleja** pour leur accueil et leur bienveillance. Nos discussions ont été passionnantes et m'ont constamment permis de développer mon ouverture d'esprit et mon sens critique qui seront des qualités précieuses pour mon futur métier.

Un grand merci à l'ensemble des **entraîneurs de tennis** et **préparateurs physiques** ainsi qu'aux **joueuses** et **joueurs** du Centre National d'Entraînement. C'est un privilège d'avoir pu travailler à vos côtés tout au long de ces travaux de thèse. Merci de m'avoir intégré dans votre travail au quotidien. Cela m'a donné l'opportunité d'observer les problématiques du terrain qui sont au cœur de la recherche appliquée en Sciences du Sport.

Un grand merci à l'ensemble des **joueuses** et **joueurs** qui ont participé aux expérimentations. Merci pour votre temps, votre gentillesse et votre dévouement. **Erwan** et **Thibaut**, un grand merci d'avoir effectué votre stage à mes côtés. Votre aide et votre bonne humeur m'ont laissé de très bons souvenirs de ce long protocole expérimental.

Je remercie l'**ensemble des membres** du Laboratoire Sport, Expertise et Performance de l'INSEP pour tous les moments partagés et les bons souvenirs depuis mon stage de Master 2, qu'ils soient « scientifiques » ou « pas ». Merci à **Julie**, **Isa** et **Cathy** pour leur aide quotidienne administrative.

Allison, **Mathilde**, **Joffrey**, **Mildred**, **Chloé**, **Valentine**, **Adrien**, **Adèle**, **Benjamin**, **Jérôme** je vous remercie pour tous ces moments passés ensemble. Ceux-ci, nous serons tous d'accord, sont d'une aide précieuse pour apporter de la légèreté (en particulier, lors de nos petits-déjeuners…) dans notre quotidien de locataires du RDJ.

Mes amis INSEPIENS, **Camille, Julie**, **Rachel**, **Marina**, **Julia, Anis**, **Enzo**, **Robin**, **Antonio**, **Maël**, je ne compte plus les très bons souvenirs partagés, à l'INSEP et en dehors. Merci pour votre soutien ; cela a été sincèrement un bonheur que de pouvoir traverser tous ces moments de vie avec vous. **Simon**, tu as naturellement le droit à ta phrase privée ! Depuis que je suis redescendue de ma panique provoquée par l'énumération de tes nombreuses références bibliographiques en Sciences du Sport à la bibliothèque – après seulement deux jours de stage - tu as été d'un soutien inestimable jusqu'au clic final. Nos discussions scientifiques passionnantes pourraient paraître anodines comparé à l'amitié sans frontière que l'on a créée.

A mes **amis orléanais**, **marocains, parisiens**, et **au-delà**… Ces quelques lignes me permettent désormais de vous répondre fièrement à votre question « Elle en est où ta thèse ? ». Je vous remercie pour votre intérêt pour mon travail mais également pour tous les merveilleux moments passés qui m'ont permis de m'évader lors de ces dernières années. **Clémentine**, **Sophie**, **Pauline**, **Juliette**, merci pour votre soutien et votre amitié inconditionnelle.

Enfin, un merci du fond du cœur à l'**ensemble de ma famille** pour votre patience, votre soutien et votre intérêt pour mon travail. Je suis extrêmement touchée et fière que vous puissiez assister à l'aboutissement de celui-ci et impatiente de pouvoir partager ce moment avec vous.

CE TRAVAIL DE THESE A FAIT L'OBJET DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS SUIVANTES

Publications dans des revues scientifiques internationales à comité de lecture

Poignard M., Montalvan B., De Larochelambert Q., Guilhem G., Bieuzen F., Impact of recovery practices adopted by elite tennis players according to training type clusters, Front. Sports Act, 2020.**Sous presse.**

Poignard M., Guilhem G., Montalvan B., Bieuzen F., Cryotherapy as a recovery technique during consecutive days of simulated tennis matches: comparison of whole-body cryotherapy, cold water immersion and passive recovery, Med. Sci. Sports Exerc. **Soumis.**

Communications dans des congrès internationaux avec actes

Poignard M., Guilhem G., Montalvan B., Bieuzen F., Cryotherapy as a recovery technique during consecutive days of simulated tennis matches: comparison of whole-body cryotherapy, cold water immersion and passive recovery, 24th of the European Congress of Sport Science (ECSS), 2019, Prague.

Poignard M., Montalvan B., De Larochelambert Q., Guilhem G., Bieuzen F., Impact of recovery practices adopted by elite tennis players according to training type clusters, 25th of the European Congress of Sport Science (ECSS), 2020, Séville. **Soumis**

Communications dans des congrès nationaux avec actes

Poignard M., Montalvan B., Guilhem G., Bieuzen F., Optimization of the recovery process for elite tennis players, A la recherche de la performance, INSEP, 2020. Paris

Poignard M., Montalvan B., Guilhem G., Bieuzen F., Optimisation des stratégies de récupération chez le joueur de tennis de haut niveau, Atelier ReSCI « Sport et Innovation », CNOSF, 2019, Paris.

Poignard M., Montalvan B, Volet médical et scientifique de la récupération des sportifs professionnels, Winter School of Road Network, Fondation ARTHRITIS, 2019, Paris.

TRAVAUX REALISES EN DEHORS DU CADRE DE LA THESE

Publications dans des revues scientifiques internationales à comité de lecture

Broatch, J. R., **Poignard, M**., Hausswirth, C., Bishop, D. J., & Bieuzen, F. (2019). Whole-body cryotherapy does not augment adaptations to high-intensity interval training. *Scientific Reports, 2019*

Communications dans des congrès internationaux avec actes

Poignard, M., Broatch, J. R., Hausswirth, C., Bishop, D. J., & Bieuzen, F. The effects of whole-body cryotherapy on adaptations to high-intensity interval training 23rd of the European Congress of Sport Science (ECSS), 2018, Dublin.

Communications dans des congrès nationaux avec actes

Poignard M, Borne R, Utilisation du froid dans la récupération, 1er Colloque National des Préparateurs Physiques, 2016, Paris.

Articles de vulgarisation scientifique

Poignard M, La cryothérapie corps entier : son utilisation chronique permet-elle de booster les adaptations après un entraînement intermittent à haute intensité ? Réflexions Sport, INSEP, 2019, pp.74-75. https://fr.calameo.com/read/003232740f618232ea9ab

Table des matières

Table des matières 5
Introduction 1
Equilibre charge, fatigue et performance 6
1. L'équilibre charge, fatigue, performance 7
2. Charge de travail 13
3. Fatigue, état de forme 14
1. Définition de la fatigue générale 14
2. Origines de la fatigue 15
4. Récupération 27
1. Définition et principe 27
2. Mécanismes d'action des techniques de récupération 29
5. Quantification de la charge, de la fatigue et de la récupération 38
1. Charge de travail 38
2. Fatigue et récupération 43
Charge spécifique en tennis de haut-niveau 50
1. Profil de l'activité du joueur de tennis 51
2. Caractéristiques d'une saison professionnelle : planification de l'entraînement et des périodes de compétition 54
3. Charges de travail associées aux périodes de compétition 59
1. Charge externe 59
1. Charge interne 64
4. Périodes d'entraînement 71
1. Fréquence et durée des différents types d'entraînements 71
1. Demande psychophysiologique des entraînements de tennis 71
Fatigue induite par le tennis élite 77
1. Fatigue d'origine métabolique 79
1. Système phosphagène et glycolytique 79
2. Système oxydatif 80
2. Fatigue d'origine neuromusculaire 81
1. Origine centrale 82
2. Origine périphérique 85
3. Fatigue d'origine mécanique 87
4. Fatigue perceptive 89
5. Fatigue induite par l'entraînement 90
Efficacité des stratégies de récupération dans le tennis de haut niveau 95

1. Habitudes de récupération des athlètes, joueurs de tennis élite 96
2. Techniques de récupération par le froid 97
1. Immersion en eau froide (CWI) 99
2. Cryothérapie corps entier 112
3. Comparaison de l'immersion en eau froide et de la cryothérapie corps entier 117
4. Intérêt des techniques de récupération pour diminuer la fatigue subjective 119
1. Efficacité des techniques de récupération pour améliorer les perceptions 120
2. Comparaison des techniques de récupération sur les variables subjectives 125
Objectifs expérimentaux 128
Méthodes expérimentales 133
1. Design des études & Participants 134
2. Exercices inducteurs de fatigue spécifique au tennis élite 136
1. Entraînements lors d'une période foncière ou pré-compétitive d'un joueur de tennis élite (étude 1) 136
2. Séquences de tennis simulant la fatigue spécifique rencontrée en condition de compétition réelle (étude 2) 137
3. Outils d'aide à la récolte des données 140
1. Application « Suivi de la récupération » 140
2. Court technologique (Playsight®) 141
4. Quantification des performances 143
1. Fonctionnelle 143
2. Spécifique tennis 143
5. Quantification de l'état de fatigue et de la récupération 144
1. Paramètres neuromusculaires 144
2. Paramètres biologiques 147
3. Paramètres perceptifs 148
6. Modalités de récupération 149
1. Cryothérapie corps entier 149
2. Immersion en eau froide 150
3. Récupération passive 151
4. Techniques de récupération disponibles au Centre National d'Entraînement 151
Etude 1 152
Etude 2 176
Discussion Générale 208
1. Variations interindividuelles de la charge, de la fatigue et de l'effet des techniques de récupération 210
2. Enjeux méthodologiques associés à la caractérisation et à la simulation d'un match de tennis 216

3. Mécanismes impliqués dans le développement de la fatigue au tennis 220
4. Habitudes de récupération du joueur de tennis de haut-niveau 223
5. Effets de la cryothérapie corps entier et de l'immersion en eau froide 225
1. Diminution des sensations de douleurs musculaires 225
2. Mécanismes impliqués dans la diminution des douleurs musculaires 226
6. Applications pratiques dans le contexte spécifique du tennis de haut niveau 231
Références 235
Annexes 259

Introduction

Tout au long de sa carrière, guidé par ses objectifs de performance à l'entraînement et lors des compétitions, le sportif de haut-niveau se soumet à des entraînements intenses et à un rythme de vie particulièrement soutenu. Au tennis, l'organisation du circuit professionnel est très dense et propose 63 tournois à travers 31 pays différents chaque année : ainsi, un joueur de tennis classé parmi les 100 premiers mondiaux, participe en moyenne à 24 tournois lors d'une saison. Ce rythme effréné, associé au circuit professionnel, contraint le joueur à tolérer un stress important, dès le plus jeune âge (circuit junior), ce qui induit inévitablement des états de fatigue d'origine multifactorielle. Une planification appropriée entre les périodes d'entraînement et de compétition et les périodes de récupération est alors incontournable en vue d'optimiser les performances aux moments clefs de la saison (Mujika et al. 2018; Bompa and Haff 2009).

Développés spécifiquement pour le sport de haut-niveau, des modèles théoriques permettent aujourd'hui d'appréhender objectivement la relation étroite entre le stress, défini par le terme « charge d'entraînement », la fatigue qu'il engendre et la performance (Bannister 1991; Impellizzeri et al. 2004). La charge d'entraînement dépend de nombreux facteurs, liés (mode, durée, intensité de l'exercice) ou non à l'entraînement (caractéristiques anthropométriques, état psychologique de l'athlète, environnement) (Kentta and Hassmen 1998; Impellizzeri et al. 2004). La fatigue consécutive est alors d'origine multifactorielle et correspond à l'altération des différents systèmes psychophysiologiques mis en jeu lors de l'entraînement. Au sein de ce modèle établi, la période de récupération représentant le temps nécessaire aux différents systèmes pour retrouver leur état initial (Hausswirth 2013) doit particulièrement être prise en considération. En effet, l'analyse de cette période est primordiale puisqu'il s'agit d'évaluer, à l'échelle de l'athlète, sa bonne condition physique, physiologique et psychologique afin de limiter les états de fatigue sévère, de surmenage, de blessures ou de développement d'une pathologie (Meeusen et al. 2013).

La récupération et la fatigue peuvent donc être considérés comme un continuum (Kellmann et al. 2018) complexe qui est affecté de manière différente en fonction du contexte. La nature de l'exercice effectué (modalité, durée, intensité), les rythmes

circadiens, les habitudes nutritionnelles, le statut hydrique des athlètes (Saw et al. 2016), la qualité et la quantité de sommeil sont autant de facteurs qui peuvent potentiellement influencer les réponses individuelles à l'exercice. Mais contrairement à d'autres disciplines (Tavares et al. 2019), **l'étude de la fatigue et/ou de la récupération en réponse aux différents stress induits par la pratique du tennis de haut niveau ne sont pas encore bien connus**. Des mesures objectives telles que la fréquence cardiaque, la concentration en lactates témoignant de l'intensité de l'exercice, sont parfois incompatibles avec les contraintes associées à la pratique du tennis au niveau professionnel. Le joueur de tennis est itinérant avec des périodes de compétition de durée incertaine, incluant une forte variabilité des temps de jeux et du nombre de matchs joués. Ce contexte influence logiquement le temps disponible pour effectuer des séances d'entraînement. Dans ce cadre, l'utilisation de paramètres simples à mesurer sur le plan technique dits perceptifs, subjectifs ou déclaratifs selon les domaines scientifiques paraît plus adaptée (Heidari et al. 2018). Parmi ces indices, la mesure de la perception de l'effort (RPE), est une méthode dont l'applicabilité a été approuvée dans le contexte de la pratique du tennis (Gomes et al. 2015) et très utilisée dans le sport de haut-niveau (Haddad et al. 2017). Ainsi, quelle que soit la nature de la charge, cet indice mesure de manière simple et fidèle la réponse psychophysiologique induite par la charge résultant d'un entraînement ou d'une compétition. Ces réponses peuvent également être analysées grâce à des questionnaires évaluant les perceptions de douleurs musculaires, de la fatigue, du stress ou de la qualité de sommeil des athlètes. Parmi ceux-ci le questionnaire de Hooper (Hooper et al. 1995) a pour but de détecter les premiers signes de surmenage chez les athlètes et est très couramment utilisé dans le monde du haut niveau. **Il paraît donc nécessaire d'analyser la fatigue et la récupération spécifique à la pratique du tennis de haut-niveau** au travers de ces mesures dont la pertinence a été récemment démontrée (Saw et al. 2016).

Afin de limiter les effets délétères de la fatigue et la chute de performance qu'elle engendre, les joueurs professionnels ont à leur disposition une large gamme de techniques (Fleming et al. 2018). Il est désormais très courant de voir les meilleurs joueurs du monde adopter certaines techniques comme la cryothérapie corps entier ou

l'immersion en eau froide. Cette dernière serait particulièrement bénéfique pour atténuer les douleurs musculaires et limiter la chute des performances après des exercices intermittents, sur des fenêtres temporelles allant de 6h à quelques jours (Ihsan et al. 2016; Halson 2011). **Les techniques de récupération par le froid semblent donc être appropriées au contexte du tennis mais les données scientifiques sont rares et n'ont, à ce jour, pas fait la preuve de leur intérêt dans un contexte écologique de pratique**. Les données comparatives visant à évaluer l'efficacité des techniques de récupération pour limiter la fatigue induite par l'exercice sont souvent contradictoires, en particulier les résultats concernant les techniques de récupération par le froid (Tavares et al. 2019) (Fyfe et al. 2019). Ces disparités peuvent s'expliquer par l'hétérogénéité importante des protocoles utilisés, de la diversité des technologies utilisées ou des populations étudiées. A l'instar de l'entraînement qui doit répondre aux contraintes spécifiques de la discipline, l'efficacité des techniques de récupération sera aussi fonction de l'amplitude et de la nature de la fatigue induite par l'exercice considéré. Ainsi, la discipline sportive, le type de contraction musculaire impliquée dans la tâche, la durée et l'intensité de l'exercice et le statut des athlètes représentent des facteurs importants à considérer lors de l'interprétation des résultats issus des études scientifiques (Higgins et al. 2017). La plupart de ces études ont été réalisées dans un environnement contrôlé en laboratoire, en conditions de pratique simulée ou auprès de joueurs de niveau régional (Kellmann and Beckmann 2003), ce qui rend parfois délicat le transfert de ces connaissances aux conditions réelles de pratique du tennis de haut niveau.

L'objectif principal de ces travaux de thèse a été d'évaluer l'efficacité des techniques de récupération par le froid au regard de la charge spécifique induite par le tennis de haut-niveau. Avec une volonté permanente de se rapprocher du contexte élite, ces travaux de thèse se sont plus spécifiquement attachés à :

1/ Mieux comprendre et appréhender la fatigue subjective induite par les charges d'entraînements imposées par la pratique du tennis de haut niveau lors de périodes d'entraînement intenses,

2/ Observer les stratégies réelles de récupération adoptées par les joueurs afin d'en évaluer leur efficacité sur la fatigue subjective,

3/ Évaluer la fatigue accumulée par l'enchaînement quotidien de matchs de tennis simulés, en comparant simultanément des paramètres physiologiques, neuromusculaires, perceptifs, fonctionnels et spécifiques au tennis,

4/ Comparer spécifiquement l'efficacité des techniques de récupération par le froid, majoritairement utilisées par les joueurs de tennis, sur la fatigue accumulée, se rapprochant le plus de celles induites lors de compétitions professionnelles.

Equilibre charge, fatigue et performance

1. L'équilibre charge, fatigue, performance

L'objectif principal de l'encadrement technique d'un sportif est de proposer et planifier les périodes et séances d'entraînement, les périodes de compétition et les périodes de repos dans le but d'augmenter la performance via notamment le développement le plus efficacement possible des qualités physiques, physiologiques, techniques, psychologiques tout en préservant la santé du sportif (Bompa and Haff 2009). Si les aspects nutritionnels et psychologiques sont de plus en plus intégrés, la récupération gagne également en considération. Cependant récupérer à tout prix et à l'aide de n'importe quel moyen pourrait s'avérer inefficace voire contre-productif. Aussi, avant de sélectionner, d'inclure et d'évaluer l'influence de la récupération, une fine compréhension des processus fondamentaux associés à l'entraînement et/ou aux exigences de performance propre à chaque discipline est nécessaire. Ainsi, le but de ce chapitre est de rappeler les notions de charge, fatigue et de performance et leurs mécanismes dans le contexte de l'entraînement.

Un entraînement consiste à appliquer un stress physiologique et/ou psychologique à l'athlète de sorte à modifier l'équilibre (i.e. homéostasie) entre les différents systèmes physiologiques et cognitifs de l'organisme. L'homéostasie de l'organisme sur le plan physiologique peut ainsi être envisagée d'un point de vue métabolique, neuromusculaire, cardiovasculaire ou hormonal. Ces différents systèmes répondent à cette perturbation de l'homéostasie, communément désignée sous le terme de "stress" en développant des adaptations (i.e. changements morphologiques et fonctionnelles à l'échelle cellulaire, de l'organe et de son système physiologique associé). Ces adaptations incluent notamment l'augmentation du volume musculaire, la modification de la composition du muscle en protéine contractile ou encore l'augmentation de la densité mitochondriale. Ces transformations physiologiques permettent à l'organisme "d'adapter" ses capacités physiologiques, afin de pouvoir faire face à ce stress, induisant, à terme, une amélioration des aptitudes physiques. L'objectif de l'entraînement consiste à ce que ces progrès physiques se traduisent par une augmentation des performances du sportif (Borresen and Lambert 2008) (Viru and Viru 2000).

Plusieurs modèles ont proposé de décrire ces processus adaptatifs liés à l'entraînement. Le *syndrome d'adaptation général* proposé en 1956 par Selye dans *The Stress of Life*, décrit une théorie générale permettant d'appréhender les processus adaptatifs chez l'humain en réponse à différents stress (Selye 1984). Ce modèle a ensuite été repris dans le cadre de l'entraînement (Bompa and Haff 2009) (Meeusen et al. 2013) : le stress lié à l'entraînement provoque dans un premier temps un « état d'alerte » impactant de manière négative l'organisme en diminuant son état homéostasique de base et donc ses performances (Zone grise, Figure 1).

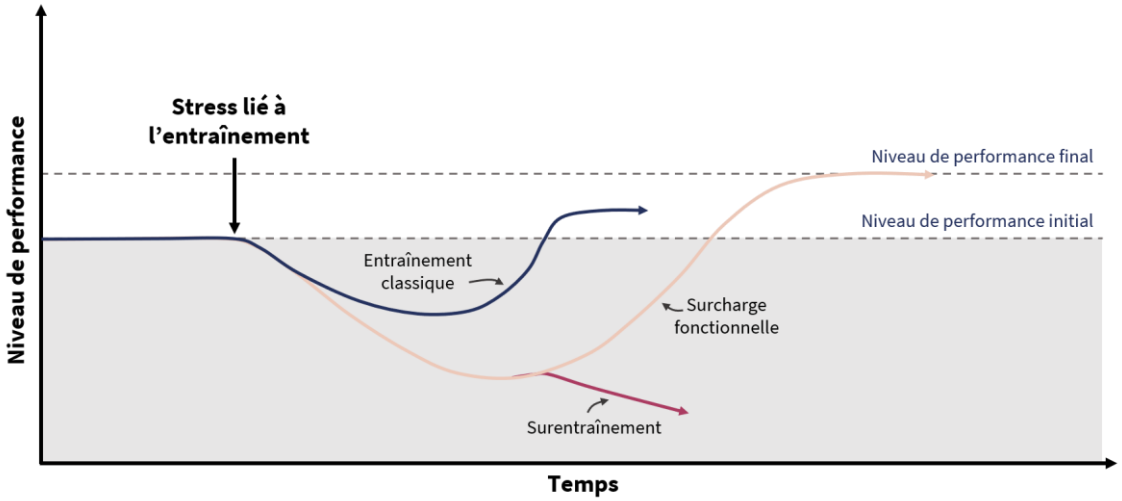


Figure 1. Illustration du Modèle d'adaptation général de Selye. Adapté à partir de (Bompa and Haff 2009) et de A.C. Fry, 1998, The role of training intensity in resistance exercise overtraining and overreaching. In Overtraining in sport, edited by R.B. Kreider, A.C. Fry, and M.L. O'Toole (Champaign, IL: Human Kinetics), 114

La fin de cet état d'alerte intervient lorsqu'une période de temps adéquate a été accordée à l'organisme pour revenir à son équilibre homéostasique initial. Dans une seconde phase appelée « état de résistance », l'organisme met en place des adaptations physiologiques, de sorte à tolérer, à l'avenir, un stress similaire, introduisant la notion de *surcompensation* (Zone Blanche, Figure 1). La *surcompensation* est le résultat du travail effectué lors de l'entraînement et des processus adaptatifs mis en place par l'organisme. Lorsque le concept est appréhendé correctement, celui-ci est très intéressant dans le cadre de l'entraînement : lors de cette phase, l'organisme étant capable d'absorber/de faire face à un stress similaire au précédent sans dégradation prolongée de ses performances. Il est alors opportun d'augmenter l'intensité du stress

de sorte à améliorer progressivement les aptitudes physiques d'un athlète et *in fine* d'améliorer ses performances (Bompa and Haff 2009). Toutefois, un stress supérieur à la capacité adaptative de l'organisme provoque en revanche un état de fatigue dont la durée dépendra de l'amplitude du déséquilibre. Il est à noter qu'une limite importante est associée à ce modèle : quel que soit le stress de l'exercice, celui-ci induit une réponse physiologique identique avec une intensité proportionnelle à celle du stress imposé. (Chiu and Barnes 2003).

En 1975, les travaux de Bannister (1991) ont proposé le modèle *Fitness-fatigue,* plus développé et représentatif des réponses à l'entraînement (Bannister 1991). Celui-ci propose que les réponses physiologiques de l'organisme soient directement dépendantes du type d'entraînement effectué.

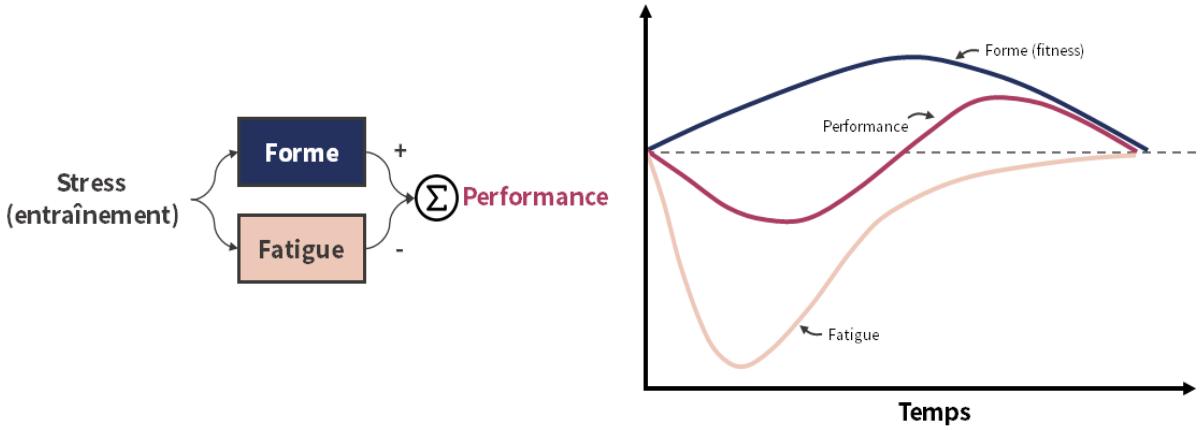


Figure 2. Illustration du modèle de Bannister (Bannister 1991), simplifié par (Morton 1997)

Dans ce modèle, l'impact du stress de l'entraînement est dissocié en une réponse négative (altération des capacités d'un système physiologique : *fatigue*), et positive (amélioration de la capacité fonctionnelle de ce même système : *fitness*). Les capacités de performance du sportif correspondent alors au différentiel entre la réponse positive et la réponse négative induite par l'entraînement (Figure 2). Suite à un exercice, Bannister propose que l'état de fatigue est important mais de courte durée (jusqu'à 15 jours) quand l'effet positif sur les capacités physiologiques (jusqu'à 45 jours) sera moins important mais durera plus longtemps : les capacités de performance sont dans un premier temps diminuées et augmentent progressivement au-delà de leurs valeurs initiales à plus long terme (Bannister 1991) (Morton et al. 1990). À partir des précédents

modèles, l'équipe de Chiu and Barnes (2003) propose que l'exercice stimule plusieurs systèmes physiologiques. La somme de ces réponses positives correspond à l'état de forme. De la même manière, plusieurs systèmes physiologiques sont affectés négativement par l'exercice : la somme de ces réponses négatives induit l'état de fatigue de l'athlète (Chiu and Barnes 2003).

En s'appuyant sur les modèles précédemment proposés, nous considérons un modèle hybride et simplifié dans le cadre de ce manuscrit. Ainsi, nous décrirons les principes fondamentaux de l'entraînement pour ensuite appréhender simplement les méthodes de quantification de la charge associée aux procédés d'entraînement. Nous considérons l'analyse de la performance à travers un indice de **disposition à la performance** correspondant au différentiel entre l'état de fatigue de l'athlète et ses capacités physiologiques (état de forme). Une fatigue supérieure aux capacités physiologiques provoquera une diminution des performances et inversement, faisant alors varier la courbe de la **disposition à la performance**.

À l'instar du modèle de Bannister (Bannister 1991), le cycle de charge-fatigue peut être considéré ainsi (Figure 3) :

1) La nature, la durée et l'intensité du **stress de l'entraînement** affectent des systèmes physiologiques différents,
2) Par conséquent, la **perturbation des systèmes physiologiques** diminue une ou plusieurs capacités physiologiques de l'athlète, affaiblissant transitoirement l'**état de forme** de l'athlète,
3) De manière concomitante, l'**état de fatigue** de l'athlète augmentera, également transitoirement, suite à la déstabilisation de ses systèmes physiologiques,
4) Le retour de la **disposition à la performance** à sa valeur initiale sera alors dépendant de l'évolution de l'état de forme et de l'état de fatigue,
5) Dès la fin de l'exercice se mettent en place les processus adaptatifs spécifiques. Ces adaptations sont bénéfiques à l'état de forme de l'athlète : ceci lui permettant de tolérer un stress similaire, sans perturber l'équilibre homéostasique de l'organisme. La disposition à la performance de l'athlète sera

supérieure et celui-ci pourra subir un stress plus important (surcompensation), de manière à provoquer de nouvelles adaptations qui seront à l'origine de l'augmentation progressive de ses capacités de performances.

Pour un rééditer un exercice équivalent au précédent, en termes d'intensité et de durée, la période de temps nécessaire à l'organisme pour retourner à ses valeurs homéostasiques de repos doit être suffisamment longue. Ce retour à l'équilibre définit ainsi **la récupération.** Sa durée correspond à la **période de récupération**. Ces deux notions sont présentées et détaillées ultérieurement dans ce manuscrit. Un équilibre est nécessaire entre le stress induit par l'entraînement et la période de récupération. En effet, la répétition d'entraînements sans période de récupération suffisante peut influencer de manière négative les réponses à l'entraînement conduisant alors à des épisodes de surmenage, voire de blessures (Meeusen et al. 2013). Ce type d'épisodes peut survenir également si les stress liés à l'entraînement sont augmentés de manière trop importante ou trop rapide, si le retour de blessure de l'athlète est trop précoce ou encore s'il enchaîne trop de périodes de compétition (Lambert and Borresen 2016).

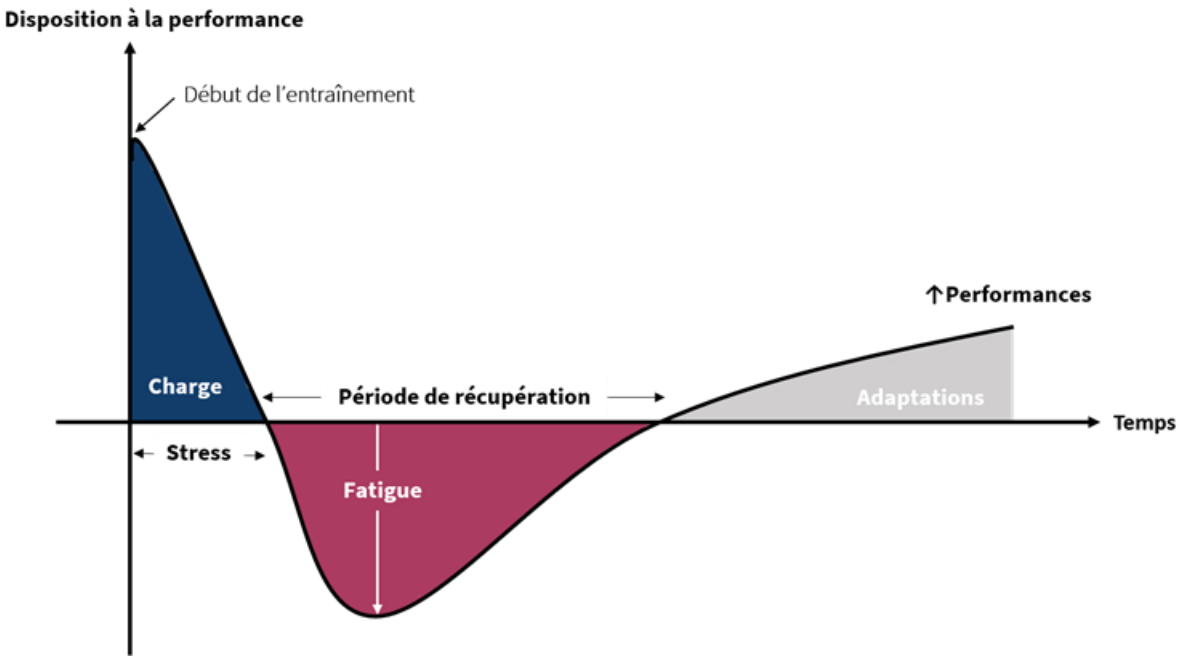


Figure 3. Illustration d'un modèle simplifié charge, fatigue, performances

Le type, la durée et l'intensité des entraînements doivent être manipulés de manière appropriée tout au long de la saison pour maximiser les performances et les faire

coïncider avec les périodes de compétition (Lambert and Borresen 2016). La planification systématique de l'ensemble de ces paramètres, associée à la mise en place de périodes de récupération correspond au concept de planification (Plisk and Stone 2003).

Enfin, la tolérance au stress induit par l'entraînement est très différente entre les athlètes pour lesquelles les capacités physiologiques, physiques et les performances varient au cours d'une carrière (Hausswirth 2013). Il devient dès lors utile de pouvoir analyser fréquemment la réaction de l'athlète vis-à-vis des stress qui lui sont imposés afin d'évaluer si le plan initial est efficace, et d'ajuster les entraînements, périodes de compétition et de repos. Il y a encore quelques années, ces ajustements étaient fonction d'observations de terrain, propres à chaque entraîneur, dont les fondements étaient principalement empiriques et basés sur leur expérience passée et personnelle (Halson 2014). Les entraîneurs ou l'équipe d'experts de haut-niveau utilisent depuis peu une approche plus scientifique pour les assister dans l'élaboration des programmes d'entraînements et la quantification des réponses de l'athlète (Bourdon et al. 2017) (Collette et al. 2018) (Thorpe et al. 2015). Cela passe notamment par une évaluation régulière :

- Du stress de l'entraînement ou de la compétition imposé à l'athlète que l'on appelle **charge de travail**,
- De l'impact de cette charge de travail sur l'évolution de l'état **de forme et de fatigue de l'athlète,**
- Des **adaptations** de l'organisme provoquées par cette charge de travail,

L'évolution de ces paramètres influence directement la **capacité de performance** de l'athlète, paramètre clef qu'il est essentiel également de mesurer.

Pour améliorer les performances de l'athlète, toute stratégie permettant de limiter son état de fatigue ou d'accélérer la récupération de son état de forme sera intéressante (Barnett 2006). Dans ce cadre, la récupération doit être planifiée comme une composante à part entière de l'entraînement.

2. Charge de travail

Les adaptations induites par l'entraînement sont le résultat d'interactions psychophysiologiques complexes (Coutts et al. 2018). L'utilisation d'outils permettant de mesurer à la fois le stress induit par l'entraînement et la réponse de l'athlète est dès lors incontournable. Dans le cadre de son modèle de quantification des réponses à l'entraînement, l'équipe d'Impellizzeri définit alors l'ensemble des stress sous le terme de charge d'entraînement.

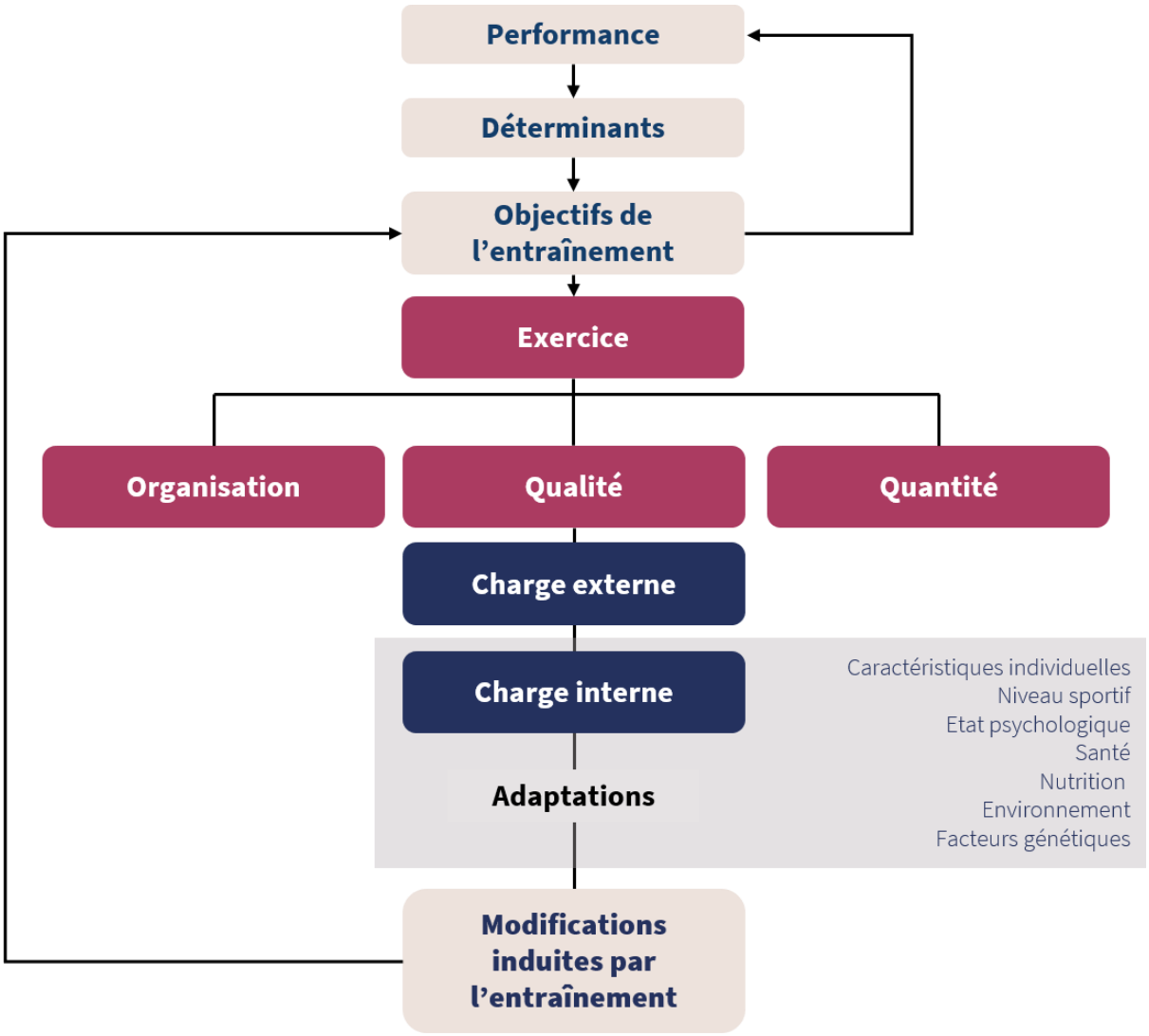


Figure 4. Structure théorique du processus d'entraînement, Modèle d'Impellizzeri (Impellizzeri et al. 2019)

Cette variable a été appréciée pour inclure l'ensemble des facteurs liés à l'entraînement ainsi que les facteurs extérieurs à celui-ci (stress environnementaux). Le modèle définit la charge d'entraînement comme la « variable d'entrée » manipulée traditionnellement

à l'entraînement pour induire la réponse psychophysiologique et les adaptations souhaitées. (Coutts et al. 2018) (Impellizzeri et al. 2004). Le plan d'entraînement (organisation, qualité, quantité) correspond à la **charge externe** équivalente à l'exercice physique prescrit induisant une réponse psychophysiologique spécifique, définit sous le terme de **charge interne**. Celle-ci intègre alors l'ensemble des réponses psychophysiologique mis en place par l'athlète pour tolérer la charge externe qui lui est imposée lors de l'exercice (Impellizzeri et al. 2019) (Kellmann et al. 2018). Cette variable est d'autant plus importante dans les sports de duels, pour lesquels la charge externe ne dépend pas uniquement de l'exercice prescrit par l'entraîneur mais aussi de l'adversaire, notamment lors d'un match (Murphy 2015). Pour une même charge externe, la charge interne correspondante est variable entre les athlètes, ce qui induit également des réponses adaptatives distinctes. En effet, celle-ci dépend de nombreux facteurs qui sont propres à chaque athlète (i.e. caractéristiques individuelles). De la même manière, les caractéristiques d'un athlète peuvent évoluer et donc faire varier la charge interne pour une même charge externe. D'autres facteurs extérieurs sont également sources de variabilité comme les conditions environnementales dans lesquelles l'exercice est effectué (Impellizzeri et al. 2019).

3. Fatigue, état de forme

Dans le cadre de cette thèse, nous ne ferons pas de distinction entre la fatigue et l'état de forme (Figure 5) puisque, selon les modèles présentés, le niveau d'état de forme est dépendant de l'état de fatigue. La mesure de la fatigue sera alors un indice indirect de l'état de forme. De plus, nous nous attarderons plus spécifiquement à la fatigue relative aux effets psychophysiologiques suggérés etdes techniques de récupération discutées dans ce manuscrit.

1. Définition de la fatigue générale

Coutts et al. (Kellmann et al. 2018) définissent la fatigue comme un « état psychobiologique » associé à une incapacité à accomplir une tâche physique qui était

réalisable précédemment. Cet état est habituellement associé à une perception de l'effort modifiée allant de l'état de fatigue jusqu'à l'épuisement/surmenage » (Kellmann et al. 2018). Cette récente définition témoigne bien de l'origine multifactorielle de la fatigue. Historiquement, la fatigue fonctionnelle induite par l'exercice est décrite comme une « incapacité à maintenir une force donnée ou attendue » (Edwards 1981) ou une « diminution de la capacité à générer de la force » attribuée à une altération des propriétés musculaires contractiles (i.e. fatigue périphérique), à une défaillance de la commande nerveuse au niveau spinal (i.e. fatigue d'origine centrale de type spinale), ou une atteinte de la commande nerveuse provenant des aires corticales du cerveau (i.e. fatigue d'origine centrale de type supraspinale) (Gandevia 2001). Si ces dernières définitions peuvent être propres à des études neurophysiologiques, d'autres auteurs ont démontré que l'incapacité transitoire à produire de la force provient également d'une accumulation de sous-produits métaboliques au sein du muscle ou d'une diminution des réserves énergétiques pourvoyeuses d'adénosine triphosphate (ATP) (Bangsbo et al. 2006) (Sahlin 1992). Aussi, la déshydratation et/ou l'hyperthermie associée à l'exercice, peut influencer le système cardiovasculaire et altérer la production de force au niveau du muscle (Edwards and Noakes 2009; Nybo 2008). Alors que d'un point de vue physiologique, l'ensemble des organes sont potentiellement impliqués dans la fatigue induite par l'exercice, celle-ci peut également être appréhendée sous une entité psychologique représentant une variable subjective ou mentale (Ament and Verkerke 2009). Ainsi pendant un exercice, alors que la commande neuromusculaire n'est pas altérée, la sensation de l'effort peut augmenter progressivement (Enoka and Stuart 1992).

2. Origines de la fatigue

i. Composante neuromusculaire d'origine centrale

La force musculaire est produite grâce à un ensemble de structures générant la propagation d'ordres moteurs initiés dans les aires cérébrales du cerveau. L'ensemble des structures impliquées dans la transmission du message nerveux du cerveau jusqu'à

l'appareil contractile du muscle désigne le système neuromusculaire. Celui-ci est divisé en une composante centrale et une composante périphérique. La composante centrale inclut les structures situées en amont de la jonction neuromusculaire : le cerveau, le tronc cérébral et la moelle épinière. La fatigue neuromusculaire d'origine centrale correspond classiquement à une altération de l'activation volontaire du muscle impliquant les structures participant à la transmission de la commande motrice nerveuse, depuis les aires cérébrales du cerveau jusqu'à la jonction neuromusculaire. Plus précisément, Gandevia (Gandevia 2001) distingue l'étage spinal (moelle épinière) de l'étage supra-spinal (ensemble des structures en amont de la moelle épinière : centres moteurs supérieurs : cerveau, tronc cérébral).

- **Etage supraspinal**

Dans le cerveau, le cortex moteur déclenche l'ordre moteur puis l'influx nerveux qui, via les cornes ventrales de la moelle épinière, stimulent les motoneurones alpha du ou des muscles qu'ils innervent. L'ensemble constitué du motoneurone alpha et des fibres musculaires qu'il innerve désigne l'unité motrice. La fatigue centrale d'origine supra spinale correspond à un défaut de la commande nerveuse à destination des motoneurones, associé ou non à une diminution du recrutement des unités motrices (Newham et al. 1983) (Gandevia 2001). À ce niveau l'altération de la commande centrale peut provenir de (Figure 6) :

- L'accumulation de neurotransmetteurs ou de substances chimiques (sérotonine, dopamine, acétylcholine, tryptophane) qui perturbent l'équilibre homéostasique au niveau du cerveau (Meeusen and Roelands 2010; Davis et al. 2007),
- De réponses thermodynamiques cérébrales (Nybo and Nielsen 2001),
- De la disponibilité en substrat énergétique (Nybo and Nielsen 2001),
- De modification de la perfusion sanguine cérébrale,
- De facteurs psychologiques : motivation, investissement à la tâche (Enoka and Stuart 1992).

- **Spinale (moelle épinière)**

La moelle épinière reçoit l'influx nerveux en provenance de la commande centrale : commande descendante. Elle est également régulée par une commande dite ascendante puisqu'elle reçoit, au sein des cornes dorsales, les influx nerveux sensitifs provenant des muscles. Celles-ci correspondent aux afférences musculaires qui permettent, lors de l'exercice, de réguler en permanence la contraction musculaire en modifiant l'excitabilité du pool de motoneurones α, provenant de voies inhibitrices ou excitatrices. Ce sont ces afférences qui peuvent être stimulées par les sous-produits métaboliques de l'exercice (Figure 6). Les études qui ont analysé la fatigue d'origine spinale ont rapporté principalement des modifications provenant des (Figure 6) :

- Afférences musculaires III et IV inhibitrices du pool de motoneurones α associées à la diminution de l'activation centrale (Gandevia 2001; Duchateau and Enoka 2011)
- Afférences sensibles aux changements métaboliques et mécaniques, régulant la fonction du muscle en modifiant l'excitabilité du pool de motoneurones α (e.g. inhibition pré-synaptique)(Garland 1991)

La fatigue d'origine centrale est due à une diminution de l'excitabilité des motoneurones α et/ou à une commande nerveuse sous-maximale. Enfin, la sévérité de la fatigue centrale dépend du régime de contraction des muscles sollicités, de la durée et de l'intensité de l'exercice (Enoka and Stuart 1992; Millet and Lepers 2004). La nature de l'activité tennis (Chapitre 3) mixte suggère que l'ensemble des régimes de contraction sont sollicités, stimulant donc la plupart de ces composantes, de la fatigue. Il apparaît dès lors intéressant de décrire la contribution de ces différentes composantes pour mieux les prendre en charge dans les procédés de récupération proposés.

ii. Composante neuromusculaire d'origine périphérique

En provenance du cortex moteur, l'influx nerveux se propage dans les axones de la moelle épinière, sous forme de potentiel d'action (PA) et termine sa course au niveau des motoneurones. Le PA se propage ensuite dans l'axone du motoneurone qui, à

l'approche du muscle, se divise en plusieurs branches terminales établissant chacune une jonction neuromusculaire avec la fibre musculaire qu'elles innervent (système nerveux central). Ainsi la composante périphérique du système nerveux correspond aux structures impliquées dans la transmission de ce PA, de la jonction neuromusculaire jusqu'à la composante contractile. Au niveau de la jonction neuromusculaire, le PA provenant de l'axone du motoneurone (terminaison axonale) provoque la libération d'acétylcholine dans la fente synaptique qui se fixe par la suite sur les récepteurs nicotiniques situés sur la plaque motrice de la fibre musculaire. La fixation de l'acétylcholine provoque la dépolarisation (via l'activation des pompes Na/K ATPase) de la plaque motrice et génère alors un nouveau PA qui se propage ensuite de proche en proche à travers le sarcolemme jusqu'aux tubules transverses. L'arrivée du PA au niveau des tubules transverses provoque une modification de la perméabilité membranaire du réticulum sarcoplasmique déclenchant ainsi la libération du Ca^{++} dans le cytosol : le Ca^{++} se fixe ensuite sur la troponine permettant la fixation des têtes de myosine sur les filaments d'actine au niveau du sarcomère. En présence d'ATP, les têtes de myosine glissent sur les filaments d'actine de manière synchrone permettant ainsi la contraction musculaire. L'ensemble des processus impliqués entre la libération de l'acétylcholine jusqu'à la contraction musculaire correspond au couplage excitation-contraction.

Ainsi on définit une fatigue neuromusculaire d'origine périphérique lorsque la contractilité des fibres musculaires est altérée en raison de la modification des processus biochimiques impliqués dans le couplage excitation-contraction. Les différentes études effectuées sur les origines rapportent (Allen et al. 2008) (Fitts 1994)(Figure Altérations) :

- Altération au niveau de la transmission du PA sur la membrane musculaire (A)
- Altération de la transmission du PA au niveau des tubules transverses(B),
- Altération de la libération du Ca^{++} par le réticulum sarcoplasmique (C),
- Altération de la liaison du Ca^{++} sur la troponine (D),

- Relargage ou recaptation du Ca^{++} par le réticulum sarcoplasmique (E), (Voir Allen 2008 pour une revue détaillée)

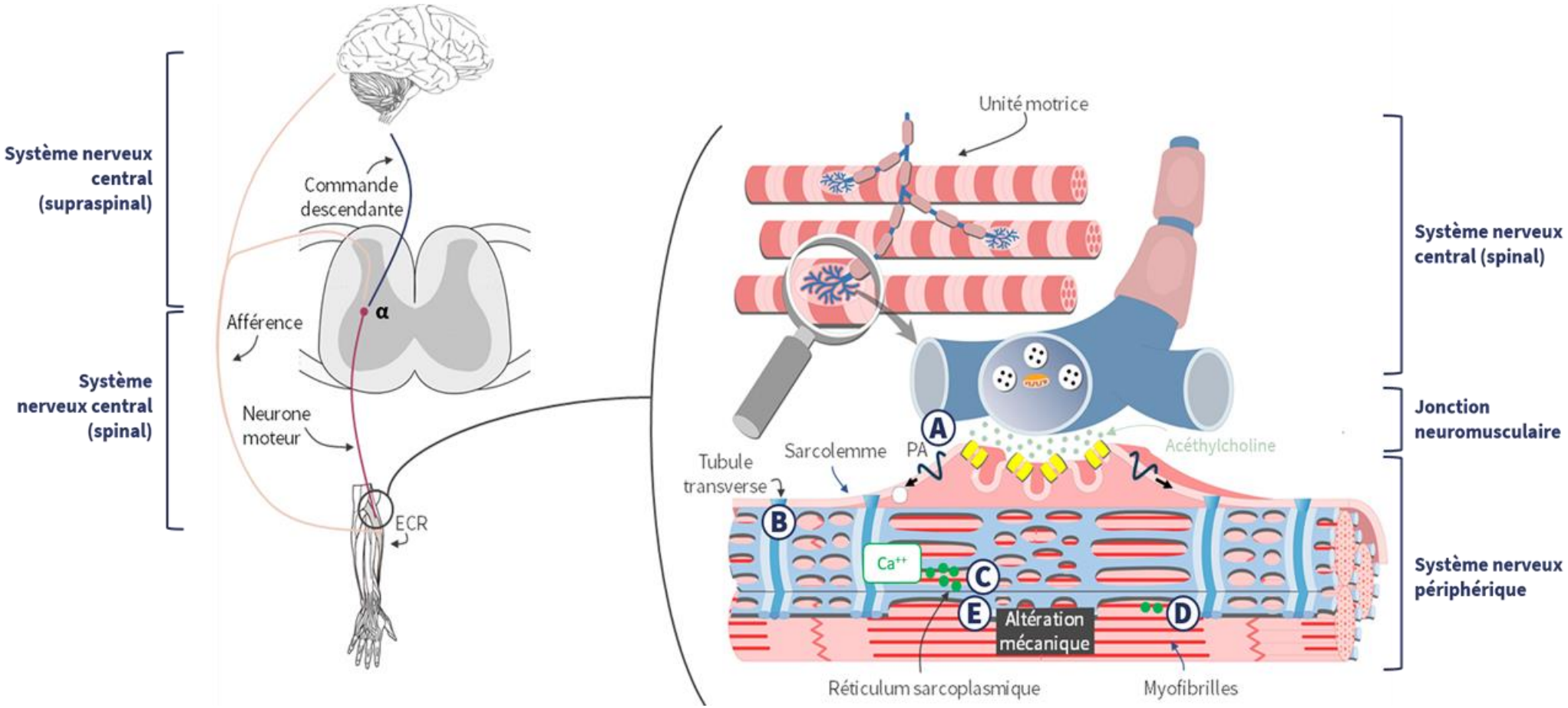


Figure 5. Localisations et mécanismes impliqués dans la fatigue d'origine neuromusculaire (PA : Potentiel d'action).

iii. Composante métabolique de la fatigue

La contraction musculaire durant l'exercice est dépendante de la disponibilité en ATP au sein du muscle : l'hydrolyse (i.e. dégradation) de l'ATP, via l'ATPase, en adénosine diphosphate (ADP) fournit l'énergie nécessaire à la fixation puis au glissement de la tête de myosine sur les filaments d'actine provoquant la contraction musculaire :

$$ATP \leftrightarrow ADP + Pi + H^{+} + \text{libération d'énergie}$$

La concentration intramusculaire en ATP avoisinant les 5 $mmol.kg^{-1}$ de muscle frais, sa production, via les filières énergétiques de l'organisme, est indispensable au maintien de la force ou de la puissance musculaire lors d'un exercice. Bien que l'ensemble des filières énergétiques contribuent simultanément à la production d'ATP lors d'un exercice, sa production sera dépendante de l'intensité et de la durée de l'exercice (Coyle 2000) (Sahlin 1992) :

- L'**hydrolyse de l'ATP intramusculaire** peut aussi bien se produire lors d'exercices brefs à haute-intensité (< 2 sec) que dans les dernières étapes d'un exercice intense prolongé (Sahlin 1992)
- Le **système phosphagène** est sollicité dans les premières secondes de tous types d'exercices mais principalement lors d'efforts maximaux (15-20 s), compte tenu de la disponibilité immédiate de la phosphocréatine (PCr) dont la dégradation, catalysée par la créatine kinase (CK), permet de fournir de l'ATP (Bogdanis et al. 1998) :

$$PCr + ADP + H_{+} \leftrightarrow \text{créatine} + ATP$$

- Le **système glycolytique** est principalement sollicité lors d'exercice de durée intermédiaire (20 s à 2 min) à des intensités supra-maximales. L'ATP est ici le produit de la glycolyse qui utilise le glucose comme substrat énergétique provenant à la fois de la circulation sanguine, des réserves en glycogène musculaire et hépatique. En l'absence d'oxygène, le produit de l'oxydation du glucose par la glycolyse correspond à deux molécules de lactate associées à deux ions H+ :

$$\text{Glucose} + 3\ ADP + 3\ Pi \rightarrow 3\ ATP + 2\ Lactate + 2\ H+$$

- Le **système oxydatif** est principalement sollicité lors d'exercices prolongés (>3 min) sous-maximaux. La glycolyse, se déroulant en présence d'oxygène, oxyde dans un premier temps le glucose et produit le pyruvate qui, par la suite, est oxydé via le cycle de Krebs. Les produits issus du cycle de Krebs sont à leur tour utilisés par la chaîne de transporteurs des électrons pour former 38 molécules d'ATP :

$$C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2 + 38\ ADP + 38\ Pi \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 38\ ATP$$

  Le système oxydatif utilise également les lipides comme substrat énergétique, provenant des réserves intramusculaires en acides gras au niveau du muscle et des triglycérides présents dans le tissu adipeux : ces substrats suivent notamment la même voie biochimique que le pyruvate, via le cycle de Krebs et la phosphorylation oxydative, pour produire 146 molécules d'ATP.

Le déclin de la production de force ou de puissance musculaire d'origine métabolique correspond à des modifications au sein des processus métaboliques responsables de la production d'ATP. Plus précisément, les facteurs métaboliques associés à la fatigue correspondent à :

- L'accumulation des sous-produits métaboliques provenant des processus biochimiques responsables de la formation d'ATP : ADP, Pi, Mg^{2+}, Lactate, H^+.
- La déplétion en réserves/substrats énergétiques : ATP, phosphocréatine, glycogène, glucose sanguin

iv. Composante structurelle

Lors d' exercices inhabituels, répétés ou intenses, les muscles impliqués sont soumis au phénomène de dommages musculaires (EIMD pour « Exercise induced muscle damage ») (Armstrong 1986). Plus précisément, il est reconnu que les dommages musculaires sont principalement provoqués lors d'exercice inhabituels impliquant des contractions musculaires excentriques (Friden et al. 1981). Ce type de contraction a lieu

lorsque le muscle ou le groupe musculaire est activé contre une force supérieure à celle qu'il peut produire provoquant alors un allongement de l'unité constituée par le muscle et le tendon (i.e. unité muscle-tendon). Les dommages musculaires peuvent accentuer l'ischémie progressive induite par des exercices prolongés, qui accélère la dégradation des fibres musculaires saines avoisinantes, modifie l'équilibre ionique au sein du muscle et limite l'élimination des sous-produits métaboliques de l'exercice (Ebbeling and Clarkson 1989). Alors que l'on qualifie d'origine mécanique les dommages musculaires provoqués par des contractions excentriques, le second type d'exercice induit des dommages musculaires d'origine métabolique (Ebbeling and Clarkson 1989). Le tennis impliquant de nombreuses répétitions du cycle étirement-détente (SSC), correspondant à l'enchaînement de contractions excentriques puis concentriques, nous nous attardons, dans le cadre de cette thèse, sur les dommages musculaires d'origine mécanique. Les altérations structurelles du tissu contractile vont ensuite provoquer une cascade d'événements cellulaires. Une augmentation du [Ca^{++}] intracellulaire, due à la rupture du réticulum sarcoplasmique, déclenche l'activation des voies protéolytiques et lipolytiques provoquant alors la dégradation de la membrane cellulaire et du sarcolemme, une infiltration de molécules inflammatoires, qui induit la production d'espèces réactives à l'oxygène initiant la mort de la cellule. Cette phase inflammatoire provoque la formation d'un œdème extracellulaire, dont le symptôme fonctionnel correspond au gonflement du muscle lésé (Coudreuse et al. 2004). La formation d'œdème active alors les terminaisons nerveuses responsables de la transmission de la douleur à l'origine des sensations de douleurs musculaires (DOMS, Delayed onset muscle soreness) (Armstrong 1986), symptôme perceptif des dommages musculaires.

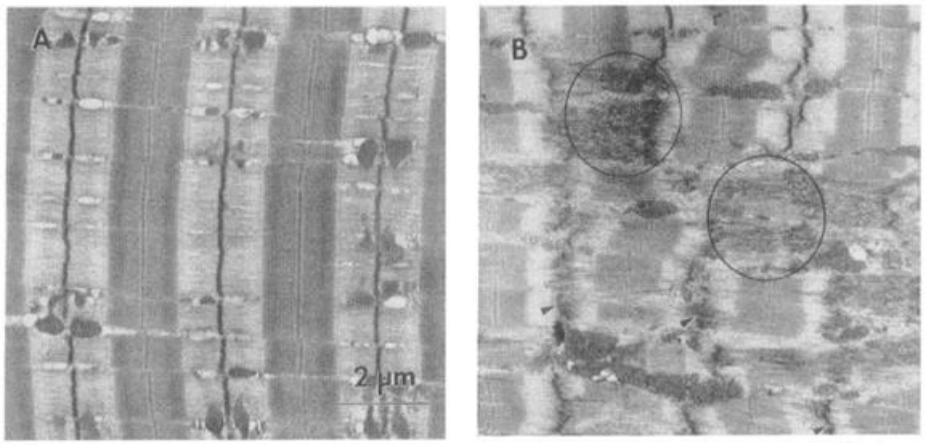


Figure 6. Coupes histologiques de microlésions musculaires provoquées par un exercice excentrique visualisées par microscope électronique à transmission.

A : Sarcomères sains. B : Sarcomères lésés avec perturbations de l'alignement des stries Z (zones encerclées). A partir de (Lieber et al. 1991)

Alors que les perturbations structurelles interviennent lors de l'exercice, les DOMS n'apparaîssent que 6 à 12h plus tard pour une atteinte maximale entre 24h et 72h après l'exercice traumatisant. La rupture des membranes induit un efflux d'éléments intracellulaires vers la circulation sanguine, parmi lesquels la créatine kinase, permettant de mesurer de manière non-invasive la magnitude des dommages musculaires. En fonction du type d'exercice à l'origine des dommages musculaires, il est rapporté que la créatine kinase peut être libérée dans les 12 à 48h avec un pic de concentration se situant entre 72h et 96h après l'exercice (Clarkson et al. 1992) (Twist and Eston 2005) (Paulsen et al. 2012). De nombreux symptômes peuvent indirectement témoigner de la présence de dommages musculaires mais, au vu de la littérature actuelle, ceux-ci semblent ne pas refléter le degré de sévérité des lésions où ne sont pas corrélés entre eux.

La capacité à produire de la force reste donc le marqueur le plus utilisé à ce jour car il reflète de manière indirecte et non-invasive le degré de sévérité des dommages musculaires (Paulsen et al. 2012).

v. Composante cardiovasculaire

Au cours d'un exercice, les systèmes cardiovasculaire et respiratoire modifient leur fonctionnement et s'adaptent au stress physiologique qui est imposé à l'organisme, en particulier au sein des muscles actifs. En effet, la contraction musculaire provoque une accélération des processus métaboliques nécessitant alors un apport important en oxygène, produisant alors une accumulation de sous-produits métaboliques. L'augmentation du débit cardiaque (fréquence cardiaque, volume d'éjection systolique) et de la pression artérielle couplée à la mise en place de processus neurophysiologiques (i.e. système adrénergique) et métaboliques provoquentt une redistribution de la circulation sanguine. De cette manière, l'apport en oxygène vers les muscles est proportionnel à l'intensité de l'exercice. En parallèle, la consommation d'oxygène au niveau des muscles actifs activent le système respiratoire via une augmentation du débit respiratoire, et ce, proportionnellement aux besoins métaboliques et à l'intensité de l'exercice (Farrell et al. 2011). L'activité musculaire importante induit également une augmentation progressive de la température centrale. Afin de maintenir une température interne stable, l'organisme dissipe cette chaleur en redirigeant le sang, des muscles vers la circulation périphérique cutanée (Rowell 1974), afin de l'évacuer par la sudation. En conditions environnementales tempérées, il s'agit du principal mécanisme de thermorégulation pouvant être à l'origine d'un phénomène de déshydratation (Hausswirth 2013). Cette déshydratation, pouvant aller jusqu'à une perte de 4% du poids corporel dans des sports intermittents, induit une diminution du volume plasmatique et de la pression artérielle, qui a pour conséquence de réduire le flux sanguin au sein des muscles et de la peau et d'augmenter de fait la fréquence cardiaque afin de maintenir le débit cardiaque (Hausswirth 2013) (Nedelec et al. 2012). Ainsi, une incapacité progressive de l'organisme à maintenir la fréquence cardiaque peut non seulement impacter la consommation maximale d'oxygène nécessaire pour approvisionner les muscles en oxygène, mais également les mécanismes de thermorégulation, modifiant négativement la perception de la fatigue avec l'augmentation de la température interne (Skorski et al. 2019a) (Periard et al. 2014b). Il semble toutefois que le temps nécessaire pour rétablir l'équilibre hydrique

après un exercice, soit aux alentours de 6 h, si l'ensemble des recommandations en termes de réhydratation sont suivies. Un dysfonctionnement transitoire de ce système n'aurait donc pas d'effet à plus long terme sur la fatigue (Convertino et al. 1996). Enfin, il apparaît que le fonctionnement du système cardiovasculaire, après un exercice à haute intensité (sprints intermittents) ou prolongé (course de ski) peut être altéré jusqu'à 48 h, en raison d'une diminution de l'excitabilité du système nerveux autonome. Ceci peut perturber l'atteinte d'un niveau de fréquence cardiaque optimal, nécessaire pour tolérer un effort à intensité maximale. (Skorski et al. 2019a) (Al Haddad et al. 2012)

vi. Conclusion

Dans cette partie, nous avons évoqué de manière distincte les altérations physiologiques principales pouvant être à l'origine de la fatigue induite par l'exercice. In fine, la résultante fonctionnelle est identique et correspond à une diminution de la capacité à produire de la force. Cependant, il est important de rappeler et souligner que l'installation de la fatigue est souvent le résultat de l'interaction entre ces différentes altérations puisque les systèmes physiologiques de l'organisme sont interdépendants. Concrètement, l'altération d'un système physiologique peut exacerber et/ou contribuer à la fatigue induite par un autre système. Par exemple, la diminution des substrats énergétiques disponibles affecte directement le métabolisme des neurotransmetteurs au sein du système nerveux central (Struder et al. 1998). Il semble également logique que l'accumulation de sous-produits métaboliques résultant de l'utilisation des systèmes énergétiques, contribuent à la fatigue au sein du muscle, qui elle-même est la résultante à la fois d'altérations structurelles (composante structurelle) et biochimiques régulant l'excitabilité du sarcolemme ou le couplage excitation-contraction (composante nerveuse périphérique). Enfin, alors que les boucles de rétrocontrôle au sein de la moelle épinière sont régulées en partie via des afférences en provenant du muscle, il semble également évident que la commande nerveuse centrale soit altérée en raison des modifications neuromusculaires, mécaniques ou métaboliques au sein du muscle. L'implication, l'intensité et l'incidence de ces altérations dans le développement de la fatigue sont spécifiques et varient en fonction

du type, de la durée et de l'intensité de l'exercice. Pour ces raisons, il semble important d'appréhender la fatigue induite par l'exercice en prenant en compte l'ensemble de ces facteurs, témoins du caractère multifactoriel de son installation.

4. Récupération

1. Définition et principe

Différents types de récupération liés à l'état de fatigue ont été définis dans la littérature, impliquant des durées de périodes de récupération différentes (Bishop et al. 2008). Nous nous intéressons, dans le cadre de cette thèse, à la période de récupération entre deux entraînements/compétitions. L'état de fatigue induit par l'entraînement peut être recouvré en prenant soin de laisser une fenêtre de temps suffisante avant la prochaine session. Cette période de récupération permettant à l'athlète de naturellement rétablir l'homéostasie interne sera considérée ici comme une **récupération passive** (Kentta and Hassmen 1998)**.** Dans la plupart des cas, la nécessité de s'entraîner de manière quotidienne ou d'enchaîner les compétitions régulièrement ne permet pas de considérer cette possibilité (Bishop et al. 2008) (Barnett 2006). Les athlètes ont alors recours à une stratégie de récupération. Une stratégie de récupération correspond à l'utilisation après l'exercice d'une ou plusieurs techniques permettant i) d'accélérer le retour de l'organisme à ses valeurs homéostasiques initiales et/ou ii) de minimiser les effets de la fatigue (Figure 6) en :

- Limitant la diminution (ie. magnitude, intensité) des performances (A),
- Accélérant la restauration (retour à des valeurs initiales) des performances, telles qu'elles étaient avant l'entraînement (B),
- Limitant la diminution et accélérant la restauration des performances (C),

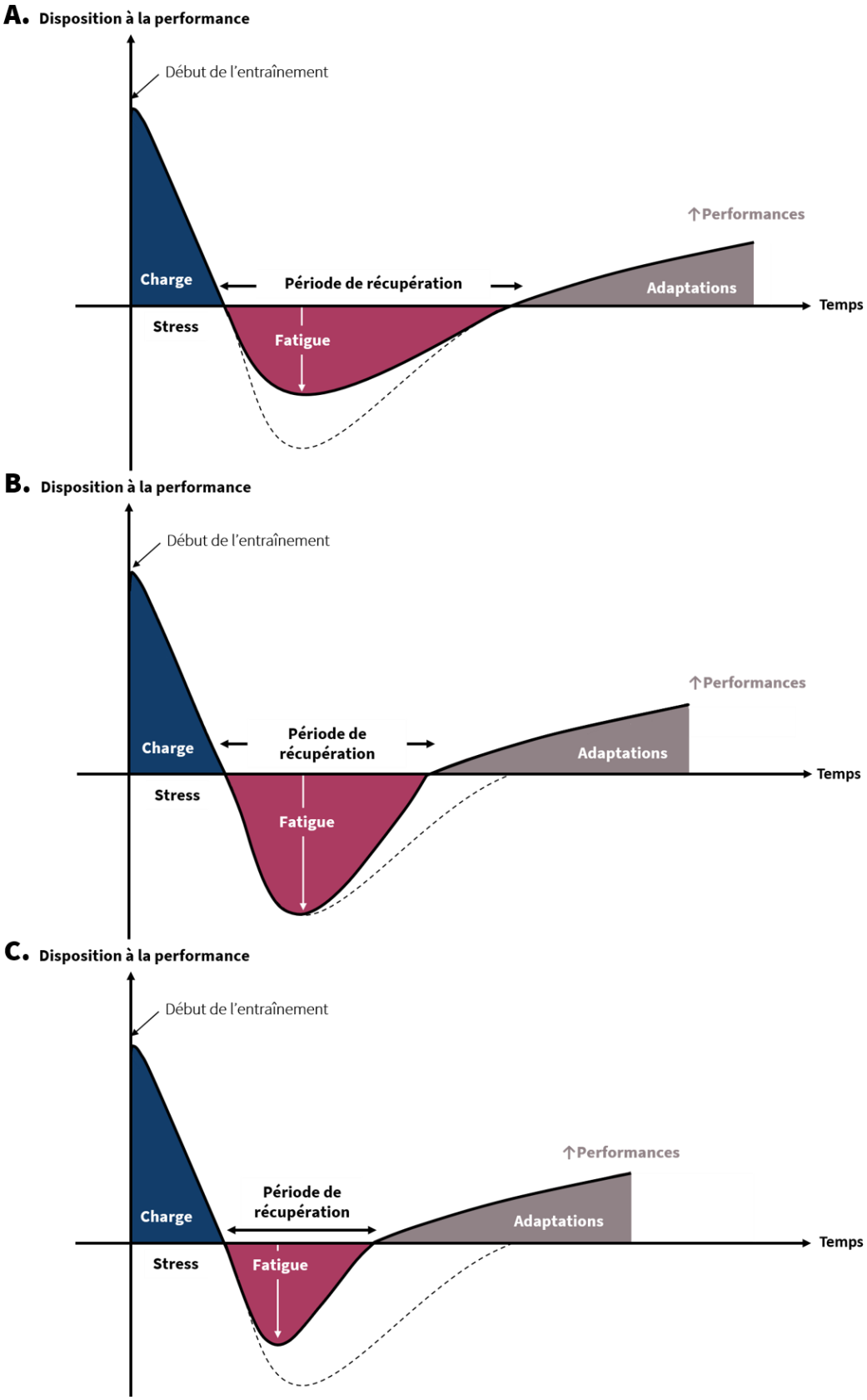


Figure 7. Illustration des effets souhaités de l'application de stratégies de récupération sur le modèle charge, fatigue, performance. A. Limitation de la diminution des performances ; B. Accélération de la restauration des performances telles qu'elles étaient avant l'entraînement ; C. Limitation de la diminution et accélération de la restauration des performances.

2. Mécanismes d'action des techniques de récupération

L'objectif commun des techniques de récupération est de moduler la fatigue induite par la charge d'entraînement en agissant sur une ou plusieurs fonctions psychophysiologiques. Au-delà des stratégies fondamentales de la récupération relatives à l'hygiène de vie comme la nutrition, l'hydratation et le sommeil (Halson 2008; Nedelec et al. 2015), les athlètes de haut-niveau utilisent de nombreuses techniques de récupération (Venter 2014) : récupération active, massages, cryothérapie corps entier, immersion en eau froide, étirements, vêtements de compression, électrostimulation… Cependant, leurs mécanismes d'action ne sont pas les mêmes et vont influencer différemment les systèmes psychophysiologiques mis en jeu (Ihsan et al. 2016) (Engel and Sperlich 2016) (Weerapong et al. 2005) (Sands et al. 2013). Avant toute chose, il convient dès lors de comprendre les mécanismes d'action de chacune d'entre-elles.

i. Principe général des techniques de récupération par le froid

Les techniques de récupération par le froid consistent à l'exposition d'une partie ou de l'ensemble du corps au froid et sont couramment regroupées dans le domaine médical ou sportif sous la notion de cryothérapie (Hohenauer et al. 2015). Parmi celles-ci, l'immersion en eau froide (CWI) et la cryothérapie corps entier (WBC) sont les plus utilisées par les athlètes de haut-niveau (Hohenauer et al. 2015), notamment par les joueurs de tennis (Fleming et al. 2018). Le but est de provoquer une diminution de la température des tissus cutanés, musculaires et/ou de la température interne (Figure 8 et Figure 9). Bien que la diminution de la température leur confère des mécanismes physiologiques communs, les protocoles d'application de ces techniques sont bien distincts du fait de mécanismes physiques d'échange avec le corps différents (air, eau, glace). Nous proposons, dans la suite de cette partie de préciser les différents protocoles, principes, les mécanismes physiologiques et effets principaux souhaités pouvant s'appliquer à la récupération après l'exercice, spécifiques au tennis.

- **Cryothérapie corps entier**

La cryothérapie corps entier (WBC) existe aujourd'hui sous plusieurs dispositifs technologiques distinctes. La cryothérapie corps partielle (PBC) propose un dispositif dans lequel l'individu entre dans une cabine refroidie à l'azote nécessitant de ne pas exposer la tête : la température d'exposition varie entre -110°C et -195°C (Bouzigon et al. 2016). Le second dispositif qui est la WBC est composé de deux ou trois chambres dans lesquels l'individu entre entièrement. A ce jour, aucun consensus n'existe sur les protocoles (durée, températures) comme en témoignent les divergences dans ceux proposés par les constructeurs des 15 technologies de cryothérapie corps entier existantes. Bien qu'il existe plusieurs technologies, le principe est similaire et consiste à exposer le corps à un air froid et sec. L'important gradient de température avec l'extérieur refroidit ainsi rapidement les différents tissus superficiels (coefficient de conductivité thermique : 0,024k). Les quelques travaux portant sur l'amplitude du refroidissement après une exposition de 2 à 3 min dans des chambres allant de -110°C à -195°C, apportent des diminutions de température cutanée comprise entre -4°C à -14°C (Glasgow et al. 2014), pour -1,8°C et -1,1°C pour la température musculaire (Bleakley et al. 2014) (Mawhinney et al. 2017) et -0,6 et 0°C pour la température centrale (Mawhinney et al. 2017) (Bleakley et al. 2014).

L'action du froid stimule les terminaisons nerveuses au niveau de la peau, provoquant alors très rapidement une diminution de la vitesse de conduction nerveuse (Rutkove 2001) et une inhibition des récepteurs sensoriels à la douleur (nocicepteurs) induisant alors un effet antalgique quasi immédiat (Hausswirth et al. 2013) (Ferreira-Junior et al. 2015). En parallèle, les récepteurs cutanées stimulés par le froid vont activer le système nerveux sympathique, via l'hypothalamus, et ainsi provoquer une diminution du diamètre des vaisseaux sanguins cutanés et musculaires (vasoconstriction) (Costello et al. 2012b). L'activité métabolique au sein du muscle est alors limitée, notamment en raison de la diminution de la perméabilité des vaisseaux qui freine les processus inflammatoires consécutifs à de potentielles lésions musculaires et limite l'apparition d'œdème (Banfi et al. 2009) (Costello et al. 2012b) (Bleakley et al. 2012). L'effet antalgique lié au ralentissement des messagers de la douleur, associé à une diminution

de l'inflammation, est alors proposé comme limitant l'installation des dommages musculaires et diminuant les sensations de douleurs musculaires (Pournot et al. 2011b) (Fonda and Sarabon 2013) (Costello et al. 2012a). Enfin, la vasoconstriction périphérique cutanée et musculaire, via l'activation du système nerveux sympathique, diminuant les pertes de chaleur et redistribuant le sang au niveau des organes centraux, induit une augmentation du débit cardiaque. En réponse, le système nerveux parasympathique, deuxième branche du système nerveux autonome, est mis en action via la sensibilité des récepteurs baroréflexes situés au niveau de l'aorte. La conséquence est une diminution de la fréquence cardiaque afin de rééquilibrer le débit cardiaque. L'exercice physique induit une augmentation de la fréquence cardiaque qui permet d'accélérer le retour à une fréquence cardiaque de repos, qui serait alors associée à une amélioration générale de la récupération post-exercice (Schaal et al. 2015) (Louis et al. 2015).

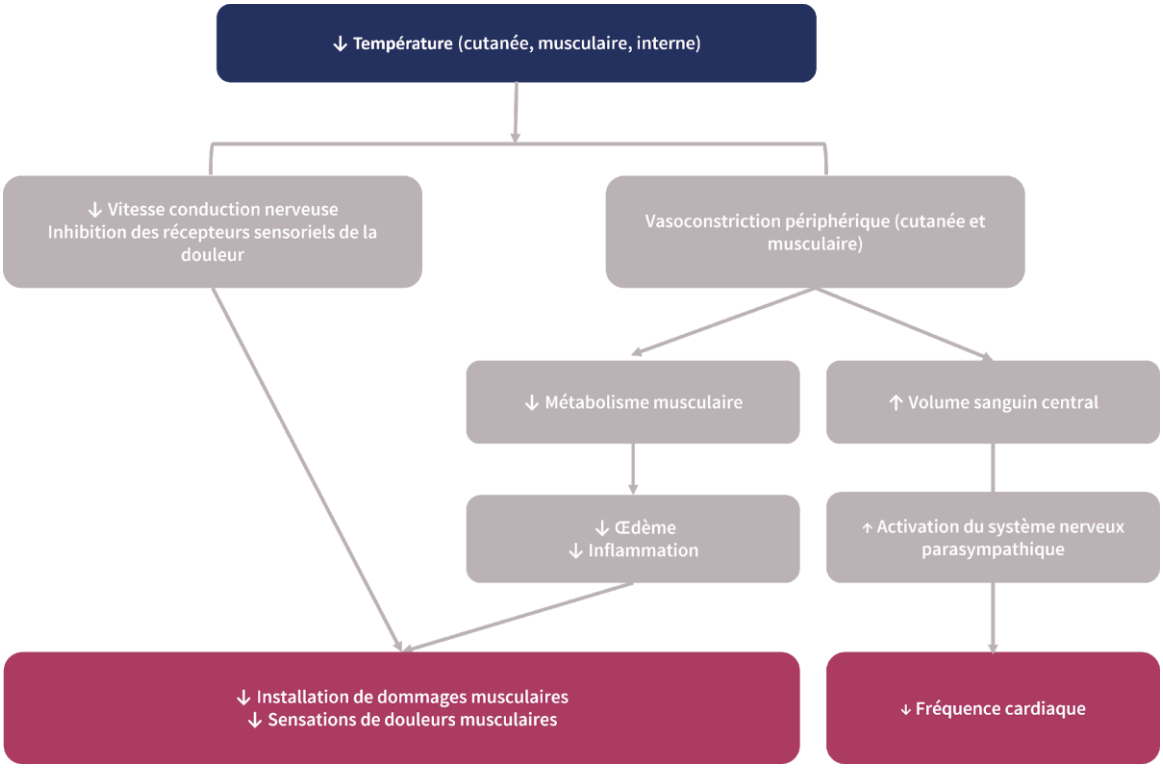


Figure 8. Description des mécanismes d'action physiologiques de la cryothérapie corps entier (Costello et al. 2012a; Costello et al. 2012b; Schaal et al. 2015; Louis et al. 2015; Pournot et al. 2011b)

- **Immersion en eau froide**

L'immersion en eau froide (CWI) consiste à immerger dans l'eau une partie du corps ou sa totalité à l'exception de la tête. Différents protocoles sont utilisés en fonction du dispositif, mais la littérature a démontré que la CWI est efficace lorsque l'immersion est effectuée dans une eau froide entre 11 et 15°C pour une durée entre 11 et 15 min (Machado et al. 2016). L'eau froide possédant un coefficient de conductivité thermique (0,58k) plus important que l'air (WBC) lui conférant un degré de refroidissement des tissus plus important (> 1°C notamment 10 min après application). En effet, les travaux rapportent des diminutions de température cutanée comprises entre -5,9 et -8°C (Mawhinney et al. 2017) (Bleakley et al. 2014), entre -2 °C et -2,9°C de température musculaire pour diminution comparable à celle de la WBC pour la température interne (≈-0,6°C) (Mawhinney et al. 2017) (Bleakley et al. 2014).

Aujourd'hui, une littérature plus fournie sur la CWI permet de rapporter des données plus précises quant aux potentiels mécanismes physiologiques mis en place par l'organisme à la suite de l'application du froid. L'effet antalgique, via l'inhibition des récepteurs sensoriels à la douleur est également rapporté comme l'un des mécanismes immédiats permettant d'atténuer les sensations de douleurs musculaires (Ihsan et al. 2016). La pression hydrostatique due à la force compressive de l'eau sur la surface du corps immergé, provoque un mouvement des fluides des extrémités du corps jusqu'aux organes centraux (Wilcock et al. 2006). Ce mécanisme, combiné à l'action du froid, permettrait d'exacerber les mécanismes associés à la redistribution du sang des tissus cutanés et musculaires vers les organes centraux. De ce fait, il est rapporté une augmentation du retour veineux facilitant les mouvements de fluides du milieu intracellulaire et interstitiel vers les compartiments intravasculaires. Ceci permettrait de faciliter la translocation des débris cellulaires et tissus nécrotiques vers la circulation sanguine (Wilcock et al. 2006). L'action simultanée de la pression hydrostatique et du refroidissement des tissus musculaires pourrait également limiter les réponses inflammatoires et l'hypoxie musculaire en limitant l'activité enzymatique et métabolique au sein du muscle, mais également améliorer l'apport en O_2 en diminuant les effets de la compression mécanique induite par l'installation d'œdème (Wilcock et

al. 2006) (Ihsan et al. 2016). A l'instar de la WBC, l'utilisation régulière de la CWI permet de stimuler le système nerveux sympathique à la suite de l'augmentation du débit cardiaque. Cette modulation à long terme du tonus vagal, souvent évaluée par des indices de variabilité cardiaque (HRR), serait alors également bénéfique pour la récupération (Stanley et al. 2014) (Ihsan et al. 2016). En raison d'une diminution de la température musculaire plus importante comparée à la WBC, la vasoconstriction cutanée et musculaire a été rapportée supérieure pour la CWI (Mawhinney et al. 2017). Par conséquent, la littérature a rapporté récemment une efficacité de la CWI qui serait potentiellement supérieure à la WBC pour actionner l'ensemble de ces mécanismes et par extension, la récupération après l'effort (Mawhinney et al. 2017) (Abaidia et al. 2017).

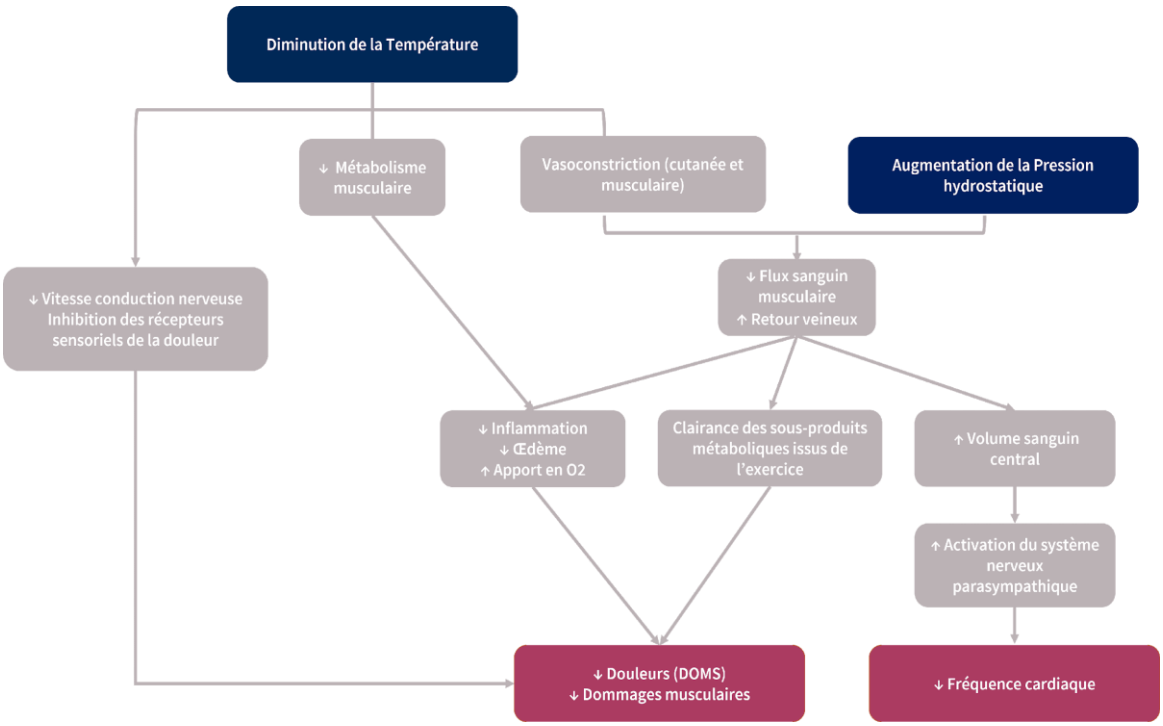


Figure 9. Description des mécanismes d'action physiologiques de l'immersion en eau froide (Ihsan et al. 2016; Wilcock et al. 2006; Mawhinney et al. 2017)

ii. Les autres techniques de récupération

Les principes, l'ensemble des mécanismes d'action et les bénéfices potentiels rapportés dans la littérature pour les autres techniques de récupération sont exposés dans le Tableau 1.

Tableau 1. Description des principes et des effets des principales techniques de récupération utilisées après l'exercice

	Protocoles	Principe	Mécanismes d'action potentiels	Principaux effets prouvés
Massages (Cafarelli and Flint 1992) (Poppendieck et al. 2016) (Weerapong et al. 2005)	Principaux types de massages manuels : effleurage, pétrissage, friction, tapotement Durée : 30 min	Manipulation mécanique des tissus corporels via l'application de pressions mécaniques	↓Excitabilité neuromusculaire ↑ Microcirculation sanguine, lymphatique ↓ Œdème, Ischémie locale	↑Sensations de relaxation ↓ Stress ↓ Douleurs musculaires
Rouleaux d'automassage (Wiewelhove et al. 2019) (Peacock et al. 2014) (Weerapong et al. 2005) Cavanaugh 2017}	Massage dans l'axe du musculaire Durée : 1 à 2min par groupe musculaire	Application d'une pression mécanique, grâce au poids de corps sur un rouleau, sur un groupe musculaire donné	Réduction de l'adhésion des tissus, ↓raideur musculaire Action sur les médiateurs nerveux, messagers de la douleur ↑ Flux sanguin, stimulation système parasympathique ↑ concentration plasmatique d'endorphine	↑Amplitude du mouvement (ie.ROM) ↑Amplitude articulaire ↓Douleurs musculaires
Récupération active (Fowles et al. 2002) (Choi et al. 1994) (Romero et al. 2017)	10-30 min d'exercice sous-maximal (40-60% VO_2max) (course, pédalage, nage)	Maintien de l'activité musculaire à faible intensité ↓Diminution progressive de l'intensité de l'exercice	↑ Flux sanguin local ↑Flux sanguin systémique	↑[Lactate] après l'effort Accélération du retour du pH plasmatique à des valeurs physiologiques

	Protocoles	Principe	Mécanismes d'action potentiels	Principaux effets prouvés
Electrostimulation neuromusculaire (Borne et al. 2015)	30 min d'application d'électrodes au niveau des mollets	Application locale d'électrodes permettant la contraction musculaire du mollet	↑ Flux sanguin local ↑Flux sanguin systémique ↓Stase veineuse	Clairance des sous-produits métaboliques de l'exercice (Lactates) ↓Sensations de fatigue musculaire
Etirements (actifs) (Opplert and Babault 2018) (Sands et al. 2013) (Bieuzen et al. 2014) (Hough et al. 2009)	Sur chaque groupe musculaire : 1-3 répétitions 15-30s	Application d'une force sur le système musculo-tendineux	↑Température musculaire, centrale ↑Fréquence cardiaque ↓raideur musculaire (↓viscosité) ↑Potentialisation par post-activation	↑Amplitude du mouvement (ie.ROM) ↓Raideur musculaire ↓Douleurs musculaires
Vêtements de compression (Duffield et al. 2008) (Menetrier et al. 2015) (Brown et al. 2017) (Kraemer et al. 2010)	Durée : 1h-1h30	↑ Pression extravasculaire au niveau des capillaires sanguins par le port de vêtements de compression élastiques (15 et 30 mmHg effet systémique au niveau du mollet)	↑ Retour veineux ↑ Débit sanguin ↓Stase veineuse	Clairance des sous-produits métaboliques de l'exercice (Lactates) ↓Sensations de douleurs musculaires

	Protocoles	Principe	Mécanismes d'action potentiels	Principaux effets prouvés
Massages pneumatiques (Martin et al. 2015) (Sheldon et al. 2012) (Zuj et al. 2018)	30min de compression intermittente (30s/30s)	Application d'une pression pneumatique intermittente au niveau des membres inférieurs à l'aide de bottes gonflées d'air (80 mmHg)	↑ Débit sanguin ↑Débit artériel ↓Stase veineuse	↓ [Lactate] après l'effort
Immersion en bain tempéré (Gregson et al. 2011) (Wilcock et al. 2006)	15-30min 20-36°C	Application de la pression hydrostatique liée à l'immersion sur la surface du corps	↑ Pression hydrostatique ↑ Gradient de diffusion cellulaire ↑ Circulation sanguine	↓Perception de la fatigue ↓Installation œdème Clairance des sous-produits métaboliques de l'exercice
Immersion contrastée (Bieuzen et al. 2014) (Halson 2011)	7 × 1 min froid – 1 min chaud Différence température ≈30°C	Diminution de la température Application de la pression hydrostatique liée à l'immersion sur la surface du corps Alternance chaud/froid	↑ Pression hydrostatique Vasoconstriction/vasodilation cutanée ↓Œdème, Inflammation	↓ Douleurs musculaires ↑ Système nerveux parasympathique

	Protocoles	Principe	Mécanismes d'action potentiels	Principaux effets prouvés
Techniques de récupération par le chaud (hammam, sauna, bain chaud) (Goto et al. 2011) (Petrofsky et al. 2013)	Hammam : 3 × 8min 50°C à 100% Sauna : 3 × 8min à 80-90°C à 10-20% d'humidité Hammam Bain chaud : 10-20min à 42°C	↑ Température musculaire et tissulaire	↓ Tensions musculaires, nerveuses, vaisseaux sanguins	↑ Relaxation, bien-être

5. Quantification de la charge, de la fatigue et de la récupération

1. Charge de travail

Qu'elle soit interne ou externe, la charge d'entraînement n'est pas mesurée par un seul paramètre mais plutôt par un ensemble de paramètres. La validité et la pertinence d'un indice de charge dépend encore une fois de la nature, de l'intensité et du mode d'exercice. Seul un paramètre quantifié durant l'entraînement est considéré comme un indice de charge d'entraînement (Impellizzeri et al. 2019).

i. Charge externe

La charge externe correspondant au « plan d'entraînement » permet de mesurer le travail physique effectué (fréquence, l'intensité et la durée) sans prendre en compte les caractéristiques individuelles de l'athlète (Impellizzeri et al. 2019) (Halson 2014). Cet indice nécessite d'être représentatif de la nature de la discipline. Adaptés aux contraintes spécifiques du tennis, les indices associés à l'analyse du mouvement sont les plus majoritairement utilisés.

Sur le terrain ou dans certains protocoles de recherche, **la technologie GPS** est couramment utilisée pour décrire les mouvements spécifiques, les distances parcourues et la vitesse dans la plupart des sports intermittents (Coutts et al. 2018) l'utilisation de GPS à des fréquences d'acquisition de 5 Hz n'est pas encore validée comme un outil reproductible et fiable, avec une sous-estimation des distances parcourues lors de mouvements spécifiques au tennis (coefficient de variation : 15%) (Murphy 2015) (Duffield et al. 2010; Vickery et al. 2014). Cependant, les GPS avec une fréquence d'acquisition supérieure à 10Hz, démontrés comme plus robustes et précis dans la description de sprints intermittents non linéaires, sont aujourd'hui utilisés dans quelques études au tennis (Ponzano and Gollin 2017).

Les accéléromètres, intégrés aujourd'hui dans certains dispositifs GPS, permettent de quantifier de manière plus exhaustive la charge biomécanique totale en incluant notamment le nombre d'accélérations et décélérations, non quantifiables via

l'utilisation simple des GPS (Hoppe et al. 2016). Ils ont notamment été utilisés dans des protocoles de recherche spécifiques au tennis (Duffield et al. 2014; Hoppe et al. 2016).

Outils	Types et unités de mesure
GPS	• Distance parcourue • Vitesse produite • Accélérations
Accéléromètre	Quantification des mouvements : changements de direction, somme de la production de force
Technologie d'analyse de mouvement (Hawkeye®)	Capture du mouvement de la balle et des mouvements des joueurs sur le court
Analyse des performances	Enregistrement des paramètres pertinents et représentatifs de la discipline : • Nombre de frappes (coup droit, revers) • Nombre de 1er/2nd service • Nombre de points gagnés, perdus • Temps de jeu

Tableau 2. Principaux outils utilisés pour mesurer la charge externe par l'analyse de mouvements spécifiques au tennis.

Les logiciels de capture du mouvement (e.g. Hawkeye®) sont des outils couramment utilisés dans le tennis, notamment sur les circuits professionnels, comme outil d'aide à l'arbitrage dans un match officiel (Martínez-Gallego et al. 2013). En revanche, cette technique très coûteuse ne semble pas envisageable dans une perspective de quantification quotidienne de l'entraînement. À ce jour, la mesure de charge externe spécifique au tennis la plus fiable correspond à l'enregistrement vidéo et l'analyse quantitative non automatisée des variables représentatives de l'activité (Reid et al. 2013). Récemment, l'étude de Pereira et al. (2017) a utilisé un système d'analyse et de segmentation des images permettant de rapporter des indices comme la distance parcourue ou encore le nombres de déplacements (latéraux, avant/arrière) au cours d'un match de tennis (Pereira et al. 2017).

ii. Charge interne

Puisqu'il s'agit de la réponse spécifique et individuelle de l'athlète, l'étude d'Impellizzeri et al. (2004) suggère que celle-ci soit la plus importante à mesurer en comparaison avec la charge externe, car elle est plus prédictive des réponses psychophysiologiques de l'athlète. En effet, celle-ci prend en compte de nombreux facteurs extrinsèques à l'entraînement : le niveau d'entraînement, l'état psychologique, l'état de santé, la nutrition, l'environnement et la génétique propre à l'athlète. La pertinence d'un indice de charge interne est caractérisée par la spécificité de cet indice par rapport à la nature de l'exercice effectué (Impellizzeri et al. 2019). Plusieurs catégories de variables sont utilisées pour quantifier la charge interne : mesures physiologiques, mesures biologiques, mesures perceptives.

- **Mesures physiologiques et biologiques**

Les variations de FC et de la consommation d'oxygène sont proportionnelles à l'intensité de l'exercice et sont pour cette raison des indicateurs régulièrement quantifiés pour rendre compte de l'intensité d'un exercice (Borresen and Lambert 2008). La mesure de la **fréquence cardiaque** est sans doute la variable la plus utilisée pour mesurer la charge interne compte-tenu de sa praticité, tant sur le plan financier que matériel. De manière générale, la mesure de la FC pour mesurer l'intensité de l'exercice lors d'un effort intermittent comme au tennis ne semble pas être le marqueur le plus pertinent (Konig et al. 2001) (Fernandez et al. 2006). En effet, sa mesure ne permet pas de distinguer la contribution des filières anaérobie et aérobie ni de quantifier le stress induit pour les différents modes d'exercice (exercices en musculation par exemple) (Coutts 2009). La mesure de la FC peut cependant être intéressante pour mesurer la charge interne puisqu'elle s'est montrée sensible au stress psychologique lors d'un match de tennis. Des valeurs plus élevées associées à une libération de catécholamines sont parfois rapportées dans des situations de jeu, comme lors du service (Konig et al. 2001). Pour des mesures pertinentes, il est cependant nécessaire de quantifier simultanément la consommation d'oxygène.

La **consommation d'oxygène (VO2)** est couramment estimée en condition de laboratoire ou au cours d'un match ou d'un entraînement en mesurant les échanges gazeux (Smekal et al. 2001) (Dansou et al. 2001) pour quantifier la contribution aérobie. Des tests spécifiques ont été développés ces dernières années pour mesurer la **$VO2_{max}$** la plus spécifique à la nature intermittente du tennis (Brechbuhl et al. 2016) (Baiget et al. 2014).

Variable	Outils	
Fréquence cardiaque (FC) à l'exercice	Cardio-fréquence mètre	Marqueur de l'intensité de l'exercice
Consommation d'oxygène	Test incrémental en laboratoire (appareils portatifs)	Méthode standard de mesure de la contribution aérobie
Concentration en Lactate	Prélèvements sanguins par capillarité	Marqueur de la contribution anaérobie glycolytique

Tableau 3. Principaux outils de mesure physiologique et biologique de la charge interne spécifique au tennis

La **concentration sanguine en lactate (lactatémie)** apparaît comme la méthode biologique d'évaluation de la charge interne la plus utilisée et est rapportée comme sensible à la charge externe (Pyne et al. 2001). Sa mesure n'est pas forcément appropriée pour quantifier l'intensité d'un effort dans toutes les disciplines puisqu'elle représente indirectement la contribution de la filière anaérobie glycolytique (Partie 3 .2) iii)). La lactatémie présente des limites d'utilisation importantes puisque celle-ci peut être influencée par de nombreux facteurs externes (conditions environnementales, statut hydrique) et inhérents à son prélèvement (moment, zone de prélèvement) (Borresen and Lambert 2008). Les conditions et moments de prélèvement remettent notamment en cause sa validité en tant qu'indicateur de charge interne puisque la concentration sanguine en lactates serait plus représentative des efforts précédents que de l'effort en temps réel (Murias et al. 2007). Au tennis, l'ensemble des systèmes métaboliques étant sollicités à l'exercice, l'évaluation de la concentration sanguine en lactate permet d'estimer l'intensité d'un match ou d'un entraînement

lorsque les conditions de mesures sont bien standardisées (Reid et al. 2008) (Mendez-Villanueva et al. 2007b) (Fernandez-Fernandez et al. 2010).

Les mesures d'échanges gazeux permettent de quantifier plus exhaustivement la demande énergétique, qu'à elle seule la concentration en lactate ne permet pas d'évaluer. Au tennis, compte tenu de la sollicitation des systèmes glycolytiques et oxydatifs, la quantification des sollicitations métaboliques n'est complète que lorsque la concentration en lactate sanguin et la mesure des échanges gazeux couplée à celle de la FC sont effectuées simultanément (Smekal et al. 2001).

D'autres variables biologiques peuvent quantifier la charge interne comme celle de la **concentration en créatine kinase (CK) sanguin** qui mesure indirectement les dommages musculaires induits lors d'un exercice. Cependant, en prenant en compte la cinétique de la libération de la CK dans la circulation sanguine (Clarkson et al. 1992) (Twist and Highton 2013) (Paulsen et al. 2012), cet indice est plutôt représentatif de la fatigue d'origine structurelle. Les principes de sa mesure sont décrits dans la partie consacrée à la quantification de la fatigue/récupération.

- **Mesures perceptives**

La mesure de perception de l'effort par les différentes échelles de Borg (ie. CR-10, 6-20 points) est basée sur le stress physiologique et psychologique que l'athlète a perçu durant l'exercice. L'auteur définit alors l'effort perçu comme « une réaction de l'individu à la fois physique et psychique en réponse à l'effort » (Swart et al. 2012). A l'origine quantifiée sur une échelle de 6 à 20 points, le concepteur de cette échelle (Borg 1982) a par la suite proposé une échelle catégorielle de 1 à 10 (CR-10) pour simplifier la cotation de l'effort et mieux représenter les intensités maximales en associant la note de « 10 » à la perception d'un effort à une intensité jamais vécue (Borg 1998). L'équipe de (Foster et al. 2001) a adapté l'échelle de Borg afin de quantifier l'intensité de l'effort perçu dans les 30 minutes à la suite d'un exercice/entraînement (RPE, CR-10). Les auteurs proposent ensuite de multiplier la RPE par la durée totale de l'exercice (minutes) pour mesurer la charge d'entraînement qu'ils définissent sous le terme de sRPE (session-

Rating Perceived Exertion) (Foster et al. 2001). Des études ont permis depuis de valider son utilisation comme marqueur pertinent et reproductible de charge interne via sa corrélation positive avec des méthodes de calcul de la charge interne incluant la fréquence cardiaque (ie. modèle TRIMP Bannister, modèle TRIMP d'Edwards) et des variables de charge externe (données GPS : distance (m)) (Bannister 1991) (Edwards 1993). Au tennis cette méthode a également été validée par l'équipe de Gomes et al. (2015) en rapportant des corrélations positives (r=0,58 – 0 ,89 ; p<0,001) avec la mesure de charge interne d'Edwards (Edwards 1993). De fait, cette méthode a été utilisée à de nombreuses reprises dans les protocoles évaluant la charge interne au tennis (Murphy et al. 2015a; Murphy et al. 2014b; Murphy et al. 2014a) (Fernandez-Fernandez et al. 2015b) (Coutts 2009). Cette méthode apparaît alors comme un outil simple et valide de quantification de la charge interne notamment au vu de sa facilité d'utilisation. Il est également intéressant de noter que cette mesure permet de quantifier la charge imposée à l'athlète, et ce quel que soit le type d'entraînement effectué (Impellizzeri et al. 2005).

2. Fatigue et récupération

La récupération peut être simplement analysée à l'aide d'un indice de performance spécifique à la discipline. Cependant, il est intéressant de compléter cette analyse en mesurant les mécanismes sous-jacents de la fatigue. En effet, nous avons pu constater dans la partie précédente le caractère multifactoriel de la fatigue. De la même manière, les techniques de récupération peuvent influencer différemment les systèmes psychophysiologiques associés à la fatigue. La quantification des différents mécanismes de la fatigue permet alors d'objectiver l'efficacité de ces techniques sur les composantes spécifiques de la fatigue. Cette démarche permet d'orienter le choix d'une technique de récupération, afin d'associer la méthode la plus efficace face à une fatigue spécifiquement induite par l'entraînement.

Fort de ces constats, il apparaît maintenant clair que la mesure de l'état de récupération se traduit par le niveau de fatigue. De ce fait, la quantification du continuum fatigue-récupération nécessite une évaluation à large spectre à différentes échelles temporelles

(i.e. cinétique de récupération). La rapidité de l'évaluation d'un indice et sa praticité seront des éléments particulièrement importants dans le contexte du sport de haut-niveau.

i. Physiologique

Dans le cadre de l'activité tennis, les variables physiologiques sont les plus couramment utilisées pour évaluer la fatigue et la récupération à la suite d'activité intermittente à haute intensité. Bien qu'utilisée dans d'autres disciplines à dominante anaérobie, la mesure de la concentration en lactate pour évaluer la fatigue est encore largement débattue et ne semble pas être la plus pertinente dans les disciplines intermittentes comme le tennis (Girard and Millet 2009). En revanche, les dommages musculaires induits par la répétition de contractions musculaires excentriques dans ce type de discipline, font de la mesure de la concentration en créatine kinase, l'un des marqueurs biologiques les plus utilisés. Ainsi, l'activité de la CK, libérée dans les 12 à 48h après un exercice est considérée comme proportionnelle à l'intensité des dommages musculaires induits (Paulsen et al. 2012) (Brancaccio et al. 2010). Des marqueurs hormonaux comme le ratio testostérone/cortisol et le taux de cortisol salivaire ou des marqueurs immunologiques (IgA, Leucocytes) peuvent parfois être utilisés mais la variabilité et la complexité de leur mesure n'ont pas permis à ce jour d'identifier un marqueur spécifique de la fatigue.

ii. Analyse de la fonction neuromusculaire

La fatigue d'origine neuromusculaire (centrale ou périphérique) est difficilement quantifiable, notamment dans des contextes écologiques de pratique. En effet, celle-ci nécessite la mise en place de méthodes complexes et potentiellement douloureuses lors de protocoles rigoureusement standardisés. Ces méthodes seront décrites pour plus de clarté dans la partie consacrée à la fatigue spécifique au tennis (Chapitre 3).

iii. Cas spécifique de la mesure simultanée d'un indice de charge externe et interne

La mesure simultanée d'un indice de charge interne et de charge externe permet, non seulement d'évaluer la réponse de l'athlète durant l'exercice, mais également de suivre l'évolution de la tolérance de l'athlète à une charge externe. Si l'indice de charge interne est diminué dans des conditions similaires d'entraînement, pour une même charge externe, cela signifie que les capacités physiques de l'athlète sont améliorées. En revanche, si ce même indice augmente, cela suggère un état de fatigue de l'athlète ou d'une diminution de ses capacités physiques (Impellizzeri et al. 2019). La combinaison d'un indice physiologique et d'un indice psychologique permet également de se renseigner sur l'origine potentielle de la fatigue d'un athlète : une fatigue physiologique musculaire peut provoquer une augmentation de la FC et de la sRPE alors qu'une fatigue mentale provoque seulement une augmentation de la perception de l'effort. (Marcora 2009) (Marcora 2009).

iv. Performances fonctionnelles et spécifiques

Type de performance		Tests utilisés
Force explosive et puissance	Membres supérieurs	• Lancer de balle (médecine-ball) • Développé-couché
	Membres inférieurs	• Tests de détente verticale • Squat jump (SJ), contre mouvement jump (CMJ), Drop jump (DJ) • Plateforme de force • Test d'agilité • Capacité à changer de direction
Couple de force maximal		• Charge maximale (1-RM) au développé-couché

Capacité anaérobie **Habileté à répéter des sprints**	• Test RSA (Habileté à répéter des sprints) : 5-10 répétitions sur 20-40m (récupération : 10-30 sec)
Capacité aérobie	• Test spécifique incrémental : TEST, Baiget test, Girard Test, Hit & Turn Tennis Test
Vitesse	• Tests de sprints (5, 10, 20 m)
Indices spécifiques du tennis	• Vitesse, précision de la balle • Déplacements, temps effectif de jeu (TEJ)

Tableau 4. Principaux indices de quantification de la performance au tennis

Les paramètres fonctionnels correspondent à une capacité physique qui dépend d'un ou plusieurs systèmes physiologiques altérés. Il est alors évident que le marqueur fonctionnel de la fatigue/récupération ne sera pertinent que s'il représente une qualité physique fortement sollicitée dans la discipline. L'ensemble des marqueurs fonctionnels seront décrits dans les chapitres décrivant la charge et la fatigue spécifiques au tennis. Néanmoins, les plus couramment utilisés sont les paramètres de force (pic de couple de force mesuré lors d'une MVC, taux de montée en force (RFD)), les paramètres de puissance développée lors de différents mouvements (CMJ, SJ, DP), et les paramètres de vitesse (sprints sur 5, 10, 20 m) (Girard et al. 2006) (Ojala and Hakkinen 2013) (Girard et al. 2008) (Gescheit et al. 2015) (Gomes et al. 2014). Pour la mesure des capacités physiques en sprint, la distance la plus pertinente est de 5 m, étant données les courtes distances parcourues à vitesse élevée au tennis (Martínez-Gallego et al. 2013) (Ferrauti et al. 2003). Dans le cadre du tennis, les performances spécifiques correspondent également à l'ensemble des facteurs déterminants lors d'un match. Ces indices sont également décrits dans les chapitres suivants mais nous comptons principalement la vitesse et la précision des balles (services, frappes), les déplacements, le temps effectif de jeu.

v. Perceptifs

Alors que la fatigue est très largement d'origine physiologique, il est désormais bien démontré que la dimension psychologique est tout aussi importante. Dans le cadre du continuum fatigue-récupération, les stress dits « non liés à l'entraînement », faisant référence à l'état émotionnel ou à des facteurs sociaux, peuvent également jouer un rôle important. Ainsi, pour une même charge d'entraînement, il est possible que les réponses de l'athlète (ie. fatigue) diffèrent d'une période à l'autre, en raison d'un stress qui serait extérieur à l'entraînement (Kentta and Hassmen 1998). Pour cette raison, la perception de l'athlète vis-à-vis de son état physique et de sa capacité à performer joue un rôle important dans sa capacité à récupérer de la fatigue consécutive à une charge d'entraînement. Ainsi, la perception de l'athlète a pris une place importante ces dernières années notamment grâce aux études menées sur les symptômes de surmenage (Kentta and Hassmen 1998) (Meeusen et al. 2013). Ces études ont démontré que ce type de symptômes était systématiquement associé à des états psychologiques altérés (humeur modifiée, dépression) mesurés à l'aide de questionnaires perceptifs d'auto-évaluation des athlètes (Saw et al. 2016) (Kellmann and Beckmann 2017) (Meeusen et al. 2013). Ces mesures sont depuis utilisées dans le suivi de la fatigue non symptomatique. Par ailleurs, les mesures de perception sont sensibles à la charge d'entraînement mais également prédictives des performances (Thorpe et al. 2016) (Govus et al. 2018) (Saw et al. 2016). Cependant, aucun consensus n'existe encore sur les facteurs affectant la fatigue perçue, même si son évaluation est devenue indispensable dans le suivi de la fatigue et de la récupération en réponse à la charge d'entraînement.

Majoritairement la mesure de la fatigue subjective s'effectue par le biais des questionnaires psychométriques ou d'auto-évaluation qui permettent de faire état de la perception de l'état de récupération/fatigue d'un athlète (Kallus and Kellmann 2016). Ils proposent de mesurer simultanément l'état de récupération et le niveau de stress de l'athlète. Plus précisément, les résultats de ces questionnaires rendent compte des facteurs physiques, psychologiques et émotionnels au travers de la perception de l'athlète pour déterminer l'état de fatigue/récupération de manière intégrée. De

nombreux avantages sont associés à l'utilisation de ce type de questionnaire : ils sont faciles à appliquer, rapides et permettent une évaluation globale de la récupération/fatigue. (Kellmann and Beckmann 2003). Aujourd'hui, plusieurs questionnaires, développés spécifiquement pour le sport de haut-niveau sont disponibles : RESTQ-Sport, POMS (Kellmann and Beckmann 2017), MTDS (Main et al. 2016) ou encore l'ARSS ou le SRSS (Nässi et al. 2017). Ces questionnaires validés permettent une évaluation multidimensionnelle de la fatigue/récupération au travers de nombreuses échelles perceptives. Par exemple, le questionnaire RESTQ-Sport comprend 76 items différents. Dans le contexte d'une quantification régulière et/ou quotidienne, la sélection d'un nombre restreint d'échelles de perception est alors largement acceptée de manière à obtenir l'adhésion des athlètes et par conséquent la reproductibilité et fiabilité des données récoltées (Coutts et al. 2018; Kellmann and Beckmann 2017).

L'échelle visuelle analogue de perception des douleurs musculaires est sans doute l'outil de mesure subjective le plus utilisé pour évaluer l'état de fatigue/récupération d'un athlète. En effet, la perception des douleurs musculaires permet de mesurer indirectement la présence de dommages musculaires induits par l'exercice. Sur une échelle de 0 à 10 cm (0,1 cm de précision), l'athlète note son niveau de perception à l'aide d'une borne qualitative présente à chaque extrémité (0 correspond à l'absence de douleurs musculaires et 10 correspond d'importantes douleurs musculaires). L'équipe de Williamson and Hoggart (2005) a démontré la fiabilité et reproductibilité de cette échelle ainsi qu'une sensibilité élevée aux variations de douleurs musculaires. Le questionnaire de Hooper (Hooper et al. 1995), incluant un item de perception des douleurs musculaires ainsi que trois autres variables déclaratives (fatigue, stress, qualité de sommeil) apparaît comme un questionnaire d'auto-évaluation rapide et simple à mettre en place. À l'instar de la majorité des questionnaires, celui-ci a été développé initialement pour détecter les signes et symptômes associés au surmenage. Depuis, son utilisation a dépassé ce cadre et a été également validé par ce même auteur comme un outil de quantification subjective de la fatigue dans le cadre du suivi de l'entraînement. Les paramètres subjectifs de ce questionnaire ont été corrélés avec

certains marqueurs objectifs, reflétant des modifications physiologiques induites par l'exercice (concentration en catécholamine, numération des leucocytes) (Hooper et al. 1995). Ils peuvent être également prédictifs de certains indices de performance (Hooper et al. 1995).

Pour conclure, il est important de rappeler que la période durant laquelle l'indice est mesuré est primordiale. Pendant l'exercice (match ou entraînement), l'indice correspondra à un indice de charge (interne ou externe) qui peut également, dans certains contextes, être utilisé comme un indice de performance. Mesuré après l'exercice, en comparaison avec une valeur mesurée avant l'entraînement, l'indice correspondra à un indice de l'état de fatigue/récupération.

Conclusion

L'apport des modèles théoriques de l'entraînement et de la physiologie de l'exercice nous permet de nous rendre compte de la variabilité des facteurs déterminant la performance. Il est actuellement nécessaire de comprendre, d'analyser et d'intégrer l'ensemble des facteurs et contributeurs de la performance dans le but de l'optimiser. Dans ce contexte, la récupération, dont l'évolution dépend de l'état de fatigue, est un facteur clef. Son optimisation, consistant à minimiser la fatigue et/ou accélérer sa disparition, n'est possible qu'en étudiant les interactions existantes entre les paramètres suivants :

- La charge d'entraînement, reflétant le stress spécifique induit par l'exercice (Chapitre 2)
- L'ensemble des systèmes psychophysiologiques à l'origine de la fatigue (Chapitre 3)
- L'impact de ces deux derniers sur les performances (Chapitre 4, Récupération)

Charge spécifique en tennis de haut-niveau

Avant de définir les fatigues induites par la pratique du tennis de haut niveau (Chapitre 3) et les techniques de récupération visant à les atténuer (Chapitre 4), il apparaît important de présenter l'activité spécifique et les différents stress imposés aux joueurs lors d'un match ou d'un entraînement de tennis. Cette partie vise à décrire le profil de l'activité dans son ensemble, la nature, les facteurs de variabilité qui influencent la relation entre les charges de travail (externes, internes) imposées aux joueurs de tennis, conformément aux définitions et concepts présentés dans le Chapitre 1 de cette revue de littérature. Dans la mesure du possible, nous porterons notre attention sur les données provenant d'une population élite (lorsqu'elles sont disponibles) dont les conditions et contraintes de pratique sont (i) spécifiques par nature ; (ii) nécessitent un suivi et une planification précis de la charge d'entraînement ; (iii) sont de nature à exacerber l'importance des effets de la récupération sur la performance.

1. Profil de l'activité du joueur de tennis

Le tennis est une activité intermittente à dominante anaérobie nécessitant une capacité aérobie importante (Kovacs 2006, 2007; Baiget et al. 2015; Hornery et al. 2007; Smekal et al. 2001). Les frappes et les déplacements au cours d'un match sont associés à des mouvements rapides et explosifs nécessitant une production rapide d'ATP par les filières anaérobies (système phosphagène et glycolytique, Chapitre 1) (Kovacs 2007). En parallèle, le tennis est également considéré comme une activité d'intensité modérée compte tenu de la prédominance du système oxydatif (filière aérobie) durant la période entre les points (Bergeron et al. 1991; Kovacs 2007). Au cours de cette période, le système oxydatif prédomine par rapport au système glycolytique pour fournir l'énergie nécessaire sous forme d'ATP régulant ainsi la conversion du pyruvate en lactate, son oxydation locale au sein du muscle et de limiter son accumulation (Smekal et al. 2001; Baiget et al. 2015; Bergeron et al. 1991). La sollicitation de cette filière permet alors aux joueurs de récupérer entre les points et de limiter l'installation de la fatigue tout au long d'un match (Kovacs 2006; Smekal et al. 2001). Le caractère intermittent de l'activité est par conséquent associé à des intensités d'exercice variables, en fonction de la temporalité du jeu mais également des types d'actions effectués. Ainsi, il est démontré une variabilité des valeurs de consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$) et de fréquence cardiaque

(FC) au cours d'un match ou d'un entraînement spécifique (Baiget et al. 2015; Bekraoui et al. 2012). Outre cette demande physiologique, le tennis est également associé à des contraintes biomécaniques et neuromusculaires importantes.

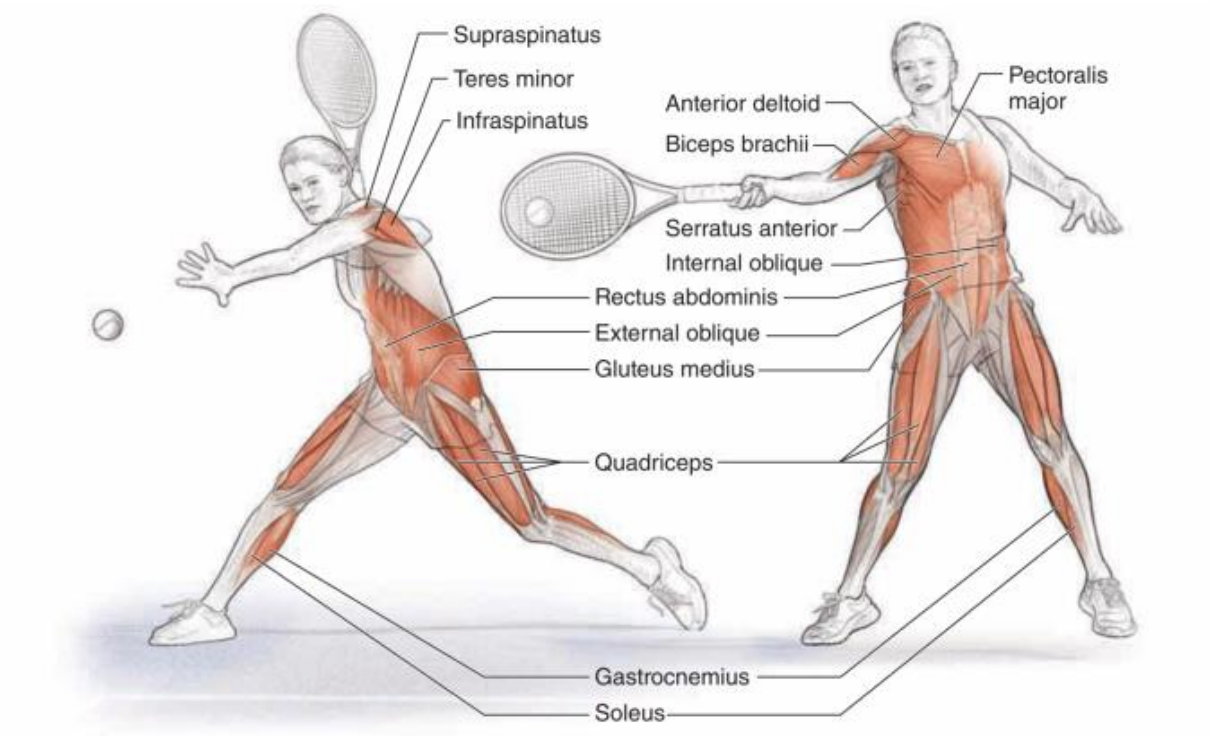


Figure 10. Muscles impliqués dans le mouvement de coup droit en appui ouvert (Roetert and Kovacs 2019)

En effet, la performance d'un joueur dépend de sa capacité à répéter de nombreux mouvements explosifs durant lesquels la plupart des groupes musculaires sont impliqués (Fernandez et al. 2006). En dehors des contraintes biomécaniques associées aux frappes, la performance du joueur dépend en premier lieu de sa capacité à se préparer puis de se déplacer afin de se positionner correctement pour frapper la balle de manière la plus efficiente possible (Roetert and Kovacs 2019; Mendez-Villanueva et al. 2007a). De la même manière, ces capacités explosives de déplacements sont primordiales lorsque le joueur doit retrouver une nouvelle position sur le court après la frappe (Murphy 2015). Ainsi, les membres inférieurs sont largement sollicités lors des multiples phases d'accélérations, décélérations et changements de direction et mouvements aériens répétés au cours d'un match de tennis (Fernandez-Fernandez et al. 2009). Durant les frappes, la plupart des groupes musculaires sont mis en jeu nécessitant des gammes de puissance et de force étendues (Botton et al. 2011) (Figure

10, Figure 11). L'étude de Johnson et al. (2006) indique que les coups majoritairement frappés lors d'un match sont le service (29,2%), le coup droit (25,6%) et le revers (22,6%). Les muscles du bras dominant sont plus majoritairement sollicités lors des frappes alors que les muscles des membres inférieurs sont sollicités de manière similaire (Roetert et al. 2009). Lors d'une frappe, l'interaction entre les jambes et la surface du court génère une force de réaction au sol. Ensuite, cette force est en partie restituée puis transférée des pieds jusqu'à la tête de raquette (Martin 2018; Elliott 2006). La performance (i.e. vitesse) de la frappe résulte alors de la somme des forces produites et transférées par la chaîne cinématique proximo distale et dépend alors d'une bonne coordination entre les différents segments inférieurs et supérieurs (Elliott 2006; Fernandez-Fernandez et al. 2016). Lors du service (Figure 11) comme lors d'un coup droit (Figure 10), les phases de flexion (préparation) et d'extension (accélération) des membres inférieurs sont associées à la contraction des gastrocnémiens, soléaires, quadriceps, fessiers et rotateurs de la hanche afin d'initier le transfert vers l'avant de la hanche. La phase d'atterrissage (accompagnement) correspond à la décélération du corps du joueur et de la raquette et est associée à la contraction des gastrocnémiens, soléaires, quadriceps et glutéaux, permettant alors au joueur de se replacer avant d'enchaîner avec la frappe suivante (Roetert et al. 2009; Martin 2018). Que cela soit lors des déplacements sur le court ou lors des frappes, la majorité des efforts au tennis impliquent le cycle « étirement-raccourcissement » (Mendez-Villanueva et al. 2007a). L'exploitation de l'énergie provenant du cycle « étirement-raccourcissement » est d'autant plus efficiente que les mouvements produits sont rapides et explosifs. La capacité de force explosive est notamment conditionnée par des facteurs nerveux comme un haut taux de recrutement des unités motrices des fibres des muscles synergistes (Mendez-Villanueva et al. 2007a; Martin 2018).

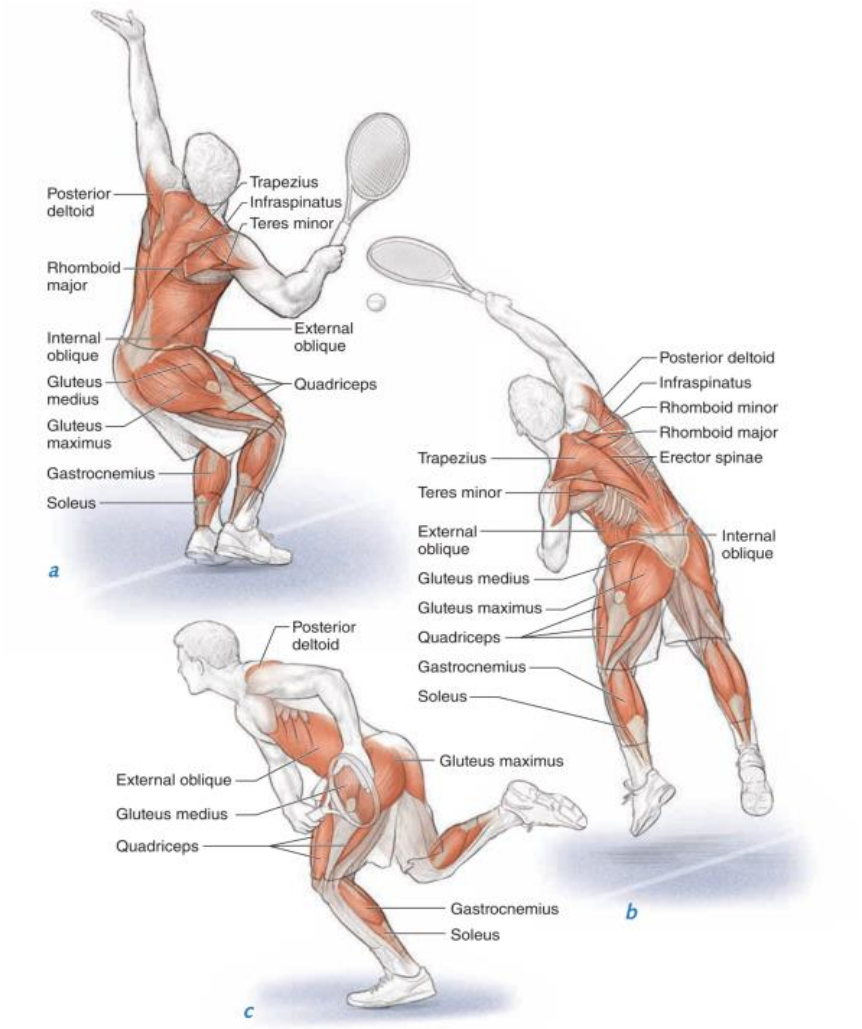


Figure 11. Muscles impliqués au service (Roetert and Kovacs 2019)

Le profil présenté ci-dessus décrit l'activité et la demande physiologique et biomécanique globale du tennis, mais celui-ci est soumis à une forte variabilité spécifique à l'activité du tennis qui sera décrite dans les parties suivantes.

2. Caractéristiques d'une saison professionnelle : planification de l'entraînement et des périodes de compétition

Les règles s'appliquant actuellement au classement mondial demandent aux joueurs de tennis de défendre leurs points durant la plus grande partie de la saison. Ce cadre réglementaire leur impose mécaniquement de participer à un nombre conséquent de compétitions (Figure 12 : 28 semaines de compétitions). En l'absence de blessures, la saison débute fin décembre pour s'achever en novembre de l'année suivante. Durant cette période de 11 mois, les circuits professionnels masculins et féminins proposaient

au total en 2019 respectivement 63 tournois dans 31 pays différents (ATP) et 71 tournois dans 27 pays différents (WTA). Quel que soit le niveau du circuit de compétition (i.e. circuit junior, challenger), la densité et l'enchaînement des compétitions est similaire (Reid et al. 2009).

La planification d'une saison est construite autour des spécificités du tennis de haut-niveau comprenant le développement des différentes qualités physiques, tactiques et psychologiques (Kovacs 2018). Même si celle-ci est propre à chaque athlète (âge, sexe, niveau), la planification annuelle respecte malgré tout quelques principes fondamentaux. Notamment, il est nécessaire d'équilibrer sur une saison (macrocycle) les périodes de travail et de récupération autour de différentes périodes de préparation appelées mésocycle (période d'un ou plusieurs mois), contenant plusieurs microcycles (~7 jours) (Bompa and Haff 2009) (Kovacs et al. 2007). Cette organisation est guidée par l'idée permanente de faire coïncider les pics de performance à l'approche ou durant les périodes de compétition. Classiquement, il est conseillé de répartir les périodes de travail selon le ratio suivant : 40-60% de périodes d'entraînements, 60-40% de périodes de compétition (Kovacs 2018). Mais contrairement à d'autres disciplines (boxe, gymnastique) dont la saison est organisée selon deux ou trois compétitions majeures durant une saison, celle d'un joueur de tennis professionnel ne permet pas de mettre en place une planification classique de type *planification linéaire* (Bompa and Haff 2009). En effet, la densité des périodes de compétition (Figure 12) et l'incertitude de la fin d'un tournoi nécessitent des ajustements permanents.

Par conséquent, une *planification par blocs* (i.e. accumulation de « blocs » sur plusieurs semaines ayant pour objectif de développer une qualité physique après l'autre en variant les volumes et l'intensité des entraînements) (Issurin 2010) ou *planification ondulée* (i.e. les qualités physiques sont développées en parallèle via l'alternance des charges d'entraînement d'une ou deux semaines à l'autre) (Hartmann et al. 2015) (Kovacs 2018) (Kraemer et al. 2003) sont privilégiées. Ces types de planification permettent une plus grande liberté dans la variation des intensités et des volumes d'entraînement de qualités ciblées au sein d'une semaine ou d'une journée

d'entraînement (Martin 2018). C'est particulièrement intéressant en période de compétition, afin d'ajuster les contenus en fonction des résultats du joueur.

Durant cette période, les temps dédiés à l'entraînement sont restreints (Figure 3 : 10 périodes pré-compétitives et 7 semaines d'entraînement préparatoire), diminuant par la même occasion la possibilité pour les joueurs de récupérer durant plusieurs jours (Figure 12 : période de repos/récupération : 7/8). Il est donc nécessaire d'accorder une attention toute particulière aux périodes courtes dédiées à la récupération entre les entraînements ou les compétitions. Le choix des techniques utilisées aura aussi un rôle important pour permettre aux joueurs de récupérer plus rapidement. Ainsi, une période de repos de deux jours est par exemple recommandée pour une période incluant au moins 16h d'entraînement (Kovacs 2018). Cependant, l'utilisation de techniques de récupération adaptées peuvent, selon le contexte, raccourcir cette période (Chapitre 1, Figure 7). Cette dernière constatation renforce la nécessité d'accorder de l'importance au choix des techniques de récupération, mais également de mieux comprendre les effets des techniques de récupération dans le cadre de la pratique de tennis de haut-niveau pour améliorer leur prescription. Les nombreuses études effectuées jusqu'à aujourd'hui sur le profil d'activité d'un match de tennis s'intéressent principalement aux caractéristiques temporelles et aux réponses physiologiques associées tandis que peu de données sont encore disponibles quant aux caractéristiques spatiales et gestuelles pourtant nécessaire afin de quantifier la charge mécanique et les réponses physiologiques associées. Ces informations sont d'autant plus importantes que le tennis a évolué ces 10-15 dernières années d'un sport à dominante technico-tactiques vers une activité imposant une demande physique importante (Hoppe et al. 2014; Ponzano and Gollin 2017).

Type de période	Objectifs	Durée conseillée
Période préparatoire générale et préparatoire spécifique	**1ère phase** - Fondations physiques : entraînement aérobie et en force - Amélioration de certaines aptitudes techniques et/ou tactiques spécifique au tennis **2ème phase** - Augmentation de l'intensité des entraînements (volumes modérés) - Développement de qualités physiques plus spécifiques : vitesse, puissance, agilité	6 à 8 semaines
Période pré-compétitive	- Augmentation de l'intensité et diminution du volume des entraînements - Maintien des qualités physiques acquises : aérobie, force - Entraînements physiques plus spécifiques au tennis : focalisation sur les qualités de puissance/vitesse (plyométrie) ou de la filière énergétique anaérobie - Proportion d'entraînements de tennis augmentée par rapport aux entraînements physiques - Amélioration habiletés techniques et tactiques au tennis : schémas de jeux, matchs d'entraînement	
Période compétitive	- Maintien des qualités physiques - Entraînements spécifiques adaptés en fonction du nombre, durée des matchs (intensité élevée et volume faible)	20 à 30 tournois 80-100 matchs
Période de récupération/repos	- Maintien des capacités physiques - Arrêt des entraînements de tennis	1 à 4 semaines

Tableau 5. Description du contenu et de la durée des différentes périodes d'entraînement et de compétition pour un joueur de tennis professionnel.

Figure 12. Exemple de planification annuelle pour un joueur de tennis âgé de 21 ans, classé aux alentours de la 205ème place mondiale ATP lors de la saison 2015

3. Charges de travail associées aux périodes de compétition

Nous avons décrit dans la partie précédente la complexité de la planification des entraînements et des périodes de compétition liée à l'imprévisibilité d'une saison de compétition sur le circuit professionnel. Il en est de même à l'échelle d'un match pour lequel il est difficile de caractériser l'activité à partir de données stables. En effet, la diversité des formats de compétition proposés, les règles du jeu et un certain nombre de facteurs externes rendent très variables les caractéristiques temporelles, spatiales et gestuelles propres à un match de tennis. Nous le verrons tout au long de cette partie, mais de nombreux facteurs peuvent influer sur les caractéristiques temporelles d'un match de tennis : parmi les principaux, nous avons l'âge, le genre, la surface sur laquelle le match est disputé, le style de jeu, les conditions environnementales ou encore la stratégie adoptée par les deux adversaires (Murphy 2015). Le tennis étant un sport d'opposition, la nature et l'intensité de la charge mécanique dépendent également de la relation entre les adversaires et ne peuvent donc être strictement standardisées à contrairement aux sports dits "fermés" consistant par exemple à couvrir une distance donnée le plus rapidement possible. La différence homme/femme, notamment dans le cas des Grands Chelems, pendant lesquels les matchs se déroulent respectivement en trois sets gagnants chez les hommes contre deux sets gagnants chez les femmes représente un facteur d'influence majeur des caractéristiques du jeu.

1. Charge externe

i. Fréquence des matchs

Lors d'une période de compétition, la fréquence des matchs dépend en premier lieu des performances du joueur, dans la mesure ou la participation au tour suivant dépend du résultat du match précédent. Dans le cas où le joueur perd dès le premier tour d'un tournoi, hormis sa participation dans le tableau de double de la compétition, le joueur attendra la semaine suivante pour jouer de nouveau un match. A l'opposé, lors d'un tournoi en deux sets gagnants, le vainqueur aura dû jouer cinq à six matchs en sept jours. Lors d'un tournoi du grand chelem (i.e. trois sets gagnants), le vainqueur doit

gagner sept matchs sur une période pouvant durer 12 à 14 jours (Whiteside et al. 2017). Avant d'arriver en finale, le joueur aura ainsi joué sept matchs (2-4h) espacés d'un maximum de 48h (Reid and Duffield 2014) pendant laquelle, il alternera les périodes de repos, d'entraînement, de récupération et de soins en plus des autres activités inhérentes à son statut de joueur professionnel. Cette organisation très dense du circuit professionnel principal est également retrouvée sur le circuit professionnel junior (Reid et al. 2009).

ii. Caractéristiques temporelles

Les formats de compétition, les règles régissant le gain d'un jeu, d'un set et d'un match au tennis ne permettent pas de rendre compte de données temporelles fixes. Au cours d'une saison, les joueurs participent majoritairement à des rencontres en deux sets gagnants pour lesquelles une durée moyenne d'une heure et demie est souvent rapportée dans la littérature (Bergeron et al. 1991) (Kovacs 2006) (Kovacs et al. 2007). Lors d'une rencontre suivant ce type de format, une durée de match de plus de 2 h est considérée comme longue. Lors de matchs en trois sets gagnants (Grand Chelem et Coupe Davis jusqu'en 2018), les données actuelles rendent compte d'une durée moyenne de match en trois sets gagnants se situant aux alentours de 2h-2h30 (la littérature rapporte des valeurs compris entre 1h et 5h) (Martin 2018; Girard et al. 2008) (Mendez-Villanueva et al. 2007b) . Ainsi il a été rapporté que les femmes jouaient 72 min de moins que les hommes lors de l'édition 2005 du tournoi de Wimbledon (Morante 2005) (P and Ingram 2001).

Le **temps effectif de jeu** (TEJ, % du temps total durant lequel la balle est en jeu sur la durée totale du match) est également un indice temporel clef d'un match de tennis. Celui-ci varie entre 10 et 15 % sur les surfaces les plus rapides (i.e. gazon ou surface dure pratiquée en intérieur) à des valeurs entre 20-30% sur les surfaces les plus lentes comme la terre battue (Fernandez et al. 2006) (Kovacs et al. 2007; Fernandez-Fernandez et al. 2009) (Mendez-Villanueva et al. 2010). Plus précisément, les travaux de Mendez-Villanueva et al. (2007b) décrivant les caractéristiques temporelles d'un match de tennis

en trois sets gagnants lors d'un tournoi masculin, déterminent à 21,5 ± 4,9 % le TEJ (entre 13,8% et 28,6%). Le style de jeu est un facteur de variabilité important de cet indice (Smekal et al. 2001) et il est établi que le TEJ se situe aux alentours de 20% pour tous les styles de joueurs (Docherty 1982) sur une surface de terrain en dur. Contrairement à la durée d'un match, il n'a pas été démontré jusqu'à ce jour de différence significative sur le TEJ liée au genre.

La seule durée relativement fixe lors d'un match de tennis correspond au temps de récupération (points, jeux, sets) qui est imposé par les règles de la Fédération Internationale de Tennis (ITF) et il est proposé qu'une seconde d'effort (i.e. points) est associée à un temps de repos variant de 1,7 à 3,4 s (Martin 2018). Ainsi, le **ratio effort/récupération** se situe aux alentours de 1:2 avec des valeurs pouvant atteindre entre 1:3 et 1:5 environ en fonction du type de surface (Kovacs 2007).

La **durée moyenne d'un point** est également variable, notamment en fonction de la surface (Kovacs 2006) : celle-ci varie de 3 s sur les surfaces les plus rapides (durée moyenne respectives chez les hommes et femmes : 6,7 ± 2,2 s et 8,2 ± 5,2 s) et jusqu'à 15 s sur les surfaces les plus lentes (Kovacs 2006). La durée moyenne se situe entre 6 et 8 s (Kovacs 2007). Des études précédentes mettent en avant des différences entre les hommes et les femmes mais globalement, la durée d'un point n'excède jamais les 10 s. Ainsi, il a été montré que 74% des points joués lors d'un tournoi masculin sur terre-battue durent entre 1 et 9 sec et que chez les femmes cette statistique s'élève à 66% (Fernandez-Fernandez et al. 2008) (Mendez-Villanueva et al. 2007b).Enfin, il est démontré que la durée des échanges peut également être impactée par le style de jeu du joueur avec une durée d'échange diminuée lorsque les joueurs sont des attaquants alors que cette durée est plus importante dans le cas de joueurs défensifs (Smekal et al. 2001).

iii. Caractéristiques gestuelles

Nous avons vu précédemment que les frappes sont associées à des contraintes physiologiques et biomécaniques importantes. Ainsi, le nombre, la rapidité et la

fréquence auxquelles sont exécutées les frappes lors d'un point sont de bons indicateurs de charge externe, permettant notamment de rendre compte de l'intensité du jeu (Martin 2018). Lors d'un match, le nombre de points par jeu est fixé aux alentours de 6,3 chez les hommes contre 6,6 points chez les femmes (Dansou et al. 2001). On comptabilise environ 2,5 à 3 frappes par point (Ferrauti et al. 2003) pour un total pouvant aller jusqu'à 1100 frappes par match (Reid and Duffield 2014) dans les matchs les plus longs. Plus précisément des études mettent en avant que 58% des points contiennent 1 à 3 frappes alors que 28% nécessitent 3 à 4 frappes (Fernandez-Fernandez et al. 2008; Mendez-Villanueva et al. 2007b). Alors que la fréquence des frappes semble relativement similaire entre les hommes et les femmes (Fernandez-Fernandez et al. 2008; Mendez-Villanueva et al. 2007b), l'étude de Johnson et al. (2006) a mis en évidence un nombre de frappes/jeu plus élevé sur terre battue (21) que sur dur (17,9) ou gazon (16) lors des tournois du Grand Chelem, avec une différence notable entre le jeu de service et le jeu de retour (e.g. 21 frappes/jeu au jeu de service contre 14,8 au jeu de retour lors du tournoi de Roland Garros). La fréquence de frappe des joueurs professionnels est environ de 42 à 55 frappes par minute lors du temps de jeu effectif (Martin 2018). Cette donnée peut varier fortement en fonction du style de jeu du joueur : un attaquant va frapper environ 47 frappes/min contre 43 frappes/min pour un défenseur.

iv. Caractéristiques spatiales

Tout comme les frappes, la fréquence, la nature et la vitesse des déplacements au tennis associés à des mouvements explosifs peuvent largement impacter les réponses physiologiques et/ou biomécaniques du joueur pendant ou après un match. Ainsi, l'ensemble des indicateurs liés aux déplacements sur le court lors d'un match sont importants à quantifier et il s'agit là des principaux indicateurs de charge dite externe qui sont également utilisés dans la plupart des disciplines intermittentes (football, rugby) (Rampinini et al. 2015) (Vickery et al. 2014). Au cours d'un match, un joueur effectue de 300 à 500 efforts à haute intensité (Fernandez et al. 2006). Alors que la surface du court est un facteur de variabilité important (Hornery et al. 2007), le joueur

change en moyenne de 3 à 5 fois de direction au cours d'un point (Roetert and Kovacs 2019). Ce nombre peut alors atteindre 500 lors d'un match entier (Roetert and Kovacs 2019). Concernant la nature des déplacements, les travaux de Weber (2007) rapportent que 70% des déplacements sont latéraux alors que les déplacements avant/arrière correspondent à moins de 20% et 8% respectivement. Les dimensions relativement restreintes du court de tennis impliquent que les joueurs de tennis effectuent ces déplacements et/ou changements de direction sur des distances relativement faibles puisque la distance parcourue lors d'une frappe est d'environ 2,5-3m pour un total de 8-12m par point (Reid and Duffield 2014; Ferrauti et al. 2001a). Ainsi, un joueur parcourt environ 600-800m par set (Reid and Duffield 2014) et entre 3 et 3,5 km par match (Pereira et al. 2017; Hoppe et al. 2014) (Fernandez-Fernandez et al. 2009). L'ensemble de ces dernières données sont issues de simulations de matchs ou de matchs officiels sur terre battue tandis qu'une seule étude a enregistré ces paramètres sur une surface dure lors des éditions 2012 à 2014 de l'Open d'Australie (Reid et al. 2016). Celle-ci rapporte des distances parcourues relativement similaires lors d'un point (9m) mais plus faibles sur l'ensemble d'un match (≈2km) (Reid et al. 2016). Dans cette même étude, des différences hommes/femmes sont mécaniquement retrouvées puisque les hommes parcouraient une distance 42% plus élevée que les femmes. De manière intéressante, des récentes études ont mis en évidence que les perdants parcourent en moyenne plus de distance que les vainqueurs : 2 à 3 m de plus par point en moyenne à des allures plus rapides (Reid et al. 2016; Martínez-Gallego et al. 2013). Les allures de course lors d'un match de tennis sont relativement modérées compte tenu des dimensions du court qui restreignent les distances de sprints entre 5 et 10 m sans atteindre des vitesses maximales (Ponzano and Gollin 2017; Reid et al. 2008; Hoppe et al. 2014). Ainsi 90% des déplacements se font à des vitesses modérées (Pereira et al. 2017) qui se situent entre 40 et 70% de la vitesse maximale des joueurs (7 – 13 km/h) (Ponzano and Gollin 2017). Le tennis ne peut cependant pas être classé comme une activité à intensité modérée, compte tenu des nombreux déplacements explosifs effectués sur les courtes distances (Hoppe et al. 2014). De récentes études suggèrent qu'il est plus judicieux de quantifier la charge externe biomécanique via la mesure de la quantité d'accélérations et décélérations effectuées durant un match (Pereira et al. 2017) (Hoppe et al. 2014). Au

cours d'un match d'1h10 l'équipe de Ponzano and Gollin (2017) rapporte joueurs de tennis effectuent environ 157 accélérations pour 245 décélérations sur terre battue et environ 139 accélérations pour 319 décélérations sur une surface dure (Ponzano and Gollin 2017) par match. Le tennis se caractérise alors par la succession de mouvements très intenses comportant des accélérations et décélérations à des vitesses relativement modérées sur des courtes distances.

1. Charge interne

Lors d'un match, la réponse psychophysiologique du joueur dépend de la charge externe qui lui est imposée et donc de la nature, la durée de chacune des actions spécifiques (frappes et déplacements) effectuées (Ferrauti et al. 2001b). Dans la partie précédente nous avons mis en évidence l'extrême variabilité de ces actions associées induites par des facteurs comme le format de la compétition et du match, de la surface du court, mais également d'autres paramètres comme le genre du joueur ou le style de jeu (Bekraoui et al. 2012; Botton et al. 2011; Fernandez et al. 2006; Fernandez-Fernandez et al. 2009). Intrinsèquement, ces mêmes facteurs peuvent largement influencer et faire varier la demande fonctionnelle et physiologique, psychologique et neuromusculaires au cours d'un match de tennis (Fernandez et al. 2006). Enfin, d'autres facteurs externes comme les conditions environnementales, le statut hydrique du joueur, les facteurs psychologiques peuvent modifier les contraintes physiologiques, psychologiques et neuromusculaires imposées au joueur lors d'un match.

i. Sollicitation fonctionnelle et physiologique

La dépense énergétique au cours d'un match de tennis est d'environ 30,9 ± 5,5 $kJ.min^{-1}$ (443 kcal/h de match) chez une femme et de 45,3 ± 7,3 $kJ.min^{-1}$ (649 kcal/h de match chez un homme quelle que soit la surface). Jusqu'à récemment, la dépense énergétique et l'utilisation des substrats étaient indirectement déterminés relativement à la consommation maximale d'oxygène (VO2max) (Kovacs 2006). Une étude récente, associant l'analyse vidéo et un modèle de bioénergétique, estime la sollicitation

respective des systèmes phosphagène, glycolytique et oxydatif (Botton et al. 2011). Cette étude suggère que lors d'une frappe (service et coup de fond de court), l'énergie totale dépensée dépend à 95% du système phosphagène (ATP-PCr). La contribution du système phosphagène est de 30% lors d'un jeu contre 70% lors et d'un point. Lors d'échanges plus intenses, le système oxydatif peut suppléer ces derniers systèmes métaboliques dans l'apport d'ATP (Smekal et al. 2001) mais en dehors de ces moments à puissance maximale, le système oxydatif prédomine et permet une restauration partielle du système phosphagène (50% en 15 sec) (Murias et al. 2007) lors des moments de récupération (ie. entre les points et changements de côté). Concernant les substrats énergétiques utilisés par les systèmes métaboliques, l'équipe de Ferrauti et al. (2001a) montre que l'énergie produite provient de 70 à 80% de l'utilisation de substrats glucidiques (activité glycolytique et glycogénolytique). Avec l'augmentation du temps de jeu au cours d'un match, les substrats lipidiques seront de plus en plus utilisés pour atteindre jusqu'à 40% lors d'un 3ème set (Martin 2018) (Struder et al. 1998).

- **Consommation d'oxygène**

Dans des conditions standardisées, lors de matchs simulés et plus récemment par le biais de tests adaptés à l'activité intermittente du tennis, les études mettent en évidence des valeurs de $\dot{V}O_2$max se situant respectivement chez les femmes et chez les hommes aux alentours de 45 $mL.kg^{-1}.min^{-1}$ et 55 $mL.kg^{-1}.min^{-1}$(Fernandez et al. 2006; Konig et al. 2001). Ces valeurs de référence permettent principalement de témoigner de l'importance de la capacité aérobie pour suppléer le système oxydatif lors d'un match de tennis (Fernandez-Fernandez et al. 2009). Peu de différences sont observées dans les valeurs de la $\dot{V}O_{2max}$ chez des joueurs de niveau régional ou international (Fernandez et al. 2006) et une étude récente sur des joueurs de tennis professionnels (femme, homme) rapportent une valeur moyenne de 56,5 ± 5,6 $mL.kg^{-1}.min^{-1}$ (Brechbuhl et al. 2016). Les études précédentes rapportent des valeurs de la $\dot{V}O_{2moy}$ ($\dot{V}O_2$ moyenne) comprises entre 50% et 60% de $\dot{V}O_2$max lors d'un match de tennis (Smekal et al. 2001) (Ferrauti et al. 2001a) (Murias et al. 2007) (Baiget et al. 2015).

- **Fréquence cardiaque**

Dans le cadre d'un match, la FC varie entre 140 et 160 bpm pour des valeurs relatives à la fréquence cardiaque maximale (FC_{max}) comprises entre 60 et 80% pour des joueurs professionnels (âge : 27 ± 4,4) (Mendez-Villanueva et al. 2007b). Ces valeurs sont plus élevées et peuvent atteindre 190 à 200 bpm correspondant à des valeurs proches de 100% de la FC_{max} lors de phases de jeu à haute intensité (sollicitations des membres supérieurs et inférieurs) et/ou lors de longs ou de rapides échanges (Fernandez et al. 2006) (Kovacs 2007). L'étude de Girard (Girard et al. 2006) rapporte une corrélation positive entre le TEJ et la FC au cours d'un match de tennis de 3h suggérant une dépense énergétique proportionnelle à la durée des échanges (TEJ, durée du point) confirmant alors des résultats similaires rapportés dans l'étude de Smekal et al. (2001). La FC est également sujette à variations en fonction des situations du joueur, ou du style de jeu (Hughes et al. 2002). Lors des jeux de service, le joueur est plus actif dans son jeu, notamment lors du service, ce qui est associé à des valeurs d'intensité plus élevées par rapport à un jeu de retour (Johnson et al. 2006) (Fernandez et al. 2006). La réponse cardiaque et les valeurs de FC associée doivent être interprétées de façon globale lors d'un match mais ne permettent pas de refléter précisément les contraintes physiologiques propre à l'activité intermittente du tennis. Contrairement à des valeurs de $\dot{V}O_2$ diminuée entre les points, la FC varie peu durant ces périodes de récupération, augmentant ainsi le ratio FC/ $\dot{V}O_2$ et pouvant surestimer la réponse physiologie et les sollicitations métaboliques (Novas et al. 2003; Fernandez et al. 2006). Enfin, la FC est également influencée par des facteurs externes comme le stress thermique lié aux conditions environnementales et le statut hydrique du joueur (Chapitre 1, origine cardiovasculaire de la fatigue) (Fernandez et al. 2006).

- **Lactatémie**

Lorsque celle-ci est évaluée en complément de ces deux derniers paramètres, la lactatémie peut également refléter l'intensité au cours des dernières minutes de l'exercice, puisque celle-ci permet d'approcher l'utilisation du système glycolytique (Mendez-Villanueva et al. 2007b) (Fernandez-Fernandez et al. 2009). Au tennis, des prélèvements de sang au niveau des capillaires des doigts ou de l'oreille sont

majoritairement effectués lors des changements de côté au cours d'un match de tennis. Dans la plupart des études, des valeurs relativement basses situant entre 2,0 et 3,8 mmol.Lsg^{-1} sont rapportées chez des joueurs professionnels (Mendez-Villanueva et al. 2007b) (Mendez-Villanueva et al. 2007b). Ces valeurs témoignent d'une accumulation modérée de lactate sanguin. Celle-ci limitée s'explique principalement par les temps de récupération entre les points et les jeux qui sont suffisants au système phosphagène pour resynthétiser partiellement les réserves en phosphocréatine, et limitent la sollicitation du système glycolytique (Martin and Prioux 2011). Cependant, l'intensité de l'effort et notamment la durée des échanges peuvent faire varier la concentration et l'accumulation de lactate sanguin au cours d'un match (Fernandez-Fernandez et al. 2009). Ces valeurs peuvent parfois atteindre 6 à 8 mmol.L^{-1} lors de phases de jeu intenses ou lors de matchs sur terre battue chez des joueurs de tennis professionnels (Martin and Prioux 2011) (Christmass et al. 1998). Les travaux de Ferrauti et al. (2001b) mettent également en évidence une accumulation de lactate plus importante et donc une sollicitation plus importante du système glycolytique lorsque les temps de récupération entre les échanges sont diminués (Ferrauti et al. 2001b). La sollicitation du système glycolytique semble également plus importante (e.g. corrélation positives entre les concentrations en lactate sanguin et la durée et le nombre des efforts, r=0,8) (Mendez-Villanueva et al. 2010) lorsque les échanges sont rallongés ou que la fréquence des frappes augmente, comme cela est observé sur les surfaces plus lentes comme la terre-battue (Mendez-Villanueva et al. 2010; Reid et al. 2013).

- **Perception de l'effort (RPE)**

Grâce à sa corrélation positive avec des marqueurs physiologiques de l'intensité de l'exercice (FC, $\dot{V}O_2$) la RPE est de plus en plus utilisée pour quantifier, de manière non-invasive, les contraintes psychophysiologiques lors d'un match de tennis (Mendez-Villanueva et al. 2007b; Mendez-Villanueva et al. 2010; Murphy 2015; Girard et al. 2008). Lorsque la perception de l'effort est évaluée via l'échelle sur 15 points de Borg (CR6-20) les études rapportent des valeurs lors de matchs réels se situant entre 11 et 14 et pouvant atteindre des valeurs extrêmes jusqu'à 17 (CR6-20) lors d'efforts plus intenses (Fernandez-Fernandez et al. 2009). L'échelle sur 10 points (CR10) est désormais plus

utilisée dans la littérature, les études rapportant des valeurs entre 4 (greenset) et 7 (terre-battue) (Gomes et al. 2013; Gomes et al. 2011; Gescheit et al. 2015; Coutts 2009). Bien qu'observé sur deux échelles différentes, Girard et al. (Girard et al. 2006) et Gomes et al. (Gomes et al. 2013) rapportent une augmentation progressive de la perception de l'effort au fur et à mesure de la progression du match. Enfin, l'équipe de (Mendez-Villanueva et al. 2007a) met en évidence une augmentation de la RPE (CR6-20) lorsque la fréquence de frappes et/ou de la durée des échanges sont plus élevées, ainsi que lors du jeu de service, reflétant une sollicitation métabolique et une perception de l'intensité physiologique plus importante (Mendez-Villanueva et al. 2007b).

ii. Sollicitations neuromusculaires

Alors que de nombreuses études existent à ce jour sur les contraintes physiologiques et la dépense énergétique associée, seulement quelques études se sont intéressées aux sollicitations neuromusculaires potentiellement associées aux déplacements spécifiques et explosifs effectués lors d'un match (Girard et al. 2006; Girard and Millet 2009; Girard et al. 2011; Ojala and Hakkinen 2013). La répétition de sprints et/ou déplacements spécifiques explosifs induisent pourtant une forte charge neuromusculaire interne mais aucun indice spécifique n'existe pour mesurer celle-ci dans des contextes réels de pratique (Impellizzeri et al. 2019). Seuls les indices spécifiques de charge externe (i.e. nombre de sprints et de leur vitesse d'exécution) représentent actuellement des indices valides des sollicitations neuromusculaires lors d'exercices intermittents. En 2006, l'étude de Girard et al. (2006) rapporte une augmentation des sensations de douleurs musculaires à partir d'une heure de match et ce, jusqu'à la fin du match (3h), corrélée avec une augmentation de la perception de l'effort, témoignant indirectement de ces contraintes (Girard et al. 2006). Les techniques de laboratoire d'évaluation de la fonction neuromusculaire, compliquées à mettre en place dans un contexte de pratique, plus particulièrement pour une population élite, ont été plus utilisées pour mesurer l'impact d'un match de tennis sur la fatigue et seront détaillées dans la partie suivante (Chapitre 3). En complément des résultats rapportés sur les sensations de douleurs musculaires, nous pouvons néanmoins rapporter qu'un

match de tennis induit une diminution progressive de l'activation centrale, à partir de 30 min de jeu, en réponse à l'apparition potentielle de dommages musculaires (Girard et al. 2006; Girard et al. 2008; Girard et al. 2011).

Caractéristiques temporelles

Durée d'un match : 1h30

Temps de jeu effectif :

- 10-15% (surface rapide)
- 20-30% (surface lente)

Ratio effort/récupération 1/2

Durée d'un point 6-8 s

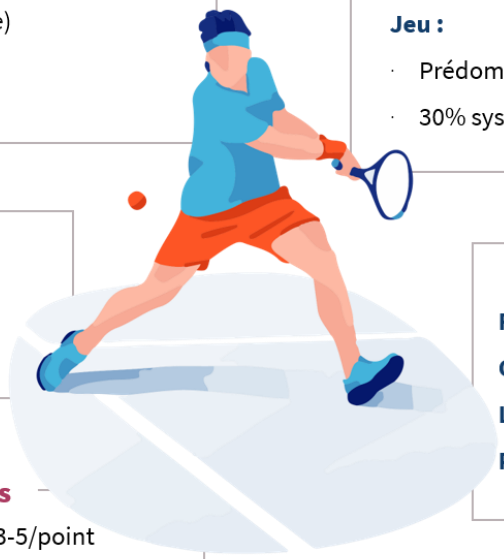
Sollicitations métaboliques

Frappe : 95% du système phosphagène

Point : 70 % du système phosphagène

Jeu :

- Prédominance du système oxydatif
- 30% système phosphagène



Caractéristiques gestuelles

Nombre de points par jeu : 6,3 – 6,6

Nombre de frappes/point : 2,5-3

Fréquence des frappes : 42 à 55 frappes/min

Sollicitations psychophysiologiques

Fréquence cardiaque: 60-80% FC_{max}

Consommation d'oxygène : 50% et 60% de $\dot{V}O_2max$

Lactatémie : 2,0 et 3,8 $mmol.L^{-1}$

Perception de l'effort : 4 à 7 (CR10)

Caractéristiques spatiales

Nombre de changements de direction: 3-5/point

Nombre d'efforts à haute intensité : 300-500

Distance parcourue:

- Match : 3 – 3,5 km
- Set : 600 – 800 m
- Point : 8-12 m
- Frappe : 2,5 – 3m

Nombre d'accélération/décélérations :

- 157/245 (TB)
- 139/319 (Dur)

Sollicitations neuromusculaires

↑Sensations douleurs musculaires
(match de 3h)

Figure 13. Résumé de la charge (externe, interne) induite par un match de tennis

4. Périodes d'entraînement

La diversité des séances proposées lors de périodes d'entraînement rend difficile une mesure précise et distincte aussi bien de la charge d'origine biomécanique que d'origine physiologique. La littérature est bien moins fournie à ce sujet, notamment lorsque l'on s'intéresse à une population élite.

1. Fréquence et durée des différents types d'entraînements

Lors d'une saison, un joueur de tennis dédie environ 40 à 60% de la saison aux périodes d'entraînement (Kovacs 2018). En moyenne, un joueur professionnel (junior, sénior) s'entraîne entre 15 et 20h par semaine(Kovacs 2018): la répartition entre l'entraînement purement physique et l'entraînement de tennis est quant à elle variable en fonction de l'objectif de la semaine d'entraînement (Tableau 5). Une journée d'entraînement est typiquement répartie sur deux ½ journées durant lesquels : 1 à 3 séances sont effectuées. La durée totale moyenne d'une journée d'entraînement se situe aux alentours de 3h/J, oscillant entre 1h/J et 4h/J. La quantification de la charge lors de ce type de période est non seulement importante dans le cadre du suivi de la tolérance aux charges de travail du sportif tout au long de la saison mais ces mesures sont également importantes pour évaluer le ratio entre ces charges et celles rencontrées lors d'une période de compétition (Murphy et al. 2016).

1. Demande psychophysiologique des entraînements de tennis

A ce jour, aucune donnée dans la littérature ne fait état de la demande physiologique, biomécanique ou psychologique lors de séances de préparation physique au tennis (Fernandez-Fernandez et al. 2015a). En revanche, de récents travaux se sont attachés à caractériser la demande psychophysiologique lors d'entraînements techniques et tactiques de tennis (Reid et al. 2008) (Murphy et al. 2014b) (Murphy et al. 2016) (Fernandez-Fernandez et al. 2015b; Fernandez-Fernandez et al. 2010; Reid et al. 2013).

- **Sollicitation fonctionnelle et physiologique**

Une étude de l'équipe de Fernandez-Fernandez et al. (2005) a déterminé la demande physiologique lors d'exercices de « gammes » : ces exercices prolongés ont pour but de travailler la régularité, la précision ou encore l'endurance. Au cours de deux exercices de 5 min, les joueurs devaient enchaîner 4 coups : le premier consistait en l'enchaînement de coups droits et le deuxième incluait l'enchaînement de deux coups droits croisés et deux revers long de ligne. La demande physiologique lors de ce type d'entraînement semblait similaire à celle décrite précédemment lors d'un match de tennis avec une sollicitation du système aérobie aux alentours de 60% de la $\dot{V}O_2$max, une FC moyenne de 169 bpm correspondant à 80% de la FC_{max}. Les travaux de Reid et al. (2008) sont les premiers à avoir quantifié et comparé simultanément la demande technique (distance parcourue, nombre frappes) et physiologique d'efforts intermittents de 30 et 60 s durant des exercices au panier : *Etoile, Boite, Suicide, Big X* (Méthodologie expérimentale). En termes de charge externe, le taux de frappes par minute était compris entre 9 frappes/min (exercices de 30 sec) et 24 frappes/min (exercices de 60 sec) et les joueurs parcouraient entre 34 et 114 mètres à des vitesses comprises entre 1,08 et 2,21 $m.s^{-1}$. L'exercice de l'*Etoile,* spécifiquement dédié à l'amélioration de la technique (positionnement, technique de frappe) était associé à une charge externe inférieure (distance parcourue, vitesse frappe) aux autres exercices. Les mesures effectuées immédiatement à la fin des exercices démontrent que la demande physiologique est similaire à celle rencontrée lors de matchs réels de tennis, particulièrement pour les exercices de l'Etoile et de la Boîte (30s). Les valeurs de FC variaient entre 160 et 180 bpm et les concentrations sanguines en lactate étaient comprises entre 4,4 et 10,6 mmol. L^{-1} avec des valeurs proportionnellement plus importantes pour les exercices de 60s (Reid et al. 2008). Dans le but de comparer l'effet de la surface du court sur la demande physiologique au cours d'entraînements spécifiques de tennis (exercices de précision, amélioration des vitesse d'exécution et de déplacement), l'étude de Fernandez-Fernandez et al. (2010) rapporte des moyennes de FC entre 65 et 87% de la FC_{max} ainsi qu'une consommation d'oxygène variant entre 55 et 80% de la $\dot{V}O_2$max. Lors d'efforts très intenses, les auteurs rapportent également des

valeurs atteignant 100% de la FC_{max} et de la $\dot{V}O_{2max}$ suggérant que la demande physiologique au cours de ce type d'exercices est proche de celle rencontrée par les joueurs lors de match (Fernandez-Fernandez et al. 2010). Les auteurs n'observent aucune influence de la surface sur la contrainte physiologique. En effet, la distribution des balles par un entraîneur limite le développement des aspects tactiques différemment employés en fonction des surfaces. Enfin, cette étude met également en évidence que la production des frappes à l'entraînement est, au même titre que les déplacements, associée à des contraintes physiologiques importantes. Une étude plus récente effectuée par l'équipe de Murphy et al. (2014b) a également évalué les contraintes physiologiques associées à six exercices spécifiques couramment utilisés pour améliorer les qualités physiques et techniques du jeu de tennis (Murphy et al. 2014b). Alors que la FC ne varie pas entre les exercices (148-154 bpm), cette étude rapporte que la sollicitation physiologique était plus élevée pour les exercices de défense (FC : 154 bpm ; %FCmax : 90% ; RPE : 6,5 ± 1,8) que pour des exercices de précision (FC : 148 bpm ; %FCmax : 85% ; RPE : 5,7 ± 1,3). Concernant la charge externe imposée aux joueurs, la fréquence de frappe varie entre 7,8 et 12 frappe/min pour les exercices spécifiques et entre 3,6 et 6 frappe/min lors de points ou matchs d'entraînements. A noter cependant l'impact de l'âge et du niveau des joueurs puisque cette étude regroupait des joueurs de tennis professionnels juniors dont la fréquence de frappe est largement inférieure à celles de joueurs de tennis professionnels séniors (Murphy et al. 2014b, 2016).

- **Perception de l'effort (RPE)**

La demande psychophysiologique associée à des entraînements ou des périodes d'entraînement a été étudiée à l'aide de la mesure de charge interne de RPE ou sRPE (Foster et al. 2001). L'étude de Reid et al. (2008) met en évidence l'impact de la durée des exercices sur les perceptions d'effort lors des exercices spécifiques tennis (Reid et al. 2008), les exercices de précision et de placement (Etoile, Boite) étant associés à une perception d'effort inférieure par rapport à des exercices proche de situations de défense (Suicide, Big X). Une étude de Murphy (Murphy et al. 2014b) permet de préciser

que la RPE sont plus importantes pour les exercices de défense, schémas de jeux ouverts ou lors de matchs d'entraînement par rapport à des exercices plus techniques/précisions (Murphy et al. 2014b). Alors que cette même étude ne rapporte aucune différence entre les différents exercices sur la réponse cardiovasculaire, les perceptions d'effort ne sont donc pas corrélées à une augmentation de la FC soulignant alors une contribution psychologique (concentration), dans la perception de l'effort des joueurs lors de ce type d'exercices (Murphy 2015). Le nombre de frappes et la fréquence des frappes ne sont que faiblement corrélés avec la RPE, les auteurs montrent que la durée des exercices influence positivement le nombre de frappes et négativement la fréquence des frappes. Ceci suggère que la durée d'un entraînement (inclus dans la sRPE) influence la charge externe de manière significative comparativement à l'intensité seule de l'exercice (RPE). Peu d'études ont rapporté les charges d'entraînement globales associées à des journées d'entraînement (entraînement de physique et de tennis) chez des joueurs de tennis par l'indice de sRPE. Les valeurs rapportées dans le tableau 6 présentent des charges d'entraînement journalières et hebdomadaires relativement variées. La charge d'entraînement journalière rapportée par l'étude de Murphy et al. (2015b) qui inclue une séance de préparation physique et un entraînement de tennis s'élève à 1267 A.U est largement supérieure aux valeurs de sRPE hebdomadaires rapportées par les études de Gomes et al. (2013) et Fernandez-Fernandez et al. (2015b). Les comparaisons sont difficiles à effectuer étant donné que le nombre de jours d'entraînement ne sont pas spécifiés dans les études. La valeur de 2583 A.U rapportée par l'équipe de Fernandez-Fernandez et al. (2015b) peut s'expliquer par une faible fréquence de séances de préparation physique (séance d'exercices intermittents à haute intensité). En revanche, l'équipe de Gomes et al. (2013) indique qu'au cours d'une période de 5 semaines d'entraînement, les journées incluent des séances de préparation physique et des entraînements de tennis (Gomes et al. 2013). La plupart des exercices spécifiques d'entraînement sont associés à une demande physiologique similaire (FC, [La]sg) à celle d'un match (Reid et al. 2008; Murphy et al. 2014b). Hormis les exercices de Big X et Suicide associés à une RPE plus importante (principalement lié à la durée de l'exercice), la perception de l'effort ainsi que la charge externe (fréquence de frappe, distance parcourue) semblent être inférieures à celles

imposés aux joueurs en compétition (Murphy et al. 2016). Pour exemple, l'étude de Murphy et al. (2015b) rapporte une fréquence de frappe à ≈7 frappes/min lors de séances d'entraînement alors que cet indice s'élève à ≈14 frappes/min lors d'un match officiel. Il est ainsi possible de supposer que les fatigues d'origine neuromusculaire et/ou structurale et psychologique associées soient inférieures lors d'exercices spécifiques en période d'entraînement par rapport à des situations réelles de match en compétition.

Auteur	Type d'entraînement	Population	RPE (A.U)	Durée (min)	sRPE (A.U)
Fernandez-Fernandez et al. 2005	**Exercices spécifiques (Gammes)** 1 : Gammes croisées en coup droit 2 : 2 coups droits croisés + 2 revers long de ligne	6 joueurs professionnels (23,9 ± 2,5 ans)	1 : 12,2* 2 : 14,8*	5	/
Reid et al. 2008	**Exercices spécifiques tennis (Panier)** 1 : Etoile 2 : Boite 3 : Suicide 4 : Big X	6 joueurs professionnels (22 ± 6 ans)	1 : 4 ; 6 2 : 3 ;5 3 : 6 ;8 4 : 6 ;8	30s/30s (×6) ; 60s/30s (×6)	/
Gomes et al. 2013	**5 semaines d'entraînement** (4 semaines de préparatoire, 1 semaine de précompétitif)	10 Joueurs Nationaux (18,5 ± 0,4 ans)	/	/	Semaine 1 : 2389 Semaine 2 : 3079 Semaine 3 : 4266 Semaine 4 : 4449 Semaine 5 : 2162
Fernandez-Fernandez et al. 2015	**17 jours d'entraînement** (entraînement physique et tennis)	12 joueurs professionnels (21,9 ± 2,0 ans)	/	/	Semaine : 2583
Murphy et al. 2015	**4 semaines d'entraînement pré-compétitif** (Entraînement physique + Entraînement tennis)	30 Joueurs professionnels (17 ± 1.3 ans)	5,4	230	Journée : 1267

Tableau 6. Tableau récapitulatif des études ayant quantifié la perception de l'effort (RPE) et la charge d'entraînement (sRPE). *Echelle CR6-20

Conclusion

Le tennis a évolué d'une activité principalement technico-tactiques vers une activité nécessitant des qualités physiques et physiologiques importantes (Baiget et al. 2015) (Fernandez-Fernandez et al. 2009). De nombreux facteurs comme la surface du court, la durée, le style de jeu, le genre influencent les réponses physiologiques et neuromusculaires du joueur lors d'un match de tennis. Ces facteurs sont largement considérés aujourd'hui et peuvent être standardisés dans les méthodologies expérimentales des protocoles visant à analyser la charge induite par un match de tennis. En revanche, d'autres facteurs imprévisibles comme l'adversaire ou le stress mental associé aux matchs officiels rendent pratiquement impossible la quantification précise de la charge induite par un match (Murphy et al. 2016). Lors de périodes d'entraînement, la charge n'a été caractérisée que dans le cadre d'exercices spécifiques tennis isolés et ne permet pas d'appréhender globalement l'ensemble des sollicitations physiologiques et neuromusculaires, notamment lors des séances de préparation physique. Quelle que soit le type d'exercice effectué, la sRPE permet aujourd'hui de pallier en partie à ce problème, mais reste encore peu utilisée pour quantifier la charge spécifiquement induite par le tennis.

Fatigue induite par le tennis élite

La fatigue induite par le tennis est principalement le résultat de l'effet cumulé de l'enchaînement d'efforts à haute intensité sur la durée d'un match ou d'un entraînement perturbant alors l'équilibre homéostasique et les capacités de performance du joueur (Girard and Millet 2009). Au vu de la littérature existante, il apparaît qu'un certain nombre de performances spécifiques (e.g. vitesse, précision des frappes, déplacements du joueur) au tennis puissent être altérées au cours d'un match (Gescheit et al. 2015; Hornery et al. 2007) (Ojala and Hakkinen 2013) (Kovacs 2007). Alors que certaines études ont rapporté une diminution de la vitesse des frappes et du service au cours et après un match de tennis (Hornery et al. 2007) (Kovacs 2006; Davey et al. 2002; Pereira et al. 2017), d'autres rapportent une diminution de la précision (Lyons et al. 2013) (Gescheit et al. 2015). Récemment, l'étude de Gescheit et al. (2015) a également montré des changements dans le positionnement et les déplacements des joueurs lors d'une compétition simulée de 4 jours comprenant des matchs de 4h (Gescheit et al. 2015). Cette même étude a également rapporté une diminution du temps de jeu effectif associée à une augmentation du ratio effort/récupération. La plupart de ces performances spécifiques sont dépendantes de la capacité du joueur à se mettre en mouvement rapidement (i.e. sprint) et à freiner puis frapper un coup de manière optimale, ce qui nécessite une qualité élevée de puissance explosive. N'importe quel paramètre qui limite le système musculosquelettique à générer une force explosive peut alors contribuer à une détérioration des performances du joueur. Les études à ce sujet montrent que les fonctions neuromusculaires sont altérées, notamment après des matchs d'une durée supérieure à 2h (Reid and Duffield 2014). On note notamment une diminution des capacités de vitesse, de force ou encore une diminution de la raideur musculaire (Girard et al. 2008) (Girard et al. 2006) (Ferrauti et al. 2001b). Bien qu'un lien pourrait paraître évident entre l'altération de ces paramètres fonctionnels et certaines modifications des performances spécifiques au tennis, le peu d'études effectuées à ce jour sont contradictoires. Certaines études montrent une corrélation positive entre la force du bras dominant, la force des extenseurs et fléchisseurs du genou et la performance des frappes (Pugh et al. 2003) alors que d'autres études n'observent qu'un lien modéré entre les capacités de puissance et de force avec les performances au service ou lors d'une frappe. Enfin, il est difficile d'établir un lien de cause à effet entre

la modification de paramètres fonctionnels comme la puissance ou la force et les modifications dans le déplacement du joueur sur le terrain ou la diminution du temps de jeu effectif. Cela suggère l'implication d'autres mécanismes physiologiques et/ou psychologiques dans la fatigue induite par le tennis. Le lien entre la fatigue induite au cours et après un match, son impact sur les paramètres fonctionnels, physiologiques ou psychologiques pouvant être responsables de la modification des performances spécifiques au tennis ne semble pas être à ce jour complètement clarifié.

L'objectif de ce chapitre est de faire état de la littérature ayant analysée les origines potentielles de la fatigue et leur impact sur les performances fonctionnelles et spécifiques au tennis. Alors que dans le cadre de cette thèse nous nous intéressons principalement aux effets de cette fatigue (moyen-terme) sur les heures et jours suivant un match ou un entraînement, l'étude exhaustive de la littérature scientifique montre que seulement quelques études se sont intéressées à ce sujet. Nous considérerons alors le développement de la fatigue induite au cours d'un match afin d'appréhender l'origine de la fatigue et son impact immédiat sur les performances (fonctionnelles ou spécifiques) et nous nous attacherons à analyser l'évolution de ces paramètres sur la période suivant l'exercice quand cela est possible. Dans le cas où aucune étude ne fait état des cinétiques de la fatigue dans les heures/jours suivants, nous ferons état des résultats d'études évaluant ces mêmes paramètres dans d'autres disciplines caractérisées par des efforts intermittents (football notamment).

1. Fatigue d'origine métabolique

1. Système phosphagène et glycolytique

La durée nécessaire de resynthèse de la PCr est de 3 à 5 min alors que les temps de récupération entre les points ou entre les jeux sont plus courts (20 sec entre les points à 1,5 min entre les jeux)(Ferrauti et al. 2001a). La resynthèse de PCr est biphasique : la première phase est rapide (20-30 sec) alors que la seconde peut durer jusqu'à 20 min. Le temps de récupération entre les points ne permettra alors qu'une resynthèse partielle de PCr, provoquant alors une diminution progressive de ses réserves au fur et

à mesure d'un match (Mendez-Villanueva et al. 2007b). Bien que la sollicitation de la filière aérobie par la suite est capable de fournir l'énergie en ATP nécessaire, ce déficit en PCr provoque une diminution progressive des capacités de puissance impactant la réalisation optimale des mouvements explosifs associés aux frappes, à la vitesse d'exécution des sprints et aux changements de direction. Un protocole a étudié l'effet du temps de récupération (10 sec et 15 sec) entre des exercices spécifiques de tennis comprenant des répétitions alternées de sprints et de frappes (Ferrauti et al. 2001b). Ainsi, une diminution de la vitesse de sprints et de frappes était observée lorsque le temps de récupération était de 10 sec, ce qui pourrait être en partie expliqué par une diminution des réserves en PCr (Ferrauti et al. 2001b). Cependant, il semblerait qu'une déplétion en PCr ne soit pas le principal contributeur de la fatigue au tennis puisque les réserves musculaires en ATP descendent rarement en dessous de 60% par rapport à des valeurs initiales après un exercice fortement sollicitant (Girard and Millet 2009) (Bangsbo et al. 2006). Une augmentation de lactate sanguin, durant ou après un effort, est souvent rapportée comme un indice d'acidose musculaire puisque sa concentration dépendante du système glycolytique est proportionnelle à l'augmentation de la concentration en ions H^+. L'acidose musculaire est parfois rapportée comme inductrice de la fatigue (Westerblad et al. 1991). Cependant, son impact sur les performances n'est pas forcément évident car les niveaux de lactates sanguins mesurés n'apparaissent pas relativement élevés (2,0 et 3,8 $mmol.L^{-1}$) après un match (Fernandez-Fernandez et al. 2009; Krustrup et al. 2003; Allen et al. 2008). L'étude d'Ojala and Hakkinen (2013) rapporte également un retour à des valeurs physiologiques de lactate sanguin et de la FC, 24h après un match de tennis de 2H. Ainsi, l'acidose musculaire ne serait pas non plus un contributeur significatif de la fatigue au tennis.

2. Système oxydatif

Peu d'études se sont penchées à ce jour sur la fatigue qui pourrait être induite par une déplétion en réserve en glycogène consécutivement à un match alors qu'il a été montré que le métabolisme oxydatif était la filière majoritaire sollicitée durant un match de tennis (Kovacs 2007). Lors d'exercices prolongés, il a été rapporté qu'une diminution

des réserves en glucides et en glycogène était un facteur clef, contributeur de la fatigue (Coyle 2000). Des études se sont intéressées à l'impact d'une supplémentation en glucides durant un match sur les performances. Celles-ci rapportent que l'apport en glucides n'avait pas d'impact sur des performances de précisions, même après 3h de match de tennis (Mitchell et al. 1992). À l'inverse, les travaux de Vergauwen et al. (1998) rapportent les bénéfices potentiels d'une supplémentation en glucides sur des performances de précision et de qualité de frappe lors d'un match de 2 h. Ces résultats contradictoires peuvent s'expliquer en partie par des différences dans les protocoles d'exercices fatigants et/ou des tests de performance utilisés. Il est à noter que ces études ne correspondent pas nécessairement au contexte de cette thèse puisqu'elles observent l'impact d'une supplémentation en glucides sur la perturbation potentielle des performances durant un match. Alors qu'il est fortement conseillé de consommer 1,5g.kg-1 de glucides dans l'heure qui suit un match pour permettre une resynthèse plus rapide des réserves en glycogène, l'impact sur la fatigue et/ou sur les performances d'une diminution de ces réserves, consécutivement à un match ou à un entraînement, n'a pas été étudié jusqu'à maintenant. Outre son rôle principal dans la production d'ATP, indispensable à la contraction musculaire, la concentration en glycogène peut aussi contribuer à la fatigue centrale car celle-ci est hautement reliée au métabolisme des neurotransmetteurs centraux (Struder et al. 1998) (Girard and Millet 2009). De plus, certaines études dans d'autres disciplines intermittentes ont montré que la resynthèse de glycogène restait atténuée jusqu'à deux à trois jours après un match de football (Nedelec et al. 2012).

2. Fatigue d'origine neuromusculaire

Si quelques études se sont intéressées à l'installation de la fatigue neuromusculaire durant et immédiatement après un match (Girard et al. 2006) (Girard et al. 2008) (Fabre et al. 2012), une seule étude s'est intéressée jusqu'à aujourd'hui à l'évolution de cette fatigue jusqu'à 48h après un match (Periard et al. 2014a) alors qu'aucune ne l'a évaluée lors de l'enchaînement de matchs consécutifs sur plusieurs jours. En effet, l'utilisation de la technique d'électromyographie de surface (EMG), mesurant l'activation

musculaire, couplée à la technique de stimulation surimposée, mesurant l'activation volontaire (%VA), nécessite la mise en place de mesures parfois incompatibles avec les contraintes et l'organisation de populations élites et/ou inadaptées aux conditions réelles de compétition (Vollestad 1997) (Place et al. 2007). Pourtant, cette méthode standard est intéressante pour dissocier la part de la fatigue centrale et de la fatigue périphérique lors d'une contraction isométrique maximale volontaire (MVC).

1. Origine centrale

Dans les activités physiques intermittentes comme le tennis, les études tendent à confirmer qu'une modification de la commande nerveuse au niveau central peut impacter les performances, notamment en impactant négativement le recrutement des unités motrices (Billaut 2011). L'implication du système nerveux central dans la fatigue a été largement étudiée par la technique de stimulation surimposée lors d'une contraction maximale volontaire. Plus précisément, celle-ci est déterminée par la mesure des paramètres suivants : amplitude du signal EMG (somme des potentiels d'action musculaire mesurés par RMS, moyenne quadratique) normalisée à l'amplitude de l'onde M (somme des potentiels d'action musculaire évoqués par la stimulation) lors d'une MVC (ie. $RMS.PPA^{-1}$) (Fowles et al. 2002) ; différence entre la force induite par la stimulation et la force produite volontairement lors de la MVC (% VA) (Vollestad 1997) (Millet and Lepers 2004). Une étude a démontré une diminution progressive du pic de couple de force produit lors d'une MVC des extenseurs du genou, durant un match prolongé de 3 h au tennis alors que les performances en CMJ et SJ n'étaient diminuées qu'après 30 min suivant ce match (Girard et al. 2006). Alors qu'il est peu probable que l'origine de ces diminutions de performance soit majoritairement due à des facteurs métaboliques (Krustrup et al. 2003) (Girard and Millet 2009), les potentielles origines neuromusculaires ont été spécifiquement étudiées lors d'un protocole similaire élaboré par les auteurs préalablement cités (Girard et al. 2008). Cette étude rapporte une diminution du couple de force des extenseurs du genou (de -10 à -13% en moyenne) significative à partir de 150 min durant le match. Cette perte de force pouvait persister jusqu'à 30 min après l'arrêt de cet exercice. Les auteurs suggèrent que cette diminution

de performance peut être en partie due à une altération de la commande centrale. Même si les résultats ne montrent pas de réduction de l'activation volontaire, les valeurs de RMS.PPA^{-1} diminuaient significativement après l'exercice pour le v*astus lateralis* (à partir de l'heure de jeu jusqu'à la fin du match) et pour le v*astus medialis* (à partir de 30 min de jeu jusqu'à 30 min après). Le paramètre de MVC/P80 (ratio entre la MVC et le couple évoqué à haute fréquence [80 Hz]), permettant de mesurer un déficit de la commande nerveuse centrale, était également significativement diminué (-16%) à la fin des 3 h de match. En 2014, l'équipe de Periard et al. (2014a) a confirmé la contribution d'altérations centrales dans le développement de la fatigue induite par un match de tennis. En effet, les auteurs ont observé une diminution significative de l'AV immédiatement après un match de tennis simulé de 2h qui serait à l'origine de la diminution du pic de couple de force produit lors d'une MVC des extenseurs du genou. Ce déficit d'AV était en revanche recouvré à 24h et 48h post match. Les mesures effectuées dans ces études n'ont pas permis de distinguer l'origine spinale ou supraspinale de la fatigue.

L'étude de Girard et al. (2011) a permis d'investiguer cette voie : lors d'un protocole équivalent à celui préalablement utilisé et présenté, les auteurs ont quantifié la contribution spinale et supraspinale à l'amplitude de la fatigue neuromusculaire induite par un match de tennis de 3 h sur les muscles de la jambe (i.e. *tibialis anterior* [TA], *soleus anterior* [SA]). Comme observé lors des études précédentes, le pic de couple de force pendant la MVC (TA, SA) est plus faible (-15%) immédiatement après la fin de l'exercice, comparativement aux valeurs pré-exercice. Inversement, la force produite par les quadriceps diminue de manière plus précoce, i.e. dans la première heure suivant le début du match. De la même manière, la commande nerveuse centrale est altérée, comme le reflète la diminution de l'AV et de la RMS.PPA^{-1}, à partir de la première heure de l'exercice. Afin de déterminer l'origine de la diminution de la commande nerveuse centrale (i.e. supraspinale ou spinale), les auteurs ont utilisé des protocoles permettant d'enregistrer les signaux EMG lors de contractions musculaires évoquées électriquement. En accédant notamment au réflexe de Hoffman (ou réflexe H), les auteurs ont ainsi pu quantifier l'efficacité de la transmission nerveuse entre les

afférences Ia et les motoneurones-α (niveau spinal) (Aagaard et al. 2002). La mesure de l'onde V (*volitional wave*), permettait de déterminer à la fois l'excitabilité/inhibition pré-synaptique des afférences Ia et la commande nerveuse supra spinale (Del Balso and Cafarelli 2007). Les auteurs observent ainsi une diminution de l'amplitude du signal EMG correspondant au réflexe H concomitante à une diminution de l'amplitude de l'onde V normalisée par l'onde M, suggérant une probable origine supraspinale de la fatigue observée lors de contractions maximales des fléchisseurs plantaires. Plus précisément, il semble qu'une modification de l'excitabilité des motoneurones-α en réponse aux afférences Ia (Brooke et al. 1997) soit responsable de ces observations, plutôt que d'une diminution du potentiel excitateur provenant des régions des centres moteurs supra spinaux ou d'un réflexe inhibiteur provenant des afférences III et IV. Dans ces dernières études, les auteurs suggèrent une contribution du système nerveux central, plus précisément à l'échelle spinale, dans la diminution des performances fonctionnelles (reflétées notamment par la force maximale volontaire ou le RFD) des muscles des membres inférieurs après un match de tennis de longue durée. Ils n'excluent toutefois pas totalement l'intervention d'autres mécanismes (i.e. périphérique) qui sont évoqués dans la prochaine partie de ce chapitre. Une fatigue neuromusculaire d'origine spinale semble apparaître à la suite d'un match de tennis de durée prolongée (i.e. > 3 h) impliquant en partie des réflexes nerveux mesurés au niveau périphérique. La fatigue neuromusculaire d'origine spinale pourrait être associée à un mécanisme de protection, afin de préserver les structures productrices de force du muscle et d'éviter les blessures (St Clair Gibson and Noakes 2004). Une étude plus récente consistant à mesurer l'impact de différentes surfaces sur les propriétés neuromusculaires (Fabre et al. 2012) avant et après un match de tennis de 45 min, rapportent des résultats différents. En utilisant les mêmes méthodes précédemment décrites, les auteurs ne peuvent pas conclure quant à la présence d'une fatigue d'origine centrale, compte tenu de résultats contradictoires. Alors qu'une diminution de la MVC est observée, ils observent une diminution de l'amplitude du réflexe H du *gastronémien latéralis* mesuré au repos sans modification du niveau de %VA. Les différences observées entre ces études ne sont pour autant pas si surprenantes puisqu'il a été démontré que le niveau de la fatigue centrale dépend du régime de contraction impliqué, des muscles sollicités,

de la durée et de l'intensité de l'exercice (Enoka and Stuart 1992; Millet and Lepers 2004).

Une étude s'est intéressée aux facteurs potentiels d'origine supra-spinale de la fatigue induite par un match de tennis (Struder et al. 1998). Une augmentation de tryptophane libre dans la circulation (f-TRP/BCAA) a été observée lors d'exercices prolongés. Cette molécule est un précurseur de la sérotonine, reconnue pour ses effets négatifs sur le recrutement des unités motrices et, par conséquent, sur la performance motrice. Lors d'un match de tennis de 4 h, l'équipe de Struder et al. (1998) a montré une augmentation de ce ratio (f-TRP/BCAA), suggérant l'apparition d'une fatigue centrale d'origine supra spinale. En effet, une augmentation de ce ratio a été associée à une altération de la vigilance qui se manifeste par des états léthargiques, à des changements d'humeur ou encore une somnolence. Ces perturbations se répercutent alors potentiellement sur les fonctions cognitives et perceptives (perception de l'effort, gestion du stress, choix tactiques) lors de points importants. En revanche, les études analysant l'impact d'une supplémentation en glucides permettant de limiter l'augmentation de ce ratio n'ont pas observé d'effet consécutif à cette supplémentation sur les performances au tennis (Struder et al. 1998).

2. Origine périphérique

Une diminution de la force d'origine périphérique correspond à une défaillance de la mécanique musculaire des parties situées au-delà de la jonction neuromusculaire jusqu'aux ponts d'actine-myosine (Chapitre 1). La transmission du potentiel d'action et de sa propagation dans les fibres musculaires est mesurée à travers l'amplitude et la durée de l'onde M (PPA) (Fowles et al. 2002) et des paramètres dérivés ($RMS.PPA^{-1}$). Des stimulations électriques induites à haute (Db100 [100 Hz], P80 [80 Hz] selon les études) et basse fréquence (Db10 [10 Hz], P20 [20 Hz] selon les études) couplées à la mesure des forces évoquées permettent d'obtenir des informations complémentaires quant à l'étape précise de la défaillance. Les études de Girard (Girard et al. 2006) (Girard et al. 2008) se sont attachées à déterminer si la diminution de la force maximale observée pendant un match de 3h (pour les muscles *vastus medialis*, *vastus lateralis*) et 30 min

après ce match (pour les muscles *tibialis anterior, soleus*) pouvait provenir d'altérations musculaires au niveau périphérique. Dans la première étude, les auteurs n'observent aucune diminution significative de l'amplitude de l'onde M (PPA) attestant de l'absence d'une défaillance au niveau de la transmission et de la propagation des potentiels d'action. En revanche, ils ont observé une diminution du couple de force normalisé par l'onde M (Pt/PPA) laissant présumer une perturbation du couplage excitation-contraction. Ils constatent également l'absence de modifications au niveau de l'amplitude et de la durée de l'onde M et du couple de force électro-induit à haute fréquence (P80) associée à une diminution du ratio P20/P80. Ces résultats permettent d'identifier une fatigue à basse fréquence provoquée par des altérations au niveau du couplage excitation-contraction (Jones 1996) impliquant les étapes allant du relargage du Ca^{++} par le réticulum sarcoplasmique jusqu'à la liaison du Ca^{++} à la troponine au niveau des myofibrilles. Plus précisément, les auteurs suggèrent que la fatigue à basse fréquence observée proviendrait probablement de dommages structuraux au niveau des fibres musculaires (i.e. dommages musculaires induits par l'exercice, EIMD). Ceci est cohérent avec leur précédente étude au cours de laquelle ils observent lors du même protocole une augmentation des douleurs musculaires, symptômes associés aux dommages musculaires. Les précisions concernant l'origine de cette fatigue et les modifications des performances associées sont décrites dans la partie ci-après (5. Fatigue d'origine mécanique). Dans une seconde étude de la même équipe (Girard et al. 2008), une diminution modérée et progressive de l'amplitude de l'onde M mesurée au sein des muscles *tibialis anterior et soleus* est observée jusqu'à 30 min après la fin du match, témoignant d'une altération de la transmission des potentiels d'action au sein du muscle. En revanche, aucun indice spécifique mesuré dans cette étude (P20/P80) ne permet de conclure quant à l'origine métabolique et/ou mécanique de la diminution du couple de force maximal des fléchisseurs plantaires. Lors d'une étude consistant à mesurer l'impact de différentes surfaces sur les propriétés neuromusculaires (Fabre et al. 2012) avant et après un match de tennis de 45 min, les auteurs montrent des résultats similaires sur les fléchisseurs plantaires (*gastrocnemius lateralis, soleus*). La diminution de la force maximale volontaire était alors associée à une altération des propriétés

contractiles, bien que les mesures effectuées n'aient pas permis de déterminer l'origine plus précise de celle-ci.

3. Fatigue d'origine mécanique

La phase de décélération d'un service ou d'une frappe et la phase de freinage lors des courses et changements de direction sont associées à des enchaînements de contractions musculaires excentriques et concentriques bien connus sous le terme de cycle étirement-détente (stretch shortening cycle, SSC ; muscles principalement sollicités : quadriceps, fléchisseurs plantaires, rotateurs internes de l'épaule). Par conséquent, la présence de dommages musculaires liés à l'exercice est courante lors d'un match de tennis avec une proportion de dommages musculaires qui serait liée à l'intensité ou à la durée du match (Gomes et al. 2014; Ojala and Hakkinen 2013). Les travaux de Girard et al. (2006) ont montré une diminution progressive et significative de la force maximale volontaire (-9%) des quadriceps, associée à une diminution de la raideur musculaire (-9%) après 150 min de jeu et jusqu'à 30 min après la fin du match. La diminution de ces paramètres fonctionnels était également associée à une augmentation des douleurs musculaires (>15 sur une échelle de Borg 6-20) et du RPE (>14 sur une échelle de Borg 6-20). Les auteurs concluent que l'apparition de dommages musculaires au cours d'un match de 3 h, mesurés indirectement à travers la perception de douleurs musculaires, pourrait être à l'origine d'une diminution des capacités de force des quadriceps et modifier les performances spécifiques au tennis, appréhendées par exemple par la mesure de la vitesse de la balle ou encore la réduction des distances parcourues au cours d'un match. En revanche, cette étude ne permet pas de préciser ni l'étendue, ni la persistance des dommages musculaires après le match, ni les potentiels impacts que ceux-ci peuvent avoir sur les performances dans les heures et les jours qui suivent le match. Des résultats similaires ont été observés lors d'un tournoi joué sur surface dure extérieure avec un match de tennis de 2 h par jour pendant trois jours consécutifs (Ojala and Hakkinen 2013). Une diminution de 26% de la MVC et de 38% du RFD était observée à l'issue des trois journées par rapport aux mesures effectuées avant le début du premier match. Les valeurs restaient significativement plus faibles 48 h

après la fin du tournoi. L'activité de la CK augmentait significativement pour atteindre ~1400U.L^{-1} à la fin du 3ème match. Les valeurs de CK restaient significativement élevées 48 h après la fin du 3ème match (>500 U.L^{-1}) par rapport au début du tournoi (< 250 U.L^{-1}). Les sensations de douleurs musculaires (~5 sur une échelle CR-10 pour les membres inférieurs et ~4 pour les membres supérieurs) ont augmenté tout au long du protocole. La douleur ressentie au niveau des membres inférieurs (> 2) restait significativement élevée 48 h après la fin du 3ème match. Comme dans l'étude de Girard et al. (2006), les auteurs expliquent que l'accumulation de 3 jours de matchs de 2 h induirait l'apparition de dommages musculaires, principalement au niveau des membres inférieurs, expliquant en partie les baisses de performances fonctionnelles mesurées lors de MVC et de RFD, avec des conséquences mesurées sur la vitesse de balle au service (Reid et al. 2008). L'étude de Gomes et al. (2014) observe également une augmentation significative mais modérée des douleurs musculaires (~10mm sur une échelle de 100 mm) et de l'activité de la CK (~300 U.L^{-1}) 24 h et 48 h après un match de 3 h joué sur terre battue, par de jeunes joueurs de tennis de niveau national. Bien que les auteurs observent une diminution des performances de force (Test d'une répétition maximale en squat, 1-RM) et de sauts (CMJ, SJ) juste après le match de 3 h, celles-ci ne semblent pas être impactées par la présence de dommages musculaires les jours suivants le match (24 h, 48 h). Aucune mesure de performance spécifique au tennis n'a été mesurée dans cette étude. Les auteurs expliquent que le faible niveau de dommages musculaires peut être dû au fait que les joueurs de tennis participant à cette étude réalisaient couramment des matchs, et étaient donc adaptés à ce type de contrainte musculaire, bien que les capacités de production de force et de puissance musculaire des membres inférieurs de certains joueurs (1RM en squat, SJ) restaient significativement diminuées 24 h après la fin du match. Une étude a récemment étudié l'impact de quatre jours de matchs d'une durée de 4 h sur surface rapide sur de nombreux paramètres physiologiques, fonctionnels ou reflétant les performances spécifiques au tennis (Gescheit et al. 2015). Ces auteurs rapportent une augmentation significative de l'activité de la CK et des sensations des douleurs musculaires au cours des quatre jours du protocole. L'activité de la CK s'élève à environ 2700 U.L^{-1} lors du jour 4 contre ~400 U.L^{-1} avant le premier match. Les douleurs musculaires atteignaient en moyenne 8 sur une échelle de Likert

(1-10) contre une valeur proche de 2 au début du protocole. De manière cohérente avec les études préalablement citées, une diminution des capacités de production de force des muscles inférieurs et supérieurs était observée au cours des quatre jours. En revanche, contrairement aux autres études, les qualités de puissance (CMJ) et de vitesse (sprints sur 10 et 20 m) étaient également altérées. De plus, une diminution de certains paramètres spécifiques au tennis était rapportée. Le TEJ était significativement diminué lors du Jour 3 et du Jour 4 et les joueurs effectuaient moins de déplacements sur le court en Jour 4. Les auteurs suggèrent que l'enchaînement de matchs de longue durée (i.e. 4 h) provoque une diminution des performances spécifiques au tennis, des qualités de force et d'explosivité, pouvant s'expliquer par une fatigue multi-factorielle (neuromusculaire, perceptive) incluant la présence de dommages musculaires.

Hormis l'étude de Gomes et al. (2014), il apparaît qu'un match de tennis, compte-tenu de l'omniprésence des mouvements impliquant de nombreuses contractions excentriques (accélérations, décélérations, changements de direction, services et frappes) peut altérer la structure des cellules musculaires induisant alors l'intervention de processus inflammatoires et l'apparition d'œdème. Si peu d'études ont évalué l'amplitude de ces dommages musculaires, celle-ci pourrait être importante, notamment lorsque la durée de match s'allonge. Les dommages musculaires pourraient en partie diminuer la capacité des joueurs à produire de la force et/ou à générer de la force rapidement, qualités de performances indispensables notamment au niveau des membres inférieurs pour les joueurs de tennis. Cependant, il est nécessaire de prendre conscience que d'autres altérations (neuromusculaires) peuvent également contribuer à l'installation de la fatigue pendant et après un match de tennis. Cette fatigue à basse fréquence est associée aux dommages musculaires induits par la répétition des mouvements SSC (Services, sauts, changements de direction) (Jones 1996).

4. Fatigue perceptive

Bien que la RPE soit un marqueur de charge interne, son évolution au cours d'un match peut être un témoin indirect de l'installation de la fatigue durant l'effort. Au tennis, des

études ont observé une augmentation progressive du RPE au cours d'un match de 3 h, dissociée de la cinétique de la fréquence cardiaque, autre indicateur de charge physiologique interne, suggérant l'impact d'autres facteurs sur la RPE. Dans cette étude, les auteurs suggèrent notamment que l'induction de dommages musculaires peut augmenter l'indice de RPE puisqu'ils observent une augmentation parallèle des douleurs musculaires concomitante avec une diminution de la force maximale volontaire. Cela est consistant avec les modèles théoriques qui proposent que de nombreux facteurs peuvent contribuer à l'intensité du RPE (e.g. concentrations en catécholamines, réserves glucidiques, conditions environnementales, état psychologique de l'athlète) et impacter la commande nerveuse (St Clair Gibson et al. 2003; Lambert and Borresen 2016). Ainsi, le niveau de RPE pourrait avoir un impact direct sur les performances. Par exemple, au tennis, cela correspondrait à des modifications dans les déplacements du joueur, de son engagement tactique ou technique (Reid and Duffield 2014). Aucune étude jusqu'à aujourd'hui n'a observé de corrélation directe entre les variations de RPE et les performances mais il est possible que la perception de l'effort puisse impacter certains marqueurs objectifs de la fatigue et influencer la performance. Peu d'études ont mesuré l'impact d'un match ou d'un entraînement sur des marqueurs subjectifs de fatigue. Récemment, l'étude de Gescheit et al. (2015) a cependant mis en avant l'augmentation des perceptions de fatigue, de stress et modifications de l'humeur lors des 3 derniers jours d'un enchaînement de 4 jours de matchs consécutifs suggérant que les joueurs présentaient des symptômes psychophysiologiques de fatigue. Les auteurs suggèrent que ceux-ci puissent être responsables d'une diminution des déplacements des joueurs lors de ces matchs. (Gescheit et al. 2017).

5. Fatigue induite par l'entraînement

Peu d'études se sont penchées jusqu'à maintenant sur l'impact d'une ou plusieurs journées d'entraînement de tennis sur l'apparition de la fatigue et ses conséquences sur la performance. Cependant, les résultats de certaines études nous permettent raisonnablement de penser que l'entraînement induit également de la fatigue. Dans le

cadre d'une étude dont l'objectif était de mesurer l'efficacité d'un entraînement sur les performances, les auteurs ont observé une augmentation des douleurs musculaires consécutivement à un entraînement intermittent (Fernandez-Fernandez et al. 2015b). Une autre étude dont l'objectif était d'observer l'évolution des performances au cours de 5 semaines d'entraînement a observé une augmentation du stress perçu (DALDA) par les joueurs de tennis en parallèle d'une augmentation de la charge progressive jusqu'à la 3ème semaine (Gomes et al. 2013). En revanche, le stress semblait ne plus être augmenté lors de la 4ème et 5ème semaine alors que la charge d'entraînement était stable. L'étude de. Duffield et al. (2014) confirme ce résultat puisque les auteurs observent également une augmentation des sensations de douleurs musculaires après une journée d'entraînement (Duffield et al. 2014).

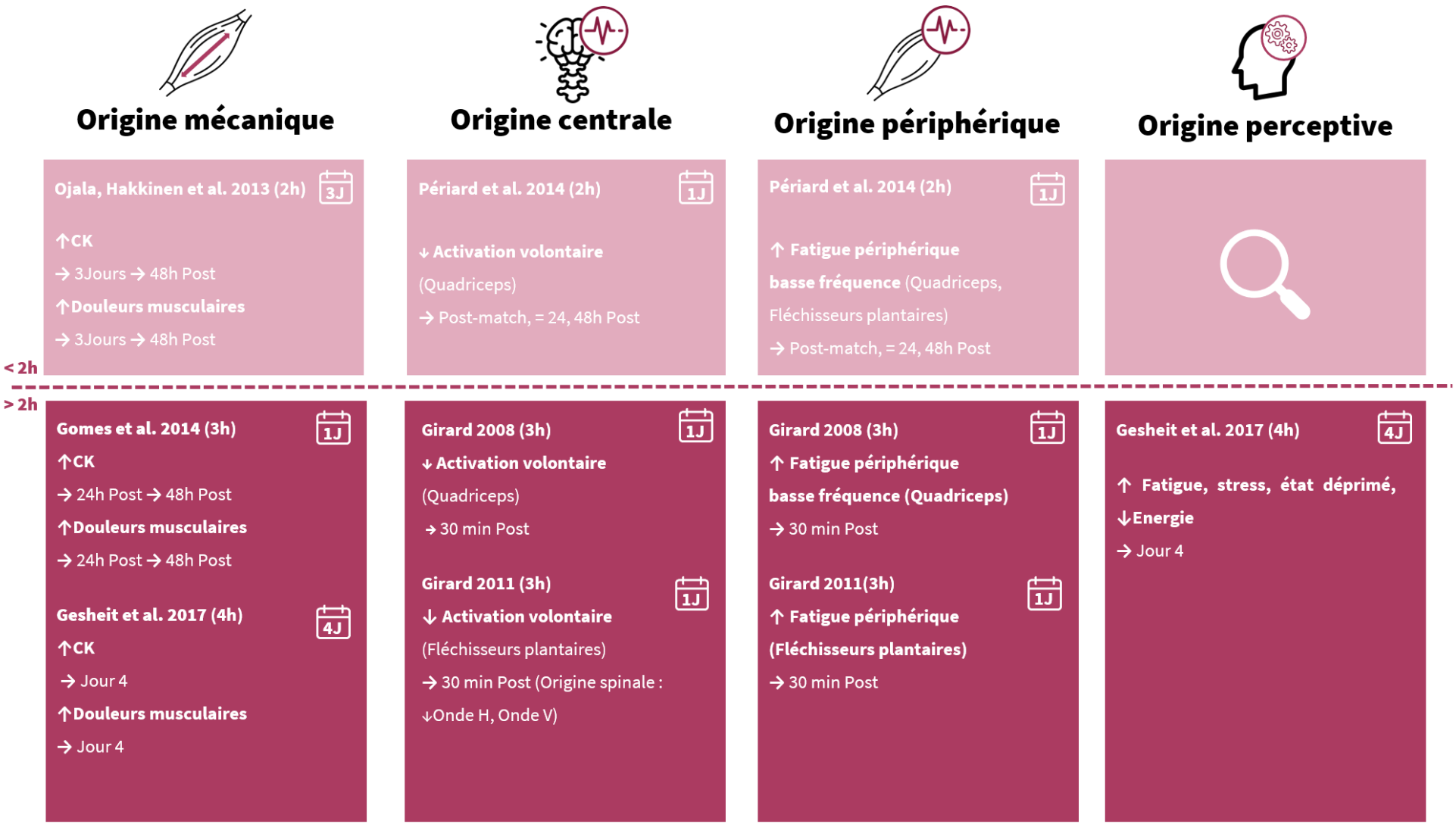


Figure 14. Origine de la fatigue lors d'un ou plusieurs matchs de tennis. CK : concentration sanguine en créatine kinase (U.A) ; ↑ : augmentation significative du paramètre ; ↓ : diminution significative du paramètre → : durée de la variation significative. Au-dessus de la ligne pointillée : durée de match < 2h ; au-dessous de la ligne pointillée : durée de match > 2h. ▭ Nombre de jours de matchs consécutifs.

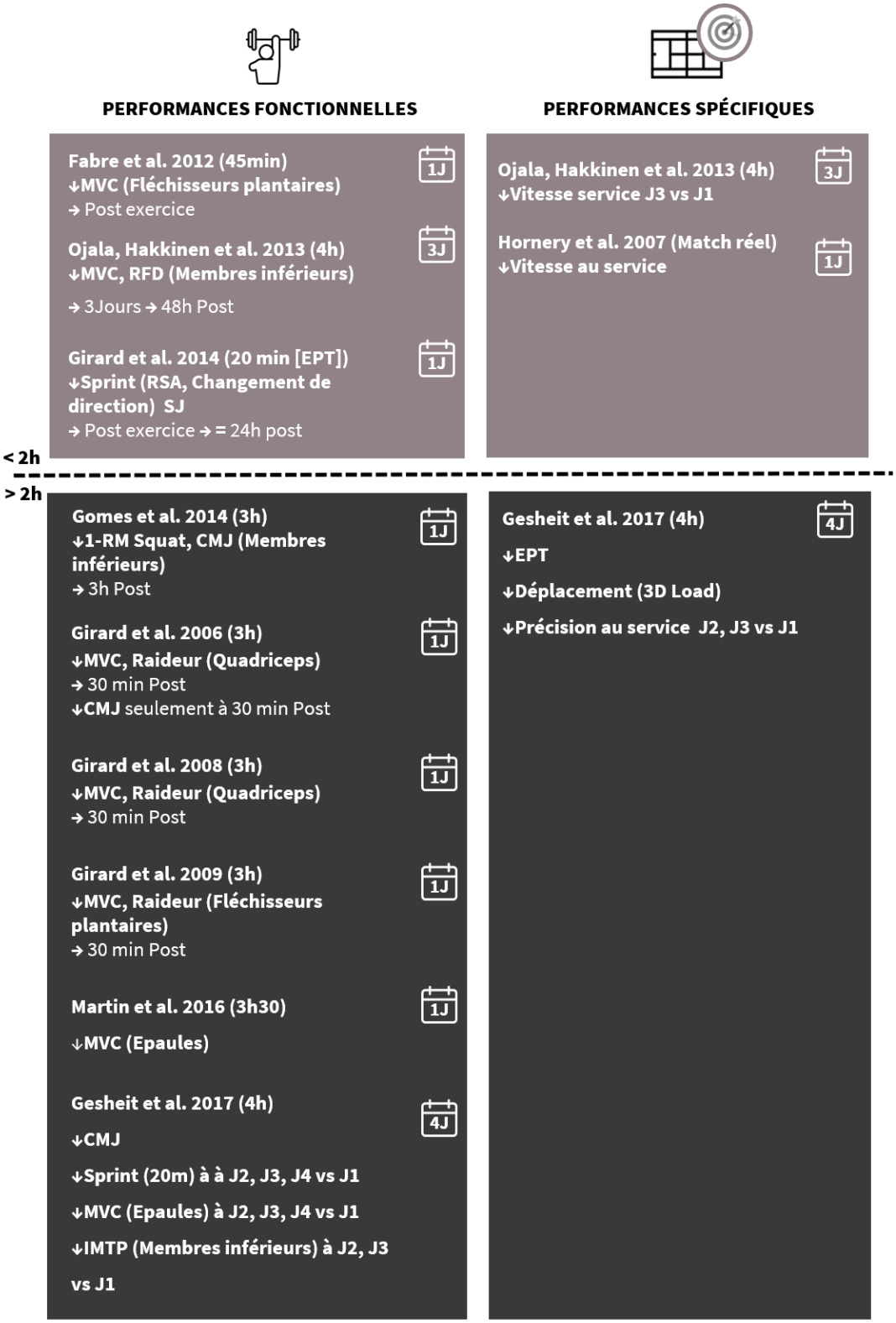


Figure 15. Effet de la fatigue sur les performances fonctionnelles et spécifiques au tennis. MVC : couple de force maximale volontaire ; RFD : taux de montée en force ; RSA : habileté à répéter des sprints ; 1-RM Squat : charge maximale en squat ; SJ : squatjump ; CMJ : contremouvement jump ; IMTP : force maximale isométrique des cuisses ; EPT : temps effectif de jeu ; 3D Load : indicateur des déplacements du joueur mesuré par accélérométrie ; ↑ : augmentation significative du paramètre ; ↓ : diminution significative du paramètre → : durée de la variation significative. Au-dessus de la ligne pointillée : durée de match < 2h ; au-dessous de la ligne pointillée : durée de match > 2h. Nombre de jours de matchs consécutifs.

Conclusion

Nous pouvons ainsi dresser le constat que des paramètres physiologiques, fonctionnels et spécifiques au tennis sont altérés durant un match. En revanche, peu d'études ont permis de déterminer à quel point ces perturbations perdurent dans le temps, alors que cela pourrait avoir un impact significatif lorsque le joueur est confronté à la nécessité de performer quotidiennement. Lors d'une compétition par exemple, le joueur effectue généralement un match toutes les 24 h et l'intégrité de ses performances est nécessaire s'il veut avancer dans le tournoi. Cette période de récupération dont les joueurs disposent entre les matchs permet de limiter l'installation d'une fatigue métabolique. En revanche, Gesheit et al. (Gescheit et al. 2015) montrent une persistance d'autres facteurs de la fatigue pendant 4 jours en évaluant les cinétiques des paramètres physiologiques, fonctionnels et spécifiques au tennis (Gescheit et al. 2015). Il apparaît alors intéressant de pouvoir analyser simultanément l'ensemble de ces paramètres au cours d'un ou plusieurs matchs. Cela, afin de pouvoir appliquer lorsque cela est nécessaire, des méthodes de récupération adéquates permettant au joueur de tennis de maintenir ses performances tout au long d'une compétition.

Efficacité des stratégies de récupération dans le tennis de haut niveau

Il existe peu de données scientifiques relatives à la charge et la fatigue associées à la pratique du tennis (Chapitre 2, Chapitre 3). Ces informations sont pourtant importantes pour déterminer les cibles prioritaires de la récupération spécifique au tennis et identifier les techniques de récupération potentiellement intéressantes dans ce contexte. Cela explique probablement le peu de littérature existante à ce jour sur la récupération et les techniques de récupération efficaces au tennis. L'explication la plus probable est la complexité que représente la standardisation des mesures (charge et fatigue) dans le contexte du tennis. En effet, la fatigue dépendant de la charge, celle-ci peut varier en fonction du match, dont la durée et la charge sont imprévisibles, mais également de nombreux autres facteurs qui n'existent pas dans d'autres disciplines moins ouvertes : surface du court, type de balle, environnement différents, adversaire (sport de duel).

1. Habitudes de récupération des athlètes, joueurs de tennis élite

Dans le contexte de l'entraînement, la place de la récupération gagne en considération depuis de nombreuses années. La revue de Kentta (Kentta and Hassmen 1998) souligne qu'une période de récupération trop courte associée à une charge d'entraînement élevée pourrait conduire au développement de symptômes associés au surentraînement. Parmi les recommandations énoncées dans cet article, l'auteure suggère de structurer les périodes et processus de récupération. En 2003, Smith souligne dans sa revue expliquant les erreurs potentielles associées à l'entraînement dans un contexte de haut-niveau que « *La récupération est souvent négligée avec des erreurs dans les séquences de micro-et macrocycles. L'utilisation de séances d'activité physique générale ne convient pas aux besoins de récupération* » (Smith 2003; Hausswirth 2013). Très récemment, le consensus publié par l'équipe de Kellmann et al. (2018) souligne à nouveau l'importance que doit prendre la récupération dans le processus d'entraînement, et propose de nombreuses techniques de récupération en fonction du contexte et des besoins spécifiques de l'athlète à un moment donné (Kellmann et al. 2018).

Bien que peu nombreuses, des études permettent de recenser et d'apprécier les habitudes en termes de récupération des athlètes de haut-niveau (Venter et al. 2010; Van Wyk and Lambert 2009; Simjanovic et al. 2009). Celles-ci sont importantes car elles permettent d'identifier certains déterminants importants qui orientent les habitudes de récupération des athlètes : leur perception vis-à-vis de l'importance de la récupération, les connaissances et les personnes qui orientent le choix des athlètes dans leur routine de récupération, les techniques qui sont déjà bien assimilées et celles qui le sont moins. Ces éléments, souvent hétérogènes entre les disciplines, sont cruciaux pour une mise en place efficace de stratégies de récupération (Venter et al. 2010; Crowther et al. 2017). Malgré cela, il apparaît que la nutrition, l'hydratation et le sommeil sont jugés par les athlètes comme des fondements essentiels de la récupération après un entraînement ou une compétition (Venter 2014). Cependant, une étude récente rapportant les stratégies de récupération adoptées par 70 joueurs de tennis de niveau régional à national montre que les méthodes nutritionnelles de récupération (par des apports en glucides) après l'exercice ne semblent être utilisées que par 34% des joueurs. Comme cela est observé dans d'autres disciplines, les entraîneurs orientent le plus souvent les joueurs vers des combinaisons de techniques de récupération : 56% des joueurs utilisent les rouleaux de massage, 43% utilisent l'immersion en eau froide, 37% utilisent une supplémentation protéique, 26% optent pour l'immersion en eau chaude. Il apparaît également que l'efficacité scientifique des techniques soit largement prise en compte. Cependant, dans la plupart des études, l'efficacité physiologique n'est pas retenue comme systématiquement nécessaire. Alors que l'avis des entraîneurs prend une place importante dans les choix opérés, les décisions relèvent principalement des préférences des athlètes provenant de leurs perceptions individuelles (Berdi et al. 2015; Kellmann and Beckmann 2017).

2. Techniques de récupération par le froid

Dans le contexte du tennis tel que décrit aux chapitres précédent (Chapitre 2, Chapitre 3), les techniques de CWI, WBC pourraient avoir un intérêt pour accélérer la récupération (e.g. capacités de force et de puissance, capacité de déplacement sur le

court lors d'un match) et permettre au joueur de pouvoir réitérer des performances dans un temps relativement restreint, notamment dans le cadre de tournois où les périodes de récupération sont souvent inférieures à 48 h (Reid and Duffield 2014). Toutefois, la fenêtre d'efficacité positive de ces techniques est réduite et n'est pas présente dans le cadre d'une récupération à « court terme » (i.e. 1-3h à la suite d'un exercice) (Halson 2011; Poppendieck et al. 2013). En revanche, au-delà de 6h et ce jusqu'à plusieurs jours après l'exercice, (i.e. entre deux matchs de tennis ou deux jours d'entraînements par exemple), des bénéfices sur les douleurs musculaires et les performances sont observés. De plus, ce type de techniques est également plus efficace pour des disciplines impliquant des déplacements portés comme le tennis (impliquant de nombreuses contractions excentriques) comparativement à des discipline non portée (ie. Cyclisme, natation) (Halson 2011). Toutefois, jusqu'à aujourd'hui, on dénombre peu d'études s'intéressant aux effets des techniques de CWI ou de WBC dans le contexte du tennis. Dans les sports collectifs, caractérisés par des efforts intermittents intenses similaires au tennis, les altérations métaboliques (diminution de la PCr intramusculaire, accumulations d'ions H+) ne semblent pas persister plus de quelques heures (Glaister 2005). En revanche, les altérations d'ordre structurelles et/ou neuromusculaires (centrales et/ou périphériques) semblent suivre des cinétiques similaires à celles observées jusqu'à maintenant au tennis (Rampinini et al. 2011; Pointon and Duffield 2012; Nedelec et al. 2012; Minett and Duffield 2014). Les tableaux 1 et 2 présentent l'état des connaissances actuelles sur l'efficacité des techniques de CWI et de WBC pouvant accélérer la récupération et/ou limiter la fatigue dans un contexte de pratique du tennis sur des périodes de temps allant jusqu'à 48h. Nous y avons également ajouté les études s'intéressant aux sports collectifs en raison de la grande proximité de contraintes mécaniques, physiologiques et mentales avec le tennis. Seules les variables évaluées au cours des études expérimentales de cette thèse ont été rapportées. Alors que les études de laboratoire trop éloignées d'un contexte de pratique n'ont pas été considérées dans ces tableaux, celles-ci seront intéressantes sur le plan mécanistique pour avancer les hypothèses permettant d'appréhender l'efficacité de ces techniques (Ihsan et al. 2020).

1. Immersion en eau froide (CWI)

Le tableau 7 présente les effets de l'immersion en eau froide (5 à 20 min – 9°C à 14°C) dans le cadre d'études effectuées dans les contextes écologiques de pratique précisés précédemment.

i. Douleurs musculaires (DOMS)

Les résultats issus des méta-analyses rapportent une sensation des douleurs musculaires entre 24 et 96 h après un exercice (Bleakley et al. 2012) et plus particulièrement entre 24 h et 48 h après des exercices intermittents à haute intensité (Leeder et al. 2012). Ces résultats sont cohérents avec les études effectuées en situation écologique (aiguë ou chronique). Duffield et al. (2014) rapporte l'efficacité de la CWI (en combinaison avec des vêtements de compression et des recommandations sur l'hygiène du sommeil) pour améliorer la perception des douleurs musculaires lorsque celle-ci est effectuée à deux reprises au cours d'une journée d'entraînement au tennis (fin d'entraînement du matin, fin de journée). Dans d'autres disciplines, la récupération par la CWI s'est montrée également efficace pour diminuer les douleurs musculaires (0-48h), lorsque celle-ci est appliquée après un ou plusieurs matchs de football (Pooley et al. 2019; Rowsell et al. 2011, 2009; Ingram et al. 2009), dans le cadre d'une compétition de basketball de niveau national(Montgomery et al. 2008b) ou encore durant une période d'entraînement intense chez des joueurs professionnels (Tavares et al. 2019) ou après un match de rugby (Pointon and Duffield 2012; Webb et al. 2013). D'autres études n'ont cependant pas rapporté d'effets positifs de la CWI sur les douleurs musculaires dans des contextes similaires (Leeder et al. 2019; Montgomery et al. 2008a). La diminution des douleurs musculaires immédiatement après l'application de la CWI repose sur l'effet antalgique (Chapitre 1, Figure 9) subséquent à l'application du froid qui ralentit la transmission nerveuse via l'inhibition des interneurones spinaux ou directement en inhibant les nocicepteurs cutanés (Ihsan et al. 2016; Friden and Lieber 2001). L'application du froid combiné à l'effet de la pression hydrostatique est également supposée limiter l'inflammation associée aux dommages musculaires induit

par l'exercice (Chapitre 1, Figure 9) en limitation la formation d'œdème et l'activité métabolique au sein du muscle : cette hypothèse est avancée pour expliquer une diminution des sensations de douleurs les jours suivants l'utilisation de la CWI. Enfin, l'effet placebo n'est pas à négliger puisque celui-ci a été rapporté comme contributeur de la diminution des sensations de douleurs musculaires dans quelques récentes études (Broatch et al. 2014; Leeder et al. 2012; Pointon and Duffield 2012). Leeder (2019) s'appuie d'ailleurs sur l'hypothèse que les participants n'avaient pas de croyance particulière en l'efficacité de la CWI (Leeder et al. 2019) pour interpréter l'absence d'effet de cette technique sur la sensation de douleur. L'absence d'effet dans l'étude de Montgomery et al. (2008a) peut en partie s'expliquer par la durée du protocole (i.e. 5 min) inférieure aux durées préconisées dans des études récentes : 11-15 min pour 11-15°C (Machado et al. 2016).

ii. Composante structurelle

L'impact de la CWI sur les cinétiques de la concentration en CK après un exercice inducteur de dommages musculaires semble moins évident du fait des résultats contradictoires rapportés dans la littérature. La moitié des études observe que la CWI est efficace pour diminuer la concentration sanguine en CK (Ascensao et al. 2011; Webb et al. 2013; Leeder et al. 2019; Pooley et al. 2019). Les mécanismes sous-jacents seraient liés à la diminution de la température (Chapitre 1, Figure 9) et à l'effet de la pression hydrostatique (Wilcock et al. 2006; Ihsan et al. 2016). La première hypothèse avancée est une diminution de l'efflux de CK dans la circulation sanguine en raison d'une vasoconstriction au niveau des capillaires sanguins musculaires (Ihsan et al. 2016). La seconde serait liée à une atténuation de la phase inflammatoire associée aux dommages musculaires secondaires, diminuant ainsi l'efflux de CK vers la circulation sanguine (Ihsan et al. 2016). Les cinq études du tableau 7 illustrent ces résultats contradictoires puisqu'aucune n'observe d'effet significatif positif sur les cinétiques de la concentration en CK (Ingram et al. 2009; Rowsell et al. 2009; Montgomery et al. 2008a; Pointon and Duffield 2012; de Freitas et al. 2019). Plusieurs postulats sont avancés concernant ces études. Certains auteurs émettent l'hypothèse que ce marqueur (i.e.

concentration de la CK) ne reflèterait pas réellement la présence de dommages musculaires, car celui-ci n'est pas corrélé avec la perte de force (Warren et al. 1999). Sa présence serait plutôt dépendante des changements de la circulation sanguine générale (Ingram et al. 2009; Leeder et al. 2012; Ihsan et al. 2016). D'autres études, rapportant des concentrations de la CK élevées, proposent que la CWI ne serait pas efficace pour limiter l'inflammation subséquente à des exercices inducteurs de dommages musculaires importantes (Pointon and Duffield 2012; Rowsell et al. 2009). Certaines études mécanistiques ont permis depuis de mettre en évidence que la vasoconstriction consécutive à l'application du froid n'avait pas d'impact sur les réponses inflammatoires associées aux dommages musculaires induits par l'exercice (Peake et al. 2017). Mawhinney (Mawhinney et al. 2017) suggère qu'une diminution de la circulation sanguine musculaire provoquée immédiatement après l'application du froid limiterait l'installation d'œdème responsable des sensations de douleurs musculaires (Mawhinney et al. 2017).

iii. Performances

La CWI semble être efficace pour limiter la chute des performances à la suite d'exercice d'endurance intermittents (Ihsan et al. 2016; Leeder et al. 2012). La méta-analyse de Poppendieck (Poppendieck et al. 2013) évalue entre 2 et 3% l'amélioration des performances grâce à l'utilisation de techniques de récupération par le froid. Cependant, cette méta-analyse inclut au moins 4 études utilisant des protocoles de fatigue loin des efforts rencontrés dans des cadres écologiques de pratique (e.g. répétitions de contractions excentriques sur ergomètre). Deux études présentées (Tableau 7) ne rapportent aucun effet de la CWI sur les performances (Rupp et al. 2012; Rowsell et al. 2009). Au contraire, d'autres études rapportent un effet positif de la CWI, comparativement à une récupération passive, sur un ou plusieurs paramètres de performance : puissance (CMJ, SJ), force (MVC K EX), vitesse/agilité (RSA, Sprints) et performances spécifiques (Temps de jeu, distance totale parcourue, taux de frappes au tennis). Tandis que certains auteurs mettent en relation l'amélioration des performances et la diminution des concentrations de la CK après l'utilisation de la CWI

(Ihsan et al. 2016; Ascensao et al. 2011) d'autres études rapportent un bénéfice de la CWI sur les performances en l'absence d'effet sur le taux de créatine kinase sanguine (Ingram et al. 2009; Pointon and Duffield 2012). La corrélation entre la concentration de la CK et l'atténuation de la chute des performances et/ou leur amélioration à la suite de l'application de la CWI ne semble pas claire. Pour appuyer cela, une récente étude a mis en évidence que l'amélioration des performances à la suite de la CWI comparativement à l'immersion tempérée, n'était pas corrélée avec une diminution des dommages musculaires (Bouzid et al. 2018). Il semble plutôt que l'effet bénéfique de la CWI soit associé à une diminution des douleurs musculaires. En effet, les études rapportant un bénéfice de la CWI sur les performances (+2,1%, g = 0,21) démontrent également un effet significatif sur les sensations de douleurs musculaires (Poppendieck et al. 2013). Toutefois, ce lien de cause à effet n'a pas encore été clairement établi et reste à investiguer.

- **Paramètres de puissance**

Sept études ont rapporté une amélioration des performances en puissance, principalement correspondant aux performances sur des périodes allant de 12 à 72h. Dans une récente étude, Stephens et al. (2017) avance également que la CWI pourrait être plus efficace sur les mouvements impliquant le cycle étirement-raccourcissement (Stephens et al. 2018).

- **Paramètres de force**

La majorité des études dans les contextes écologiques présentés rapportent un bénéfice de la CWI sur les paramètres de force. Hormis l'étude de Pointon and Duffield (2012) qui rapporte un effet immédiat de la CWI sur la MVC (2h), la MVC est améliorée 24h à 72h après l'exercice (Ascensao et al. 2011; Ingram et al. 2009; Bouzid et al. 2018). Cependant, les effets positifs de la CWI sur les capacités de force (MVC) ne sont pas toujours rapportés (Broatch et al. 2011).

- **Paramètres de vitesse**

Les résultats sur la récupération des performances en sprint sont plus mitigés. Deux études rapportent des bénéfices sur la récupération des performances en sprint

(Montgomery et al. 2008b) (Leeder et al. 2019). La première étude fait état d'une amélioration globale des performances (sprints, saut vertical, exercices spécifiques) associée à une diminution des sensations de douleurs musculaires laissant supposer l'effet bénéfique de la CWI pour limiter l'expression fonctionnelle des dommages musculaires induits (Montgomery et al. 2008b). La seconde, rapporte une amélioration des capacités de sprints en l'absence d'une amélioration de la force et de la puissance. Les dommages musculaires, relativement modérés, associés à une faible diminution des performances de CMJ et de MVC n'auraient impacté que les performances en sprint, performance partiellement récupérée avec l'application de la CWI. Les trois autres études n'observent aucune efficacité du froid sur ce type de performance (Ascensao et al. 2011; Pointon and Duffield 2012; Rowsell et al. 2009) et émettent l'hypothèse d'une moindre efficacité du froid sur les dommages musculaires associés à une altération du couplage excitation-contraction. Cela pourrait même impacter négativement ce mécanisme en raison d'une diminution de la contraction musculaire induite par le froid (Stephens et al. 2018).

- **Paramètres neuromusculaires**

Une seule étude s'est intéressée à l'effet potentiel de la CWI sur la composante neuromusculaire périphérique et centrale (Pointon and Duffield 2012). Celle-ci rapporte l'amélioration de la MVC à court terme à la suite de l'utilisation de la CWI (2 h après l'exercice et la récupération) associée à une amélioration de la commande centrale (VA, RMS). Les auteurs n'évoquent pas le potentiel effet antalgique immédiat du froid lié à la CWI mais proposent que l'effet positif provienne d'une interaction entre les altérations périphériques (propriétés contractiles du muscle) et une amélioration de la commande nerveuse centrale qui permettrait le recrutement des fibres musculaires. Alors que la CWI n'a aucun effet sur les concentrations de la CK, les auteurs évoquent l'amélioration des sensations de douleurs musculaires au-delà de 2 h (jusqu'à 48 h) via un potentiel effet placebo.

- **Performances spécifiques**

Alors qu'elles sont peu nombreuses à ce jour, les études rapportent un effet bénéfique de la CWI sur les performances spécifiques à la discipline (e.g. fréquence de frappe, temps de jeu effectif) (Duffield et al. 2014). Les auteurs mettent en lien ces résultats avec l'amélioration concomitantes des capacités fonctionnelles observées (Montgomery et al. 2008b; Rowsell et al. 2009; Duffield et al. 2014).

iv. Fatigue perçue et perception de la récupération

La réduction des sensations de fatigue associée à l'utilisation de l'immersion en eau froide n'est pas encore bien élucidée. La CWI a montré des effets bénéfiques pour diminuer les perceptions de fatigue lors d'un tournoi de basketball de 3 jours impliquant des joueurs de niveau national (Montgomery et al. 2008b). Durant une saison professionnelle de football australien l'immersion en eau froide a été efficace pour améliorer les sensations de récupération des joueurs (Bahnert et al. 2013), comme cela a été également observée par l'équipe de Stanley et al. (2012). Les études suggèrent que la confiance des participants vis-à-vis des bénéfices de la CWI pour améliorer la récupération (effet placebo) soit principalement à l'origine de la diminution de la fatigue perçue (Broatch et al. 2014; Wilson et al. 2019). Cet effet ne serait pas à négliger compte tenu de l'impact potentiel de la perception de la fatigue sur les performances (Marcora 2009; St Clair Gibson and Noakes 2004).

v. Efficacité de la récupération dans le contexte du tennis

L'étude de Duffield et al. (2014) est la seule analysant l'efficacité de la CWI combinée au port de vêtements de compression et à des recommandations sur l'hygiène du sommeil dans le contexte du tennis. Ces résultats issus de cette étude semblent concordants avec les résultats issus des études effectuées sur des activités intermittentes (voir partie i à iv de la partie 1. Immersion en eau froide »). Ainsi, l'amélioration des performances spécifiques (déplacements, taux de frappe) est associée à une amélioration des capacités de puissance (CMJ) et une perception des douleurs musculaires atténuées

(Duffield et al. 2014). Bien que les mécanismes explicatifs évoqués ci-avant puissent en partie expliquer ces résultats, aucune étude n'apporte à ces jours des preuves d'interactions directes entre ces différents paramètres.

Les nombreuses études disponibles à ce jour concernant l'immersion en eau froide font état de résultats hétérogènes quant à l'efficacité de la CWI autant sur les paramètres physiologiques que sur les paramètres de performance mesurés. Les résultats parfois contradictoires s'expliquent par une disparité dans les caractéristiques anthropométriques des participants, la population étudiée, dans les protocoles (durée et température), ainsi que dans les modes d'exercice utilisés pour induire la fatigue (Stephens et al. 2018; Poppendieck et al. 2013; Halson 2011; Ihsan et al. 2016). Ce type de protocoles est contraint à l'utilisation d'échantillons de faible taille (Tableau 7) qui sont souvent associés à une variabilité inter-individuelle importante vis-à-vis des cinétiques des différents paramètres investigués. Cela nécessite de sélectionner les paramètres d'intérêts puis de les évaluer en fonction du contexte spécifique de la discipline. Malgré tout, les études effectuées dans les contextes écologiques de pratiques observent majoritairement que la CWI est efficace pour améliorer la récupération dans des mesures différentes selon le paramètres associées à la fatigue mesurée (Douleurs musculaires, CK, performances) (Ihsan et al. 2016; Halson 2011; Leeder et al. 2012; Poppendieck et al. 2013). En considérant l'ensemble de ces facteurs, il est raisonnable d'avancer que l'immersion en eau froide puisse être bénéfique lorsqu'elle est utilisée pour récupérer entre deux journées d'entraînement ou de compétition (périodes comprises entre 24-48h) dans le contexte du tennis. Alors que l'immersion en eau froide pourrait également agir positivement sur les facteurs neuromusculaires d'origine centrale, des études supplémentaires sont toutefois nécessaires (Ihsan et al. 2016; Pointon and Duffield 2012).

Auteurs & Population	Exercice	Intervention	Composante structurelle	Composante neuromusculaire	Performances Fonctionnelles et spécifiques	Autres variables d'intérêts
(Ascensao et al. 2011) 20 footballeurs élites **P**	Match de football (Mesures Post-match, Post 24h, 48h)	CWI (10min à 10°C) TWI (10min à 35°C)	↓ CK (24h→48h post), ↓Mb (30min) ↓ Douleurs musculaires (24h post)		↑K EX MVC (Post 24h) Ø Sprints 20m, SJ	
(Vickery et al. 2014) 8 joueurs de tennis entraînés **RC**	Répétitions de deux sessions de tennis sur une journée (Mesures Pre/Post/Post-rec, entraînement et match, Post 24h)	CWI (15min à 11°C), CGs (3h), recommandations sur l'hygiène du sommeil (2 sessions : Post-entraînement, Post-Match)	↓ Douleurs musculaires (fin entraînement → post 24h)		↑Temps de jeu (Match) ↑Taux de frappes (Match) ↑CMJ (Pre-match)	↓Fatigue perçue (Post-rec entraînement →post 24h)
(Ingram et al. 2009) 11 sportifs entraînés **RC**	Exercice simulé (80min) de sport collectif (Mesures Post-exercice, Post 24h, 48h)	15 min CWI (10°C), CWT (10/40°C), CON	↓ Douleurs musculaires (Post 24h, 48h) Ø CK (24h, 48h post)		↑K EX, FL MVC (Post 48h) ↑ RSA (Post 48h)	

Auteurs & Population	Exercice	Intervention	Composante structurelle	Composante neuromusculaire	Performances Fonctionnelles et spécifiques	Autres variables d'intérêts
(King and Duffield 2009) 10 joueuses de netball **RC**	Enchainement de 2 exercices intermittents sur 2 jours (4× 15min)	15min CWI (9,3°C), ACT (40% VO2max), CWT (9,7°C/39,1°C), CON	↓ Douleurs musculaires (Post 24h)		↑CMJ (post 24h)	
(Rowsell et al. 2009) 13 footballeurs juniors élites **P**	4 jours consécutifs de match de football (Mesures avant match)	20 min CWI (10°C), TWI (34°C)	↓ Douleurs musculaires (Jour 4) Ø CK		Ø CMJ, RSA (Jour 5 vs Jour 1)	↓Fatigue perçue
(Rowsell et al. 2009) 20 footballeurs juniors élites **P**	4 jours consécutifs de match de football (Mesures avant match≈ 22h post match)	CWI (5×1min 10°C), TWI (5×1min 34°C)	↓ Douleurs musculaires (Jour 4)		↑Distance totale parcourue (Match 3, Match 4)	↓Fatigue perçue
(Rupp et al. 2012) 22 footballeurs de 1ère division	2 Tests Yo-Yo R=48h (Mesures inclues Yo-Yo)	15min CWI (12°C), PAS (2 sessions : Post-exercice, Post-24h)			ØCMJ Ø Performances spécifiques au Yo-Yo	Ø Fatigue perçue, RPE

Auteurs & Population	Exercice	Intervention	Composante structurelle	Composante neuromusculaire	Performances Fonctionnelles et spécifiques	Autres variables d'intérêts
(Montgomery et al. 2008b) 29 joueurs de basket (niveau national) **P**	Tournoi de 3 jours (Mesures Jour 1-Jour3 : Pre/Post-match ; Jour 4)	5 min CWI (11°C), CGs (15min), CON (supplémentation glucides/Etirements)	↓ Douleurs musculaires (Jour 4 vs Jour 1) = Douleurs musculaires (Mesures Pre-matchs)		↑ Performances (sprint 20m, Saut vertical, exercices spécifiques, flexibilité)	↓ Fatigue perçue (Jour 4 vs Jour 1)
(Montgomery et al. 2008b) 29 joueurs de basket (niveau national) **P**	Tournoi de 3 jours (Mesures Jour 1-Jour3 : Pre/Post-match ; Jour 4)	5 min CWI (11°C), CGs (15min), CON (supplémentation glucides/Etirements)	↓ Douleurs musculaires (Jour 4 vs Jour 1) = Douleurs musculaires (Mesures Pre-matchs) Ø CK, Mb			
(Webb et al. 2013) 21 joueurs de rugby élite **P**	Match de rugby (Mesures Pre 24h, Post 1h, Post 18h, Post 42h)	5 min CWI (10-12°C), CWT (3×1 min 10°C/2min 42°C), ACT	↓ Douleurs musculaires (Post 1h, Post 18h, Post 42h), ↓ CK (Post 42h)		↑ Performances (saut vertical : Post 42h)	

Auteurs & Population	Exercice	Intervention	Composante Mécanique	Composante neuromusculaire	Performances Fonctionnelles et spécifiques	Autres variables d'intérêts
(Garcia et al. 2016) 8 rugbymen niveau national **RC**	Protocole de fatigue spécifique rugby(40min) (Pre/post, Post-rec, Post 12h)	20 min CWI(8,9°C), CON			↓ Test agilité, CMJ (Post-rec) ↑Test CMJ 30s (Post 12h)	↑ Perception de récupération (post-12h)
(de Freitas et al. 2019) 12 volleyeurs **P**	6 jours d'entraînements biquotidiens (Mesures Post entraînements)	10 min CWI (10°C), PLAC (exposition LED) (Fin de journée d'entraînement)	Ø CK, Douleurs musculaires		↑ CMJ (Jour 2 vs Jour1) Ø Performances (Test agilité, SJ)	
(Leeder et al. 2019) 21 footballeurs entraînés **P**	Simulation de compétition (3 Jours ×Pre-Post LIST, post LIST3 24h) R=48h	14 min CWI (14°C), CON	↓ CK (Pre-Post LIST3) = Douleurs musculaires		↑ Sprints (post LIST3 24h) Ø Performances (K EX MVC, CMJ)	5 séries 15min
(Pooley et al. 2019) 15 footballeurs juniors élites **RC**	Match de football (80min) Mesures Pre-Post, post 48h)	10 min CWI (14°C), ACT, Etirements	↓ CK (Post 48h) ↓Douleurs musculaires (Post 48h)		↑ CMJ (Post 48h)	

Auteurs & Population	Exercice	Intervention	Composante structurelle	Composante neuromusculaire	Performances Fonctionnelles et spécifiques	Autres variables d'intérêts
(Tavares et al. 2019) 23 rugbymen élites **P**	3 semaines d'entraînement intense (Mesures 2 × semaines)	10 min CWI (10°C), CON (Fin journée entraînement)	↓ Douleurs musculaires (sur les 3 semaines d'entraînement)		↑ CMJ (sur les 3 semaines d'entraînement)	= Perception de la récupération (sur les 3 semaines d'entraînement)
(Bouzid et al. 2018) 9 footballeurs élites **P**	Séance de LIST (Mesures Pre, Post-rec, 24h, 48h, 72h)	10 min CWI (10°C), TWI (28°C)	↓ CK (Post-rec, Post 48h, 72h) ↓ Douleurs musculaires (Post 48h, 72h)		↑SJ (Post 24h, 48h, 72h) ↑CMJ (Post-rec, Post 24h, 48h, 72h) ↑Sprints (Post-rec, Post 48h, 72h) ↑ MVC K EX (Post 48h, 72h)	
(Pointon and Duffield 2012) 10 rugbymen **RC**	Séance de sprints intermittents spécifiques (2 × 30 min) (Mesures Pre/Post exercice, post-rec, post 2h et 48h)	20 min CWI (9,2°C - incluant tacles), CON(incluant tacles),CON (sans tacles)	Ø CK ↓ Douleurs musculaires (Post 2h)	↑ VA, RMS ↑ PPA, Pt (Post-rec, Post 2h) ↓ Paramètres PPA (Post-rec : 1/2 RT, RR, CD durée pic à pic) (*Vastus lateralis*, *vastus medialis*)	↑ MVC K EX (Post exercice) Ø Sprints	

Tableau 7. Effets de l'immersion en eau froide sur la fatigue d'origine structurelle, neuromusculaire, sur les performances fonctionnelles et spécfiques ainsi que sur les paramètres perceptifs. Type d'étude, P : étude parallèle ; RC : étude randomisée croisée - Exercice, LIST : Exercice simulation match de football (Loughborough Intermittent Shuttle Test); Yo-Yo : test Yo-Yo des capacités d'endurance spécifique au football – Mesures, Post-rec : mesure post récupération – Technique de récupération, CWI : immersion en eau froide ; CWT : immersion contrastée ; CG : vêtements de compression ; TWI : immersion tempérée ; PLAC : technique placebo ; ACT : récupération active ; CON : condition contrôle, récupération passive – Mesures biologiques, CK : concentration sanguine en créatine kinase ; Mb : concentration sanguine en myoglobine – Performances fonctionnelles, K EX MVC : pic de couple de force mesuré lors d'une contraction maximale isométrique (MVC) des extenseurs du genou ; K FL MVC : pic de couple de force mesuré lors d'une MVC des fléchisseurs du genou ; CMJ : contre mouvement jump ; RSA : habileté à répéter des sprints; SJ : squat jump - Impact de la technique de récupération sur les différents paramètres, ↓ : diminution ; ↑ :amélioration; Ø : pas d'effet.

2. Cryothérapie corps entier (WBC)

Peu d'études ont évalué les effets de la cryothérapie corps entier dans le cadre d'exercices intermittents en contextes écologiques (Grainger et al. 2019; Russell et al. 2017; Ziemann et al. 2012). De ce fait le tableau 2 inclus des études donc la nature de l'exercice diffère de l'activité tennis (trail, natation synchronisée, triathlon) afin de proposer une vision d'ensemble des effets bénéfiques potentiels de cette technique.

i. Douleurs musculaires (DOMS)

À ce jour, l'utilisation de la cryothérapie corps entier repose principalement sur sa capacité à diminuer les douleurs musculaires (Chapitre 1, Figure 8). Comme l'immersion en eau froide, la diminution de la température musculaire et cutanée, provoquant la diminution des influx nerveux responsables de la douleur, serait à l'origine de l'effet antalgique immédiat. L'effet positif sur les douleurs musculaires à plus long terme serait associée à une atténuation de l'inflammation associées aux dommages musculaires (Costello et al. 2012a; Costello et al. 2012b; Bleakley et al. 2014). Les études effectuées en conditions standardisées de laboratoire rapportent des résultats positifs, immédiatement après l'utilisation de la WBC et jusqu'à 48 h (Hausswirth et al. 2011; Fonda and Sarabon 2013) ou 72h (Hohenauer et al. 2020; Abaidia et al. 2017). Dans ces contextes, la WBC permet de diminuer les douleurs musculaires associées à des dommages musculaires induits par des exercices de type pliométriques et/ou des simulations de trail après une (Abaidia et al. 2017; Hohenauer et al. 2018; Hohenauer et al. 2020) ou plusieurs expositions (Hausswirth et al. 2011; Fonda and Sarabon 2013). Toutefois, les études effectuées dans un contexte écologique ne rapportent pas d'amélioration des douleurs musculaires suite à une exposition post-exercice (Russell et al. 2017) ou durant plusieurs semaines d'entraînement incluant des expositions quotidiennes (Grainger et al. 2019) à la WBC. Il semblerait que l'effet bénéfique n'est réel que pour atténuer les sensations de douleurs musculaires associées à des dommages musculaires modérés induits en condition standardisée de laboratoire, ne reflétant pas

les dommages musculaires inférieurs induits, en contexte réel de pratique, lors d'entraînements quotidiens (Grainger et al. 2019; Russell et al. 2017).

ii. Composante structurelle

Sur les trois études présentées (Tableau 8) seule une étude rapporte l'effet positif de la WBC sur la réponse inflammatoire associée aux dommages musculaires. Au cours d'une période d'entraînements de tennis, Ziemann et al. (2012) mettent en évidence une diminution de l'activité de la CK. En revanche, il est à noter que les séances de WBC étaient pratiquées deux fois par jour et avant les entraînements alors qu'elles sont communément appliquées après l'exercice dans un objectif de récupération.

iii. Performances

Un bénéfice de l'utilisation chronique de la WBC sur des paramètres de performance a été rapporté dans des études en contexte de surcharge d'entraînement. La WBC permettrait de diminuer certains symptômes associés au surmenage fonctionnel : réduction de la quantité de sommeil, augmentation de la fatigue perçue et diminution des performances (Schaal et al. 2015) (Le Meur et al. 2017). La réactivation parasympathique stimulée par la WBC associée au maintien de la quantité de sommeil aurait permis une meilleure tolérance aux charges d'entraînements élevées (Schaal et al. 2015). Les auteurs émettent également l'hypothèse d'une atténuation des réponses inflammatoires concomitante à l'augmentation de la noradrénaline provoquée par l'exposition à la WBC (Pournot et al. 2011b). Il serait également possible que la WBC, via une stimulation de la libération de la ß-endorphine, puisse améliorer les sensations de bien-être permettant ainsi de limiter la chute des performances (Partridge et al. 2019). Enfin, les auteurs n'excluent pas l'effet placebo évoqué précédemment dans cette partie (Broatch et al. 2014). Les effets à court-terme (>2 h) de la WBC sur les douleurs musculaires n'ont été que peu démontrés à ce jour (Russell et al. 2017; Rose et al. 2017). Sur l'ensemble des autres études présentées, aucun n'a mis en évidence une

amélioration de paramètres fonctionnels (CMJ, Saut vertical) que cela soit après une ou plusieurs expositions à la WBC.

Il est important de noter que l'ensemble des études rapportant des effets significatifs de la WBC ne reproduisent pas les conditions réelles du haut niveau (Costello et al. 2012a; Fonda and Sarabon 2013; Rose et al. 2017). Il semble donc nécessaire de s'approcher au plus près de ces conditions de pratique pour évaluer l'efficacité de cette technique chez une population de joueur de tennis élite.

iv. Fatigue perçue et perception de la récupération

Peu d'études ont évalué l'impact de la WBC sur les perceptions de fatigue et de récupération. L'étude d' Hausswirth et al. (2011) rapporte une amélioration de la sensation de « bien-être » après trois sessions de WBC effectuées à la suite d'un trail simulé (Hausswirth et al. 2011). Des études démontrent que l'utilisation chronique de la WBC a permis d'atténuer la perception de fatigue chez des nageuses synchronisées élites lors d'un période de 14 jours de surcharge d'entraînement (Schaal et al. 2015). Enfin, des perceptions de qualité de sommeil améliorées ont été mise en évidence après plusieurs expositions à la WBC(Bouzigon et al. 2014; Schaal et al. 2015) lors d'études de terrain impliquant des athlètes de haut-niveau

Auteurs	Exercice	Intervention	Composante Mécanique	Performances Fonctionnelles et spécifiques	Autres variables d'intérêts
Grainger 2019 18 rugbymen élites **RC**	12 semaines d'entraînement (Mesures 2 dernières semaines : Pre-entraînement/Post entraînement +PBC)	9 semaines incluant de la PBC CON (4 semaines après exposition) 2 min à -120°C	Ø Douleurs musculaires	Ø CMJ, Saut vertical, charge externe (3D Load)	Ø Sommeil, Perception de récupération « Bien-être »
Russell 2017 14 footballeurs junior élite **RC**	Test de sprints (15 × 30 min) (Mesures Pre/Post exercice, post 2h, 24h)	WBC (30 sec à -60°C, 2 min – 135°C), CON	Ø CK Ø Douleurs musculaires	Ø CMJ	
Schaal 2014 9 nageuses synchronisées élites **RC**	14 jours d'entraînement intenses (Surcharge)	WBC (3min à – 110°C), CON (Sessions post entraînement)		↑ Performances (Contre-la-montre sur 400m nage)	↑ Qualité du sommeil (latence d'endormissement, durée du sommeil) ↓ Fatigue perçue ↓ RPE (entraînements)

Auteurs	Exercice	Intervention	Composante Mécanique	Performances Fonctionnelles et spécifiques	Autres variables d'intérêts
Hausswirth 2011 9 participants entraînés **RC**	Trail simulé (48min) (Mesures Pre/Post trail, Post 1h, Post 24h, Post 48h)	WBC (3min à – 110°C), Récupération par infrarouge, CON (3 sessions : Post-trail, Post 24h, Post 48h)	↓ Douleurs musculaires (Post 1h, 24h, 48h) Ø CK	↑ K EX MVC (Post 1h, Post 24h, Post 48h)	↑ Perception de récupération « Bien-être » (Post 24h, 48h)
Le Meur 2018 16 triathlètes entraînés **P**	Période de 7 jours d'affûtage (Après 3 semaines de surcharge d'entraînement	WBC (sessions post-entraînement affûtage)		↑ Performances (Test 340m)	Ø Fatigue perçue
Ziemann 2012 12 joueurs de tennis entraînés **P**	Période 5 jours d'entraînement (Mesure Pre/Post semaine d'entraînement)	3 min WBC (-120°C), CON (2 × Jour **avant** l'entraînement)	↓ CK	↑ Précisions des frappes	

Tableau 8. Effets de la cryothérapie corps entier sur la fatigue d'origine structurelle, sur les performances fonctionnelles et spécifiques ainsi que sur les paramètres perceptifs. Technique de récupération, WBC : cryothérapie corps entier ; PBC : cryothérapie partielle - Mesures biologiques, CK : concentration sanguine en créatine kinase – Performances fonctionnelles, K EX MVC : pic de couple de force mesuré lors d'une contraction maximale isométrique (MVC) des extenseurs du genou ; CMJ : contre mouvement jump - Impact de la technique sur les différents paramètres, ↓ : diminution ; ↑ : amélioration ; Ø : pas d'effet.

3. Comparaison de l'immersion en eau froide et de la cryothérapie corps entier

Hormis les méta-analyses de Hohenauer et Poppendieck effectuées il y a quelques années et non exclusives des études écologiques, ce n'est que récemment que plusieurs auteurs se sont attachés à comparer les techniques d'immersion en eau froide et de cryothérapie corps entier (Hohenauer et al. 2015; Poppendieck et al. 2013). Brièvement les méta-analyses rapportent un effet supérieur de la CWI comparativement à la WBC pour diminuer les douleurs musculaires jusqu'à 96 h après un exercice. Les auteurs des méta-analyses précédentes invoquent alors les différences observées par une conductivité thermique inférieure de la WBC comparativement à la CWI (Mawhinney et al. 2017; Poppendieck et al. 2013).

A ce jour, quatre études comparant l'efficacité aiguë de ces deux techniques mettent en évidence des résultats contradictoires dans le cadre de protocoles de laboratoire standardisés (Abaidia et al. 2017; Hohenauer et al. 2018; Wilson et al. 2019; Wilson et al. 2018). Les résultats issus de ces recherches ne peuvent être transférés au contexte de pratique spécifique au tennis et sont présentés à titre indicatif dans le tableau 9.

Auteurs	Exercice	Intervention	Composante Mécanique	Performances Fonctionnelles et spécifiques	Autres variables d'intérêts
Abaïdia 2016 10 participants entraînés **P**	Exercices excentriques (Ischio-jambiers : 5 × 15 répétitions) (Mesures post-exercice, Post 14h, 48h, 72h)	CWI : 10min à 10°C WBC (3min -110°C)	↓Douleurs musculaires (CWI > WBC : Post 48h) ↓CK (CWI > WBC: Post 24h, 72h)	↑ CMJ (CWI>WBC: Post 72h) Ø K FL MVC	↑Perception de récupération (CWI>WBC : Post 24h)
Wilson 2018 31 participants entraînés en endurance **P**	Marathon simulé (Mesures avant marathon, Post 24h, Post 48h)	WBC (3min à – 85°C), CWI (10min à 8°C) , PLAC (Jus de cerise)	↑ CK (WBC, CWI > PLAC) ↓ Douleurs musculaires (WBC> CWI, PLAC et CWI=PLAC)	↓ K EX MVC (WBC > CWI > PLAC) (Post 24h, 48h) Ø Drop Jump	
Hohenauer 2019 20 participants entraînés **P**	EIMD (5 × 20 Drop Jump) (Mesures Pre, post 1h, Post 24h, Post 48h)	PBC (30 sec à -60°C) puis 2min à -135°C), CWI (10 min à 10°C), CON	Ø Douleurs musculaires (PBC, CWI)	Ø MVC, Saut vertical (PBC, CWI)	

Tableau 9. Comparaison des effets de l'immersion en eau froide et de la cryothérapie corps entier sur la fatigue d'origine structurelle, sur les performances fonctionnelles et spécifiques ainsi que sur les paramètres perceptifs. Technique de récupération, WBC : cryothérapie corps entier ; PBC : cryothérapie partielle - Mesures biologiques, CK : concentration sanguine en créatine kinase – Performances fonctionnelles, K EX MVC : pic de couple de force mesuré lors d'une contraction maximale isométrique (MVC) des extenseurs du genou ; K FL MVC : pic de couple de force mesuré lors d'une MVC des fléchisseurs du genou ; CMJ : contre mouvement jump - Impact de la technique sur les différents paramètres, ↓ : diminution ; ↑ : amélioration ; Ø : pas d'effet.

4. Intérêt des techniques de récupération pour diminuer la fatigue subjective

La dimension psychologique ayant un impact sur les réponses physiologiques (Kentta and Hassmen 1998) l'athlète qui est convaincu de l'efficacité d'une technique de récupération peut voir ses performances améliorées (Cook and Beaven 2013; Stanley et al. 2012). Des auteurs suggèrent même que les bénéfices psychologiques, mesurés au travers des questionnaires d'auto-évaluation, pourraient avoir un impact positif plus important sur les performances que les bénéfices physiologiques liés à la technique de récupération en elle-même. Sans négliger l'effet placebo désormais reconnu (Broatch et al. 2014), évaluer l'efficacité des techniques de récupération sur des paramètres subjectifs semble donc approprié et nécessaire. C'est particulièrement vrai dans un contexte élite comme en témoigne l'augmentation des études rapportant ce type de paramètres (douleurs musculaires, fatigue, stress…). Dans le cadre de cette thèse, nous considérons principalement les qualificatifs inclus dans le questionnaire de Hooper en rapportant les résultats sur les douleurs musculaires, la perception de la fatigue, le stress, la qualité du sommeil ainsi que la mesure de la perception de récupération (Hooper et al. 1995).

En raison d'une production scientifique importante ces dix dernières années, certains auteurs se sont attachés à produire des revues systématiques et méta-analyses afin d'établir un état des lieux général sur l'efficacité des techniques de récupération : techniques d'immersion, massages, cryothérapie corps entier, étirements, vêtements de compression, et récemment les rouleaux de massage. Dans cette partie évaluant les effets de la majorité des techniques de récupération les plus communément utilisées, nous nous sommes donc attachés à relater les tendances globales de l'effet de chacune d'entre-elles à partir de ce type d'études statistiques sur les variables subjectives d'intérêts utilisées dans le cadre de cette thèse. Alors que la prise en compte des résultats statistiques sont intéressants dans ce cadre spécifique, il est important de souligner que les méta-analyses incluent des protocoles expérimentaux très hétérogènes notamment au niveau de la population étudiée et/ou de l'exercice induisant la fatigue. L'interprétation générale issue de ces études n'est donc pas systématiquement transférable à une population élite.

1. Efficacité des techniques de récupération pour améliorer les perceptions

i. Massages

De nombreuses études ont rapporté l'impact positif des massages de récupération sur les réponses perceptives des athlètes. Des études menées sur des basketteurs montrent notamment une diminution de la fatigue perçue jusqu'à 24 h après une compétition (Delextrat et al. 2013), alors qu'une étude a mis en évidence une amélioration de la fatigue perçue dans les 30 min suivant un exercice en cyclisme (Ogai et al. 2008). Malgré des résultats relativement hétérogènes, plusieurs revues ont également rapporté l'efficacité des massages sur les douleurs perçues lorsqu'ils sont effectués peu de temps après un exercice provoquant des dommages musculaires de 24 à 72 h (Barnett 2006; Guo et al. 2017) (Weerapong et al. 2005). Enfin, des études rapportent une amélioration de la perception de la récupération après après l'application de massages (Hemmings et al. 2000; Barnett 2006).

ii. Rouleaux d'auto-massage

Jusqu'à aujourd'hui les principaux effets rapportés des rouleaux d'auto-massage reposent sur la diminution de la sensation de douleurs musculaires de manière significative jusqu'à 72 h après un exercice (Wiewelhove et al. 2019) (Macdonald et al. 2014).

iii. Récupération active

La revue récente de Van Hooren 2018 (Van Hooren and Peake 2018) rapporte des résultats contradictoires concernant l'efficacité des techniques de récupération active effectuées dans l'heure qui suit la fin de l'exercice. Le niveau de l'athlète, l'intensité de l'exercice et le protocole utilisé peuvent notamment expliquer ces différences. Globalement, sur 16 études, 14 ne permettent pas de conclure sur l'éventuel bénéfice qu'apporterait la récupération active sur la diminution des sensations de douleurs

musculaires par rapport à une récupération passive. Les 2 restantes montrent en revanche un bénéfice significatif. Les résultats de la méta-analyse de Dupuy et al. (2018) contredisent ces résultats puisqu'ils suggèrent un effet positif de la récupération active sur les douleurs musculaires (SMD=-0,94). Toutefois, il est important de noter que le nombre d'études retenues n'est pas le même dans ces deux articles ((Van Hooren and Peake 2018) n=16 ; (Dupuy et al. 2018) n=8), ce qui pourrait largement contribuer à expliquer cette différence de constat. Alors que certaines études ne rapportent aucune amélioration sur l'ensemble des échelles perceptives incluses dans des questionnaires psychométriques (POMS, RESTQ-Sport), les participants perçoivent des bénéfices supplémentaires à effectuer une technique de récupération active par rapport à une récupération passive, notamment chez les populations élites (Tavares et al. 2017).

iv. Électrostimulation

La méta-analyse effectuée par Malone (Malone et al. 2015) suggère un effet bénéfique de l'électrostimulation musculaire sur les perceptions de douleurs musculaires et de fatigue après la période de récupération comparativement à une récupération passive. Il est également avancé que cette technique permet d'améliorer la sensation de récupération, par rapport à une récupération passive et à une récupération active sans présenter d'effet placebo après des exercices intenses et répétés dans de brefs délais (Borne et al. 2017) (Borne et al. 2015). Des résultats similaires sont rapportés, à la suite de trois manches de baseball (Warren et al. 2011) comparativement à une récupération active. Toutefois, ces dernières études font également apparaître que les caractéristiques techniques de l'outil et le choix du programme conditionnent l'amplitude de l'effet.

v. Étirements

Les méta-analyses effectuées spécifiquement sur l'efficacité des étirements (12 études incluses)(Herbert et al. 2011) ne rapportent aucun bénéfice sur les sensations de

douleurs musculaires après un exercice. L'absence d'effet de cette technique est confirmée par Dupuy et al. (Dupuy et al. 2018) que ce soit en ce qui concerne les effets sur les douleurs musculaires (5 études incluses) ou la perception de la fatigue (1 étude incluse).

vi. Vêtements de compression

Plusieurs revues et méta-analyses se sont intéressées à l'efficacité des vêtements de compression avec un exercice traumatisant comparativement à un groupe contrôle ne réalisant pas cet exercice (Hill et al. 2014; MacRae et al. 2011; Marques-Jimenez et al. 2016; Dupuy et al. 2018; Bieuzen et al. 2014). Les résultats sont relativement consistants et mettent en évidence une diminution des douleurs musculaires lorsque les participants portent des vêtements de compression (chaussettes ou corps entier) jusqu'à 96 h après l'exercice. Le port d'un vêtement de compression intégral a également démontré son efficacité pour atténuer la perception de la fatigue dans les 24h qui suivent un exercice en musculation comparativement à un groupe contrôle (port d'un vêtement non compressif) (Kraemer et al. 2010). Dans cette même étude, en revanche, la qualité subjective du sommeil des participants n'était pas améliorée par rapport à la condition contrôle.

vii. Massage pneumatique

Peu d'études se sont intéressées à l'amélioration de la récupération par l'utilisation de la pressothérapie après un exercice. Une étude récente indique un seuil de tolérance à la douleur musculaire mesurée par algomètrie plus élevé comparativement à un groupe contrôle (port du dispositif sans application de la compression pneumatique) lorsque cette technique est utilisée 1 h après des exercices en musculation durant trois jours consécutifs. Cette technique s'avère également efficace lorsque celle-ci est utilisée durant les 4 jours qui suivent la séance, en l'absence d'exercices supplémentaires (Haun et al. 2017). Les résultats de cette étude sont cohérents avec l'étude de Sands et al.

(2013) mettant également en évidence des effets bénéfiques sur une population d'athlètes olympiques. L'application de 15 min de massage pneumatique après un entraînement en matinée est efficace pour augmenter le seuil de tolérance à la douleur musculaire, et ce juste après son application et après un deuxième entraînement effectué dans l'après-midi.

viii. Immersion tempérée

Il est difficile de rapporter des résultats concernant cette technique de récupération. En effet, celle-ci est souvent utilisée en comparaison avec une technique d'immersion en eau froide ou contrastée et s'apparente à une condition contrôle (Ascensao et al. 2011; Sellwood et al. 2007; Rowsell et al. 2009). L'étude de Cortis et al. (2010) rapporte un bénéfice, comparativement à une récupération passive, pour augmenter la perception de récupération après un exercice intermittent de 20 min sur tapis de course. L'étude de Lum et al. (2010) quant à elle n'apporte pas de résultat probant quant à l'efficacité de cette technique pour améliorer la sensation de récupération après un exercice similaire intermittent chez des triathlètes bien entraînés. Après un match de football effectué dans des conditions standardisées, 20 min de récupération active dans une eau tempérée ne permet pas d'améliorer les sensations de douleurs musculaires, comparativement à un groupe contrôle (Tessitore et al. 2007). Une étude du même auteur démontre cependant, dans un protocole relativement similaire auquel ont participé des joueurs de futsal, une amélioration des sensations de douleurs musculaires 5 h après avoir effectué l'immersion tempérée (Tessitore et al. 2008).

ix. Techniques de récupération par le chaud

Lorsque l'on s'intéresse à l'effet du sauna, du hammam ou encore de l'immersion en eau chaude sur la récupération, peu d'études ont encore évalué leur efficacité alors que celles-ci sont régulièrement utilisées (Skorski et al. 2019b), notamment chez des joueurs de tennis (Fleming et al. 2018). C'est la raison pour laquelle ces techniques ont été

regroupées dans le cadre de cette thèse sous le terme de « récupération par le chaud » puisque leur principe repose sur l'application d'une température élevée sous différents états physiques. Une étude effectuée sur des rugbymen et volleyeurs élites ne montre pas de bénéfice supplémentaire de l'immersion en eau chaude (15 min à 36°C) sur les perceptions de douleurs musculaires dans les 24 h qui suivent un protocole d'exercice intermittent de 20 min comparativement à une condition contrôle (Pournot et al. 2011a). Des résultats similaires sont rapportés par l'équipe de Vaile et al. (2008) sur des mesures effectuées jusqu'à 96 h suivant des exercices en musculation sur 11 participants (14 min à 38°C). Certaines études ou revues avancent les effets bénéfiques de ces techniques principalement sur les sensations de bien-être ou de relaxation ce qui pourrait éventuellement diminuer le stress perçu. Cependant, aucune étude à ce jour ne permet de confirmer cette hypothèse sur la récupération dans un contexte sportif (Hausswirth 2013; Laukkanen et al. 2018). La dernière étude effectuée par l'équipe de Skorski et al. (2019b) confirme l'absence de résultat sur les différentes échelles proposées par le questionnaire de récupération ARSS, notamment sur la perception de récupération des participants à cette étude (i.e. nageurs confirmés de niveau national ou supérieur) après 4 séries de 50 m en nage libre.

x. Immersion contrastée

La méta-analyse de Bieuzen (Bieuzen et al. 2013), incluant 13 études ayant investigué l'effet de l'immersion contrastée (CWT), rapporte l'efficacité de cette technique sur les douleurs musculaires sur des temps de récupération compris entre 6 et 96h. Lors d'études en contexte écologique, les auteurs rapportent également des effets positifs de la CWT sur les douleurs musculaires, 42h après un match de rugby professionnel (Webb et al. 2013), 48h après un match professionnel de football (Elias et al. 2013), après 60 min d'exercice intermittent à haute intensité sur vélo (Stanley et al. 2012). La CWT permettent également d'améliorer la fatigue perçue lors de deux protocoles incluant des matchs de football australiens professionnels (Elias et al. 2013; Elias et al. 2012), ainsi qu'à la suite de 60 min d'exercice à haute-intensité sur vélo (Stanley et al. 2012).

Aucune étude à ce jour n'a été effectuée spécifiquement sur les perceptions de stress concernant ces trois modalités de récupération.

2. Comparaison des techniques de récupération sur les variables subjectives

De récentes études se sont attachées à comparer l'ensemble des techniques de récupération sans forcément rapporter d'effets convergents sur les variables subjectives. Une récente méta-analyse, incluant des sportifs de niveaux différents, compare l'effet de nombreuses techniques de récupération sur les sensations de douleurs musculaire et de fatigue : massages, récupération active, étirements, combinaison des techniques de massages et étirements, vêtements de compression, électrostimulation, immersion en eau froide et contrastée, cryothérapie corps entier et thérapie hyperbarique (Dupuy et al. 2018). Celle-ci met en évidence l'efficacité des techniques de massages, immersion en eau froide et des vêtements de compression sur les sensations de douleurs musculaires et de fatigue alors que les techniques de récupération active, immersion contrastée et de cryothérapie n'ont d'effets positifs que sur les douleurs musculaires. Une seconde étude ayant investigué les effets combinés des techniques de récupération les plus utilisées lors d'une saison de football australien, met en évidence que les joueurs ayant choisi l'immersion en eau froide, les techniques d'étirements, et les vêtements de compression sans effectuer de récupération active, ont une plus forte probabilité de voir leur perception de récupération améliorée dans la semaine suivant leurs utilisations (Bahnert et al. 2013). Il apparaît également que l'inclusion de l'immersion en eau froide dans leurs stratégies de récupération permet de multiplier par deux la probabilité de bénéficier de sensations de récupération améliorées. Enfin, cette étude démontre une large variabilité dans les perceptions de récupération des joueurs.

	Douleurs musculaires	Fatigue	Stress	Sommeil	Perception de la récupération
Massages	+	+	/	/	+
Rouleaux d'automassage	+	/	/	/	/
Récupération active	=	?	/	/	?
Electrostimulation neuromusculaire	+	+	/	/	+
Etirements	=	=	/	/	/
Vêtements de compression	+	+	/	=	/
Massages pneumatiques	+	/	/	/	/
Immersion en bain tempéré	+	+	/	/	/
Techniques de récupération par le chaud Hammam, Sauna, Bain chaud	?	?	?	?	?
Immersion en eau froide	+	+	/	/	+
Cryothérapie corps entier	+	+	/	+	+
Immersion contrastée	+	+	/	/	+

Tableau 10. Aperçu des résultats issus des études effectuées sur l'efficacité des différentes techniques de récupération sur les variables subjectives de douleurs musculaires, fatigue, stress, qualité de sommeil et perception de la récupération. « + » résultats positifs, « = » absence de résultat positif, « ? » résultats supposés mais non rapportés à ce jour, «/» absence de littérature sur cette variable. Les résultats rapportés ne prennent pas en compte la taille d'effet entre les différentes techniques.

Conclusion

Lorsque les athlètes ont le choix dans les stratégies de récupération, ceux-ci sélectionnent les techniques qui leur apportent des bénéfices physiologiques et psychologiques. Cependant, les athlètes et/ou les entraîneurs, qui ont une place importante dans la mise en place des stratégies de récupération, ne s'appuient pas systématiquement sur les résultats d'études scientifiques. Pour les guider dans ces choix, il est alors primordial d'apporter des informations spécifiques à leur besoin en termes de récupération, en s'appuyant sur des preuves scientifiques appliquées spécifiquement à la discipline. Peu d'études s'appliquent actuellement au tennis. Il apparaît alors nécessaire d'évaluer l'efficacité des techniques qui semblent les plus appropriées pour accélérer la récupération du joueur de tennis élite. Ainsi, les techniques de récupération comme celle de l'immersion en eau froide ont déjà montré leur efficacité pour diminuer les douleurs musculaires et atténuer la chute des performances. Des protocoles reproduisant au maximum les charges imposées par le tennis devraient permettre de rationaliser l'utilisation de ces techniques dans le cadre d'une pratique élite.

Objectifs expérimentaux

Explorer les mécanismes mis en jeu dès l'instant où l'organisme cesse l'exercice apparaît fondamental dans notre compréhension de la physiologie humaine de la performance. Cette fenêtre temporelle précise constitue ainsi un modèle expérimental particulièrement intéressant, car il nécessite "simplement" de mesurer au repos l'évolution de variables reflétant les fonctions essentielles dans l'activité considérée. Ainsi, il devient possible d'appréhender les réponses individuelles mises en jeu dans ces situations, en conditions spécifiques d'entraînement ou de compétition. Bien que cette approche apparaisse simple à mettre en œuvre, peu d'études portent sur la récupération en tennis à ce jour, les travaux s'étant certainement heurtés aux contraintes temporelles, organisationnelles ou réglementaires de la discipline.

Alors que certains travaux soulignent la nécessité de quantifier la charge d'entraînement dans une perspective de prévention des blessures, l'enjeu essentiel en matière de récupération est de pouvoir caractériser la nature de la fatigue induite par cette charge (Vescovi 2017). Le sRPE est un indice simple très utilisé dans de nombreuses disciplines dont le tennis, qui permet de rendre compte de la charge interne, quel que soit le type d'entraînement effectué (Foster et al. 2001). Quelques études récentes utilisant cet indice de charge nous permettent néanmoins d'émettre l'hypothèse que les joueurs tolèrent des charges d'entraînement relativement élevées (i.e. entre 516 et 1267 A.U (Murphy et al. 2015a; Fernandez-Fernandez et al. 2015b). Les quelques études ayant fait état de la fatigue induite par la pratique du tennis rapportent une augmentation des perceptions de stress ou des sensations de douleurs musculaires (Fernandez-Fernandez et al. 2015b) (Duffield et al. 2014). Même si peu d'études ont encore exploité ce type de mesures subjectives, celles-ci semblent être la solution la plus intéressante pour explorer les réponses à l'exercice et les effets de méthodes de récupération dans le cadre d'un suivi longitudinal de joueurs élites. Développées initialement pour détecter les signes de surmenage, les méthodes sont aujourd'hui reconnues sensibles à la charge d'entraînement, voire plus représentatives que certains marqueurs quantitatifs de fatigue auparavant utilisés (Saw et al. 2016) (Thorpe et al. 2015). Le questionnaire de Hooper est un outil de mesure adapté au haut niveau. Il nécessite le renseignement de quatre variables subjectives, en parfaite adéquation avec

les exigences de rapidité d'utilisation et d'interprétation, d'adhésion de sportifs élites et donc à sa reproductibilité (Hooper et al. 1995) (Coutts et al. 2018). Des stratégies de récupération, incluant la combinaison de plusieurs techniques, semblent être déjà bien ancrées dans les routines quotidiennes des sportifs de haut-niveau (Venter 2014; Fleming et al. 2018). En revanche, leur efficacité n'a pas encore été démontrée dans ce contexte.

L'objectif de l'étude 1 est dans un premier temps, d'analyser dans un cadre écologique, la nature et le niveau de la charge perçue par les joueurs de tennis élites lors d'une période d'entraînement et d'en analyser la fatigue perçue induite. Le second objectif est de décrire les habitudes de récupération des joueurs de tennis dans leur contexte de pratique, puis d'évaluer leur efficacité vis-à-vis des charges et de la fatigue induite préalablement analysées. Deux hypothèses ont été émises :

- **La répartition des contenus d'entraînement (préparation physique, entraînement de tennis) influencerait l'effort perçu et le niveau de charge (sRPE) et les sensations de douleurs musculaires,**
- **Les techniques de récupération par le froid seraient les plus efficaces pour diminuer les sensations de douleurs musculaires.**

Il est également important de vérifier si les techniques de récupération par le froid limitent l'accumulation de la fatigue dans un contexte compétitif. En effet, l'organisation d'un tournoi impose au vainqueur d'enchaîner cinq à six matchs, d'une durée moyenne d'une heure et demie, sur une semaine, hors cadre des matchs de Grand Chelem (Whiteside and Reid 2017; Kovacs 2007). Les études disponibles ont principalement été conduites lors des matchs réels ou simulés, d'une durée souvent supérieure à deux heures. Ces travaux rapportent une fatigue d'origine mécanique (dommages musculaires), accompagnée d'une fatigue neuromusculaire (diminution des capacités de production de force, augmentation de l'activité musculaire pour une même intensité, diminution de l'activation volontaire) principalement d'origine centrale, persistant jusqu'à au moins 30 min après l'arrêt du match. Ces altérations sont associées à une diminution des performances fonctionnelles parmi lesquelles la

diminution des capacités de production de force des membres inférieurs semble être la plus avérée (MVC, RFD)(Girard et al. 2006) (Girard et al. 2008) (Ojala and Hakkinen 2013). Alors que d'autres études réalisées sur plusieurs jours consécutifs nous permettent de confirmer la persistance des conséquences des dommages musculaires jusqu'à 48 h, celles-ci ne nous permettent ni de confirmer la persistance d'une fatigue neuromusculaire ni de faire de lien direct entre cette fatigue et certains paramètres de performance spécifique au tennis (Ojala and Hakkinen 2013). Deux hypothèses sont souvent émises pour expliquer le lien entre les paramètres neuromusculaires, fonctionnels et spécifiques. En raison d'une fatigue mécanique ou neuromusculaire, la diminution des capacités fonctionnelles de puissance pourrait limiter les performances en sprint ou lors des frappes (i.e. nécessitant précision et vitesse) (Girard et al. 2006; Gescheit et al. 2015). D'autres suggèrent que la diminution de l'engagement du joueur (distance parcourue ou temps de jeu effectif) lors d'un match peut provenir d'une volonté de maintenir la perception de l'effort en réponse à des sensations de douleurs ou de fatigue augmentées (Marcora 2009). L'efficacité respective de l'immersion en eau froide et de la cryothérapie corps entier pour limiter ce type de fatigue et augmenter les performances ayant déjà été démontrée dans d'autres disciplines, celles-ci semblent être pertinentes pour le tennis. Seule une étude démontre l'efficacité de l'immersion en eau froide (combinaison de l'immersion en eau froide, vêtements de compression, conseils d'hygiène du sommeil) sur les douleurs musculaires suite à l'enchainement d'exercices spécifiques au tennis et d'un match (Duffield et al. 2014). Au même titre que l'immersion en eau froide, la cryothérapie corps entier est également couramment utilisée par les joueurs de tennis élite. En revanche, très peu d'études ont validé son utilisation dans un contexte écologique de pratique proche de celui du tennis. De plus, l'immersion en eau froide semble aujourd'hui apporter des bénéfices plus importants sur la récupération par rapport à la cryothérapie corps entier en raison d'un coefficient de conductivité thermique supérieur (Bleakley et al. 2014; Mawhinney et al. 2017). Aucune étude s'est attachée à vérifier cette hypothèse au tennis. **L'étude 2 consiste dans un premier temps à évaluer, dans le cadre d'un protocole standardisé, la fatigue induite par un match d'une heure et demie (durée moyenne d'un match en deux sets gagnants). Celle-ci s'attache à évaluer la fatigue consécutive à 3 jours de**

pratique, en mesurant des paramètres physiologiques, neuromusculaires, perceptifs, fonctionnels et spécifiques au tennis. Le second objectif est de comparer l'efficacité des techniques de récupération par le froid, actuellement les plus utilisées par les joueurs de tennis, pour atténuer la fatigue induite par les matchs de tennis simulés et accélérer le recouvrement des performances dans ce contexte. Deux hypothèses ont été émises :

- **L'utilisation répétée de l'immersion en eau froide et de la cryothérapie corps entier serait efficace pour limiter la fatigue induite par trois jours de matchs de tennis, comparativement à une récupération passive,**
- **L'immersion eau froide serait plus efficace que la cryothérapie corps entier pour atténuer les sensations de douleurs musculaires et limiter la baisse de MVC**.

Méthodes expérimentales

1. Design des études & Participants

	Etude 1		Etude 2
Type	Longitudinale, observationnelle		Randomisée croisée
Nombre de participants	♀ 19	♂ 16	♂ 13
Age **Taille (cm)**	19 ± 4 171 ± 5	19 ± 3 185 ± 8	28 ± 6 180 ± 6
Masse (kg)	60 ± 5	78 ± 10	73 ± 6
Niveau sportif **Classement**	e ● Top 100: 1 ● Top 100-500: 8 ● Top 501-1000: 7 ● Classement ITF junior: 3	Elite ●Top 100: 1 ●Top 100-500: 10 ●Top 501-1000: 5	Régional Seconde série Volume d'entraînement hebdomadaire ~ 6h

Tableau 11. Types d'études, caractéristiques anthropométriques et niveau sportif des participants aux protocoles expérimentaux

Figure 16. Organisation de l'étude 1. Au total, 387 sessions quotidiennes ont été récoltées, 221 sessions étaient correctement complétées et 147 sessions ont été analysées.

Ce travail de thèse a fait l'objet de deux études reposant sur des démarches expérimentales distinctes. Dans le cadre de l'étude longitudinale (étude 1), 35 joueurs de tennis évoluant sur le circuit professionnel (sénior et junior) ont accepté d'être suivis pour une durée de 15 mois consécutifs. Dans le cadre de l'étude randomisée croisée (étude 2), 13 hommes ont été recruté. L'ensemble des joueurs ne présentaient ni contre-indications médicales ni blessures au moment des expérimentations. Les joueurs ont été informé et donné leur consentement éclairé avant le début des expérimentations. Les deux études ont été approuvées par le Comité de Protections des Personnes Sud Méditerranée IV (n° 17 10 05) et respectaient les principes éthiques de la Déclaration d'Helsinki.

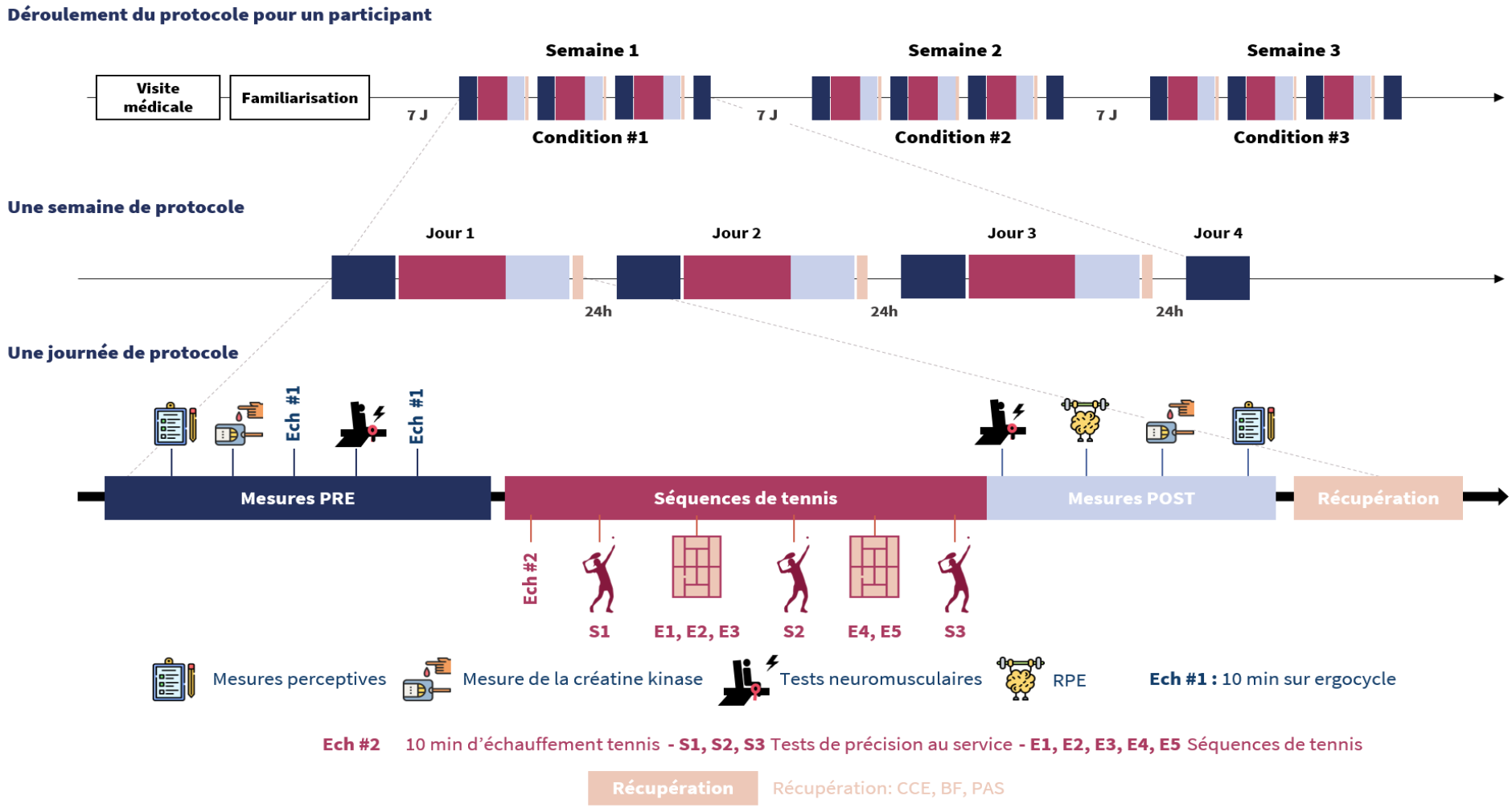


Figure 17. Organisation de l'étude 2.

2. Exercices inducteurs de fatigue spécifique au tennis élite

1. Entraînements lors d'une période foncière ou pré-compétitive d'un joueur de tennis élite (étude 1)

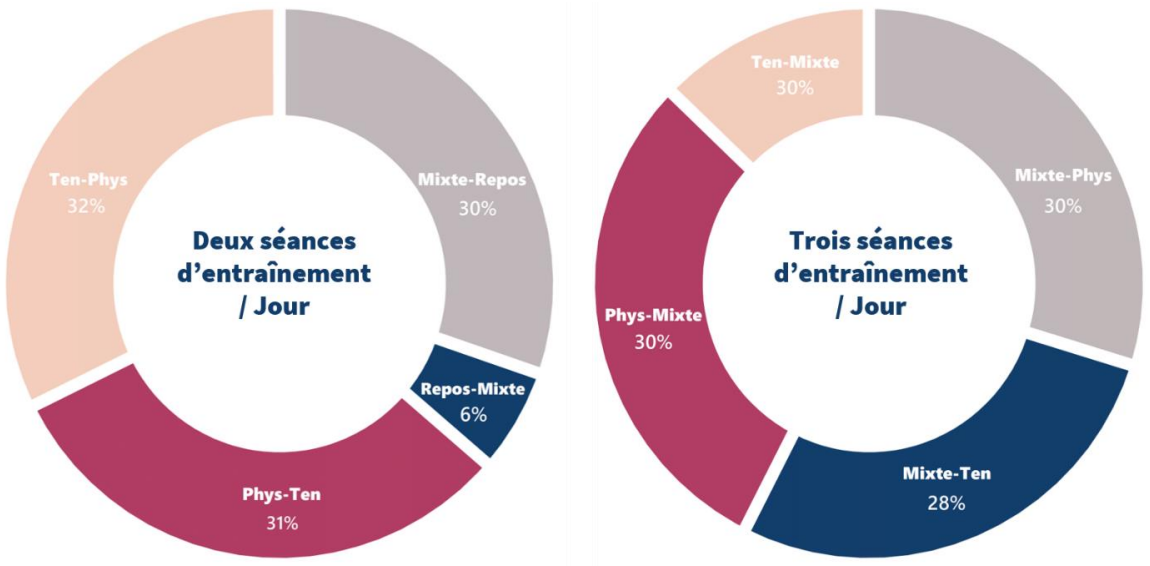


Figure 18. Caractéristiques et répartitions des séances effectuées sur une journée d'entraînement (Etude 1) ; Entraînement du matin – Entraînement de l'après-midi ; Phys : Séance de préparation physique ; Ten : Séance d'entraînement tennis ; Mixte : Séances de préparation physique et entraînement tennis

Dans le cadre de l'étude 1, les exercices inducteurs de fatigue correspondaient aux entraînements effectués durant la journée par les joueurs de tennis élites lors de périodes foncières ou pré-compétitives se déroulant au Centre National d'Entraînement (CNE). Basée sur les recommandations des entraîneurs de la FFT (Tennis), une sélection des entraînements majoritaires a été effectuée pour homogénéiser les données à des fins statistiques (deux ou trois séances d'entraînement par jour (Figure 1)). Les journées contenant une séance quotidienne (13,1% de l'ensemble des journées d'entraînement enregistrées) ou quatre séances quotidiennes (3,2% des journées d'entraînement enregistrées) étant minoritaires, celles-ci ont été exclues des analyses.

L'étude 1 étant longitudinale et observationnelle les entraînements effectués étaient volontairement non standardisés. En revanche, ceux-ci ayant été effectués durant une période foncière ou pré-compétitive, les objectifs des séances étaient similaires impliquant alors des contenus de séances d'entraînement homogènes de préparation physique et de tennis.

- Les entraînements dits « tennis » incluent des séances d'entraînement au panier, de gammes et de séquences/exercices spécifiques dont le but était d'améliorer les différents aspects technico-tactiques du jeu de tennis (technique de frappes, services, retour de service, jeux offensifs, jeux défensifs, amélioration du jeu de jambes…). Ces entraînements pouvaient également comprendre des sets/matchs d'entraînement.
- Les entraînements dit de « préparation physique » comprenaient des séances effectuées en dehors des courts de tennis dont les objectifs étaient de développer et d'améliorer les qualités fondamentales de puissance (force et vitesse), d'endurance et de vitesse/coordination des joueurs de tennis.
- Les séances de puissance comprenaient des séances de développement et renforcement musculaire du haut (Développé-couché, tirage horizontale et verticale, lancer de médecine-ball…) et bas (presse, squats, ½ squats, machine à quadriceps, exercices pliométriques) du corps de type puissance-vitesse, puissance-force, force maximale, explosivité et gainage.
- Les entraînements d'endurance comprenaient aussi bien des séances permettant le développement de la capacité et puissance aérobie (course continue, VTT, efforts intermittents à vitesse maximale aérobie) que des séances permettant le développement du système anaérobie (répétition de courses d'une durée très courte à intensité maximale en ligne droite ou multiforme).
- Les entraînements « vitesse/coordination » contenaient des exercices de sprints (changements de direction, avant/arrière) à vitesse maximale ou en survitesse.

2. Séquences de tennis simulant la fatigue spécifique rencontrée en condition de compétition réelle (étude 2)

Lors de l'étude 2, un enchaînement de cinq exercices spécifiques entrecoupés de tests de précisions au service a été créé sur la base de précédentes études (Reid et al. 2008) (Duffield et al. 2014) et des conseils avisés des entraîneurs de tennis du Centre National d'Entraînement. Ces cinq exercices (Figure 19) sont fréquemment utilisés par les joueurs de tennis élites et contiennent, de manière relativement exhaustive, l'ensemble

des déplacements sur le court et des mouvements de jeu de jambes rencontrés en situation réelle de jeu.

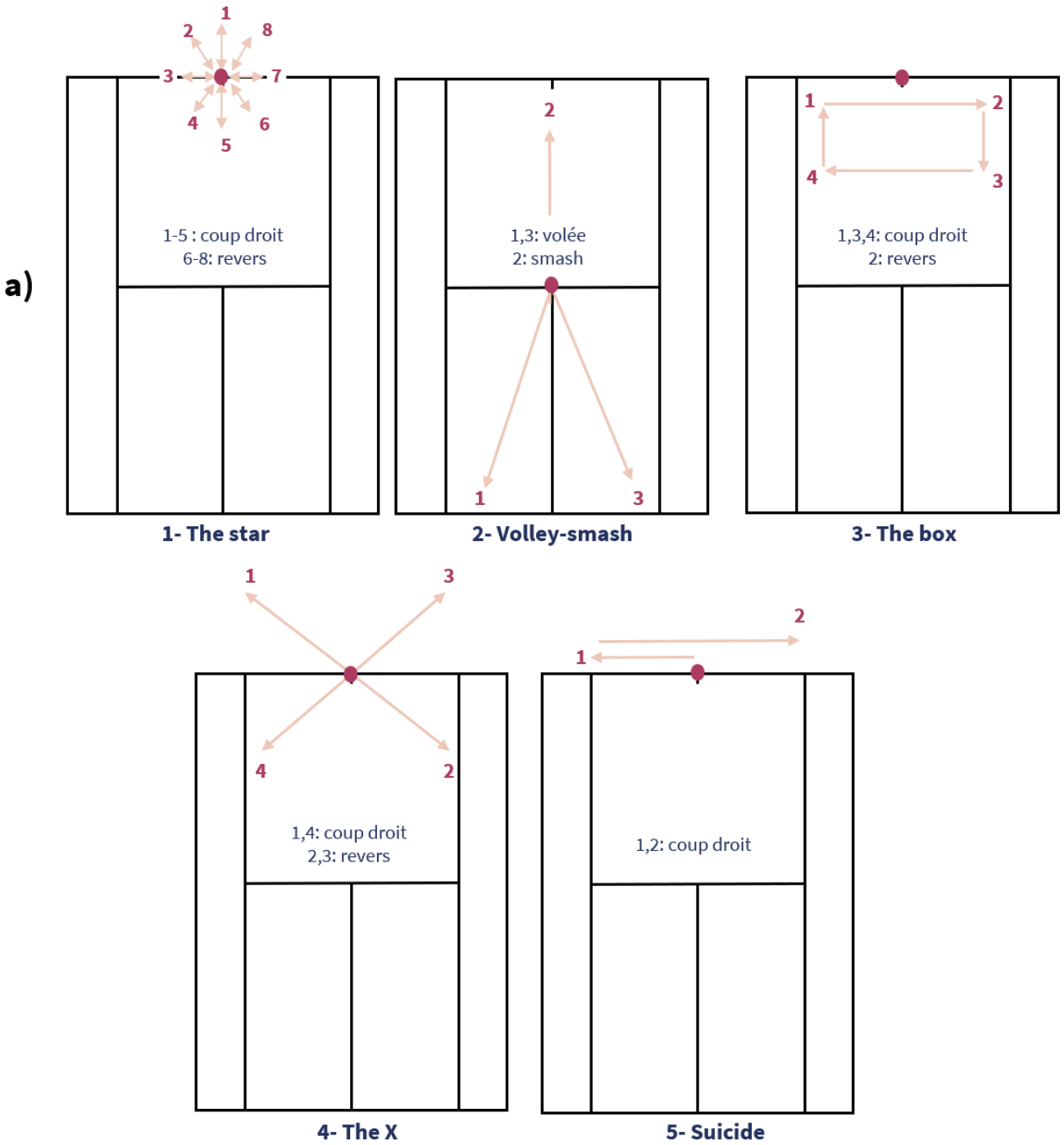


Figure 19. Description des cinq exercices effectués lors de l'étude 2. La numérotation correspond à l'ordre des frappes, le point central (rose) correspond à la position de départ et de replacement entre les frappes du joueur et les flèches (orange) correspondent aux déplacements effectués lors de chacun des exercices.

Dans l'étude de Reid et al. (2008)., il a été démontré que les caractéristiques physiologiques de ces exercices étaient similaires à celles mesurées lors de matchs de tennis. Les séquences de tennis devaient induire une fatigue la plus proche possible de celle rencontrée lors d'une match d'1,5h ce qui correspond à la durée moyenne d'un match de tennis élite (Kovacs et al. 2007). Le protocole se déroulait sur un court dur intérieur (GreenSet surface, GreenSet Worldwide S.L., Barcelona, Spain) et le temps total effectif de jeu (somme des durées de chaque échanges) a été calculé à 18 min afin de correspondre aux 20% de temps de jeu effectif rencontré lors d'un match d'1,5h sur ce type de surface (Kovacs 2007). La durée totale des séquences était de 37,5 min avec un temps total de récupération de 19,5 min (Tableau 2). Afin de standardiser les séquences de tennis les balles étaient distribuées, de manière reproductible et précise d'un jour à l'autre (coefficient de variation de la vitesse de balle : 1 à 2%) (Brechbuhl et al. 2016) à l'aide d'une machine lance-balle (HighTOF, Echouboulains, France) placée de l'autre côté du court, au niveau de la ligne centrale (Figure 19). Cette machine a permis d'enregistrer et définir au préalable le nombre, la fréquence, la vitesse et la zone d'impact de chacune des balles pour chaque exercice (Figure 19). Un engagement maximal était demandé au joueur qui devait frapper chacune des balles avec le meilleure ratio « vitesse/précision » et viser l'une des deux cibles de l'autre côté du court afin de mesurer un paramètre de performance spécifique au tennis (cf. partie 4.2).

Exercices	Nombre de répétitions	Nombre de frappe total /répétition	Temps de jeu effectif (s)	Temps de récupération (s)
Echauffement	/	/	**300**	/
Précision service #1	**/**	**/**	**60**	**/**
Récupération	/	/	/	90
STAR	**6**	**13**	**30**	**15**
Récupération	/	/	/	90
VOLLEY-SMASH	**6**	**13**	**30**	**30**

Récupération	/	/	/	90
THE BOX	**6**	**13**	**30**	**15**
Récupération	/	/	/	90
Précision service #2	**/**	**/**	**60**	**/**
Récupération	/	/	/	90
THE X	**6**	**13**	**30**	**15**
Récupération	/	/	/	90
SUICIDE	**6**	**11**	**30**	**15**
Récupération	/	/	/	90
Précision service #3	**/**	**/**	**60**	**/**
TOTAL	**/**	**378**	**1380**	**1170**

Tableau 12. Déroulement des exercices réalisés au cours des matchs de tennis lors de l'étude 2

3. Outils d'aide à la récolte des données

1. Application « Suivi de la récupération »

L'application a été développée spécifiquement pour les deux études de ce travail de thèse. Celle-ci comprenait trois questionnaires distincts (Annexes). Le premier permettait de mesurer la perception de l'effort (RPE, rating perceived exertion) par le joueur immédiatement à la suite d'un entraînement ou des séquences de tennis (étude 1, étude 2) ainsi que la durée correspondante (étude 2) afin de calculer la RPE-session (sRPE). Le « Questionnaire récupération » a permis d'enregistrer l'ordre et le détail des techniques de récupération effectuées par les joueurs (étude 1). Les sensations de *douleurs musculaires, fatigue et stress* avant d'effectuer leur séance de récupération étaient enregistrées via le « Questionnaire subjectif » (étude 1, étude 2). Le lendemain, avant le début du premier entraînement (Figure 16, étude 1) ou avant le début de la première mesure « PRE » (Figure 17, étude 2), les joueurs complétaient à nouveau le « Questionnaire subjectif » afin d'évaluer l'impact potentiel des techniques de

récupération. Les items inclus étaient : sensations de *douleurs musculaires, fatigue, stress, sommeil, raideur musculaire et sensation de récupération.* Les données étaient simultanément enregistrées sur un site internet protégé afin de pouvoir les exporter à postériori pour analyses. Avant le début des études, les participants ont tous été familiarisés avec les questionnaires de l'application. Afin de minimiser les biais méthodologiques, un seul investigateur a veillé à ce que les participants remplissent individuellement et correctement ces questionnaires. Les détails méthodologiques de chacun des questionnaires de l'application sont précisés dans la partie 4.3. (Paramètres perceptifs).

2. Court technologique (Playsight®)

La technologie « Smart Court » de Playsight installée sur un court technologique (PlaySight Interactive, Ltd., Kokhav Ya'ir, Israel) a été utilisée pour déterminer les performances spécifiques au tennis lors de l'étude 2. Cette technologie est approuvée et attestée par la Fédération Internationale de Tennis (ITF) comme outil technologique d'aide à l'analyse des performances sur l'ensemble des tournois ITF. Six caméras vidéo HD et capteurs, ainsi qu'un « kiosque » disposant d'un ordinateur sont installés autour du court (Figure 4), afin de délivrer en temps réel et à postériori les diverses statistiques relatives à la performance spécifique au tennis : le type, la trajectoire, la vitesse, ainsi que la rotation de chacune des balles sont mesurées puis enregistrées à l'aide d'algorithme traitant les images captées par les différentes caméras. Les vitesses affichées en temps réel de chacune des balles étaient donc immédiatement récoltées et enregistrées sur un fichier informatique dédié lors de la totalité des séquences de tennis effectuées par les participants. De plus, les sessions étaient automatiquement enregistrées sur le cloud sécurisé Playsight, ce qui a permis de visionner de nouveau l'ensemble des exercices afin de contrôler et vérifier les données de vitesse et de précision de chaque frappe (cf. 4.1. Quantification des performances spécifiques au tennis) effectuée par les participants durant le protocole.

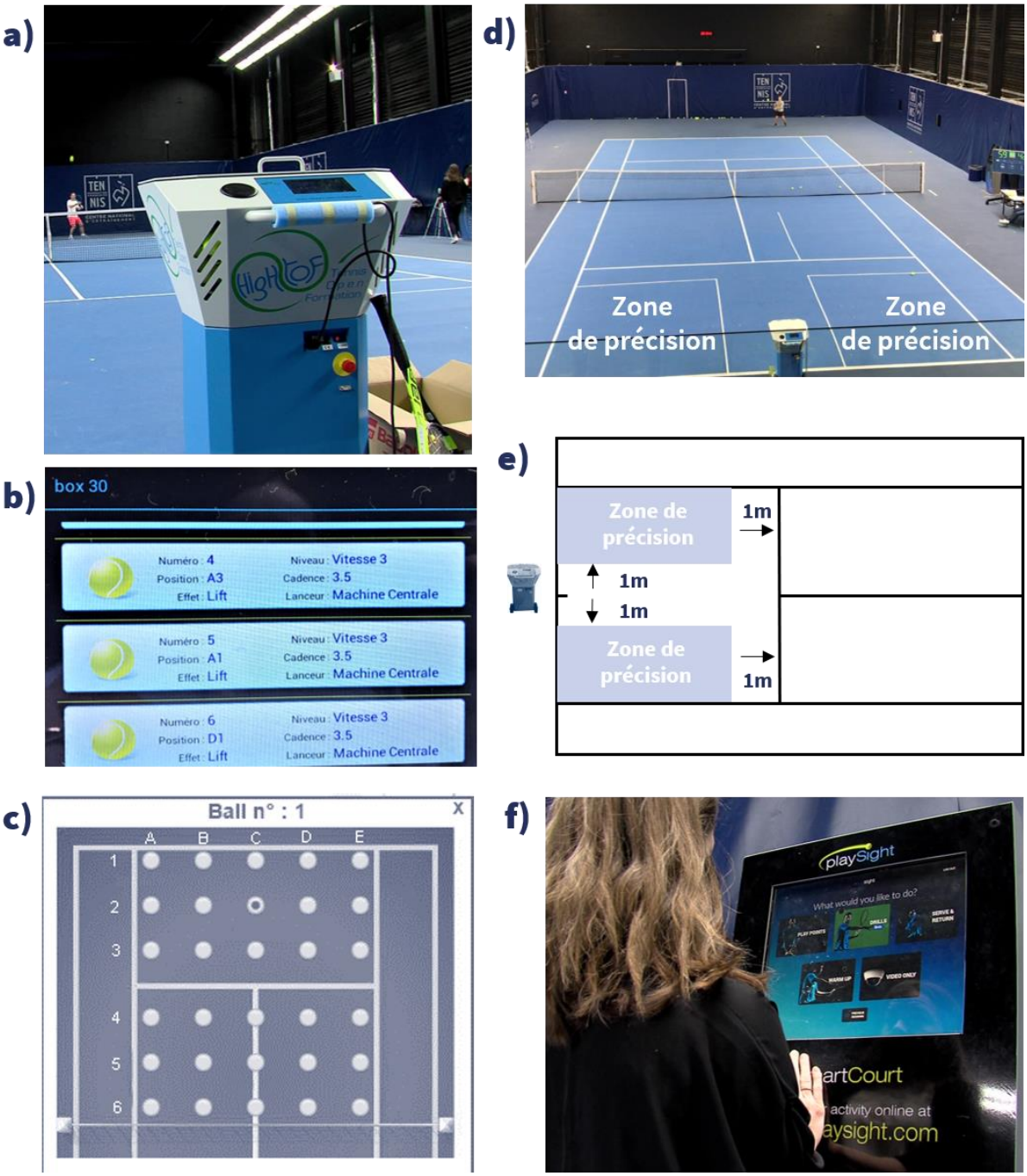


Figure 20. Photographies illustratives du dispositif expérimental utilisé lors des séquences de tennis de l'étude 2. Sur le panel de gauche : la machine lance-balle (a), son interface permettant la création des exercices (b)et les zones possibles d'atterrissage des balles (c). Sur le panel de droite : disposition (d) et schéma (e) des zones de précision ainsi que le kiosque Playsight (f) utilisé pour mesurer la vitesse des balles

4. Quantification des performances

1. Fonctionnelle

Lors de l'étude 2, le couple de force maximale volontaire (MVC) isométrique était mesuré sur ergomètre isocinétique (Con-Trex Multi-Joint System, Dübendorf, Switzerland). Le module est adapté au membre testé et relié au dynamomètre de l'appareil qui recueille les déformations imposées au bras de l'appareil au cours du mouvement, et les transmet au système informatique pour être ensuite analysés. Toutes les sessions de tests étaient dirigées par le même expérimentateur qui encourageait verbalement les participants. Les participants assis sur l'ergomètre, étaient maintenus grâce à des bandes velcro non-extensibles au banc et à l'ergomètre (Figure 21). Les positions de la hanche et du genou (centre de rotation du genou aligné à l'axe de rotation du moteur) étaient fixées à 90° (0° correspondant à une extension complète du genou et de la hanche) et l'accessoire de fixation de la jambe était placée 2cm au-dessus de la cheville. Il a été ensuite demandé aux participants d'effectuer deux contractions volontaires (3 à 5 sec) de l'extenseur du genou (quadriceps) de la jambe dominante du participant, séparées de 60 sec de récupération. Le signal correspondant au couple de force a été enregistré à une fréquence d'échantillonnage de 2000 Hz grâce à un boitier d'acquisition (Custom DT, INSEP, Paris, France) relié à un ordinateur. Le signal en volts a été filtré (Filtre Butterworth passe-bas de troisième ordre, fréquence de coupure : 20Hz) et converti en Newton.mètre en utilisant une équation de calibration établie préalablement à l'étude. Après correction de la gravité due au poids du segment, la meilleure performance sur les deux essais a défini le couple de force de contraction maximale volontaire.

2. Spécifique tennis

Un indice spécifique de la performance au tennis a été mesuré lors de l'étude 2. Comme précisé plus haut, le participant devait renvoyer chaque balle avec le meilleur ratio « vitesse/précision » dans l'une des zones de précision matérialisées par du scotch auto-collant de l'autre côté du court (Figure 19). Chaque balle envoyée dans l'une des deux

zones de précisions (BA) ainsi que sa vitesse associée (BV, mesurée par le système Playsight) était enregistrée par un investigateur. A la fin du protocole, le système Playsight a permis de visionner à nouveau la totalité des séquences de tennis afin de vérifier les informations récoltées lors du protocole. Le produit de la précision par la vitesse de chaque balle a été calculé, et ce, pour chacune des répétitions de chaque exercice, afin de déterminer un indice de performance technique (TP).

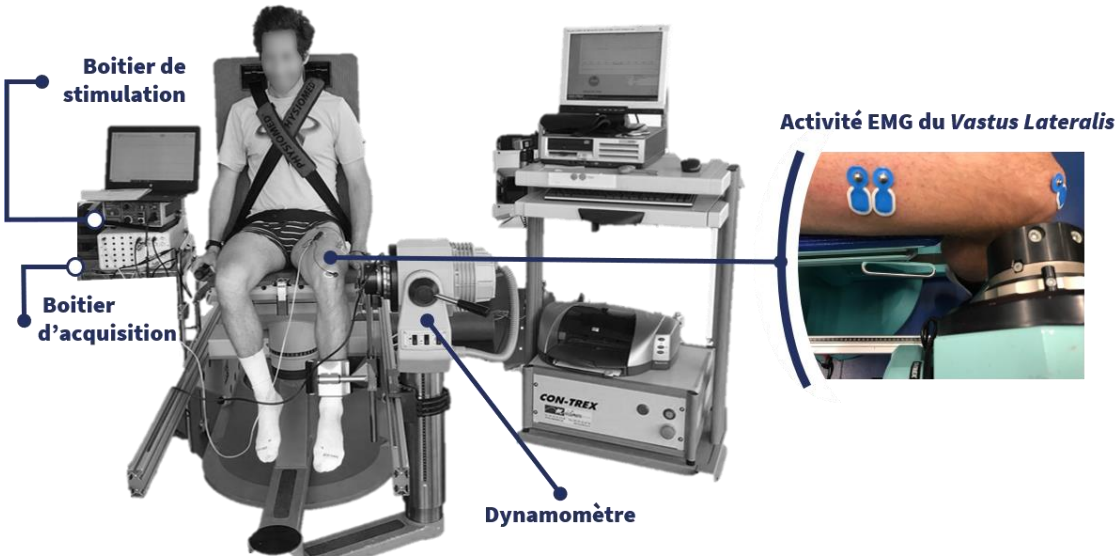


Figure 21. Dispositif expérimental utilisé lors de la mesure de MVC et des paramètres neuromusculaires lors de l'étude 2

Cet indice qualifié de représentatif des performances spécifiques au tennis a été validé dans les travaux récents de Brechbuhl et al. (2017). La disposition de l'exercice "Volée-smash" au cours du protocole n'a pas permis d'enregistrer correctement cet indice. Par conséquent, les moyennes de chacun des quatre autres exercices (The star, The box, The X, Suicide) ont été déterminées afin de calculer une moyenne globale des indices BA, BV, TP pour chaque jour, chaque condition et chaque participant.

5. Quantification de l'état de fatigue et de la récupération

1. Paramètres neuromusculaires

La fatigue neuromusculaire a été évaluée lors de l'étude 2 grâce à une mesure simultanée de la réponse mécanique du couple de force (twitch) de l'extenseur du genou et de son activité électrophysiologique associée (ie. Activité musculaire via

l'électromyographie de surface, EMG) lors d'un protocole de stimulations électriques (Technique de neurostimulation). L'ensemble de ces mesures a été effectué à la suite de la mesure de la MVC de l'extenseur du genou. Par conséquent, la position des participants vis-à-vis du dispositif expérimental était la même que celui présenté dans la partie 4.1. Les signaux provenant de la réponse mécanique, de l'activité EMG, et des stimulations associées étaient synchronisés grâce au boitier d'acquisition (Custom DT, INSEP, Paris, France) puis traités à partir d'un programme ajouté au logiciel de traitement du signal (Origin 6.1®, OriginLab, Northampton, USA ; EMG Toolbar add-on).

i. Protocole de stimulations électriques (ie. Technique de neurostimulation)

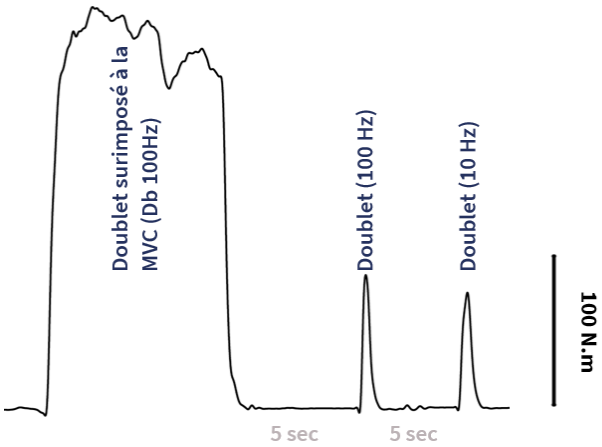


Figure 22. Détails du protocole de stimulations électriques utilisé lors de l'étude 2. Un doublet à 100 Hz surimposé au plateau de MVC a été délivré (technique « twitch interpolation ») suivi d'un doublet contrôle à 100 Hz au repos. Le protocole s'est terminé par un doublet à 10 Hz. Le temps de récupération entre chacune des stimulations était de 5 sec.

La technique de neurostimulation, utilisée lors de ce protocole consistait à appliquer au niveau du nerf fémoral (nerf moteur) des stimulations électriques d'intensité suffisante afin de provoquer une réponse maximale mécanique et électrophysiologique (activité électromyographique) du chef superficiel du muscle *quadriceps femoris* ie. le *vastus lateralis* (Girard et al. 2008). Les stimulations électriques ont été réalisées à l'aide d'un stimulateur (modèle DS7AH, Digitimer, Hertfordshire, Royaume-Uni) relié au boitier d'acquisition (Custom DT, INSEP, Paris, France). Une électrode de référence (anode, 5 ×

13 cm; Schwa-medico, France) a été placé sous le pli glutéal. Lors de la séance de familiarisation avec cette technique, un stylet de point moteur (cathode, Compex, France) a été utilisé afin de trouver le site optimal de stimulation au niveau du triangle fémoral. Ensuite, le stylet a été remplacé par une électrode adhésive (10mm de diamètre, Micromed, France) dont l'emplacement a été marqué sur la peau avec un feutre permanent pour standardiser le site de stimulation tout au long du protocole. L'intensité de stimulation optimale pour chaque participant (entre 60 et 120mA), a été déterminée par augmentation de palier de 10mA jusqu'à obtention d'une réponse mécanique et électrophysiologique maximale (Rampinini et al. 2011). Lors du protocole, une stimulation supra-maximale, fixée à 120% de l'intensité maximale obtenue a été utilisée afin d'assurer un stimulus maximal durant la totalité du protocole (Rampinini et al. 2011). Trois essais du protocole de stimulation (Figure 22) ont été effectués, séparés par 30 sec de récupération (Tomazin et al. 2012). La moyenne des différents paramètres mesurés au cours du protocole de stimulation a été calculée puis retenue pour l'ensemble des analyses.

ii. Réponse mécanique du couple de force

La réponse mécanique du couple de force a été mesurée grâce au même dispositif expérimental présenté en partie 4.1. L'activation maximale volontaire a été déterminée à partir de la réponse mécanique issue de la technique « twitch interpolation » et calculée selon la formule suivante (Merton 1954) :

$$\%VA = (1 - \text{MVC surimposée } Db100 \times Db100^{-1}) \times 100.$$

Les autres paramètres enregistrés issus des réponses mécaniques provoquées par les stimulations durant le protocole sont : (1) Db100, pic du couple de force induit par le doublet à « haute fréquence » (100 Hz, 10 ms d'intervalle) ; (2) Db10, pic du couple de force induit par le doublet à « basse fréquence » (10 Hz, 100-ms d'intervalle) ; (3) le ratio $Db10.Db100^{-1}$

iii. Electromyographie de surface

L'activité électrophysiologique musculaire du *vastus lateralis* a été mesurée, via l'analyse des paramètres de l'onde M, issue du signal recueilli par électromyographie de surface (EMG), lors du protocole de stimulations électriques. Avant de positionner les électrodes, la peau a été rasée, poncée puis nettoyée à l'alcool afin de réduire l'impédance peau-électrode. Deux électrodes Ag/AgCl (Blue sensor N-00-S, Ambu, Copenhague, Danemark) ont été placées (distance inter-électrode : 20mm) à la surface du *vastus lateralis*, dans l'alignement des fibres musculaires selon les recommandations SENIAM (Hermens et al. 2000). L'électrode de référence était placée au niveau de la rotule et l'amplificateur de signal (Mazet Electronique Model, Electronique du Mazet, Mazet Saint-Voy, France) relié aux électrodes était également fixé sur la peau. L'emplacement des électrodes a été marqué au feutre permanent afin de standardiser les mesures tout au long du protocole. Le signal EMG était pré-amplifié puis filtré avec un filtre passe-bande de troisième ordre (10-400Hz). Les paramètres obtenus à partir des signaux sont :(1) PPA, amplitude pic à pic de l'onde M, issue de la stimulation à 1 Hz ; (2) l'enveloppe RMS (Root Mean Square) calculée à partir d'une fenêtre glissante de 250ms adaptée à la MVC, avant le doublet de 100Hz surimposé (Db100) ; (3) RMS.PPA-1 correspondant à la RMS normalisée sur la PPA (Gandevia 2001).

2. Paramètres biologiques

Dans l'étude 2, la présence de dommages musculaires a été évaluée indirectement via la mesure de la concentration sanguine en créatine kinase. Un prélèvement d'une gouttelette de sang (≈32µL) provenant du bout du doigt a été effectué puis déposé sur une bandelette spécifique afin d'être analysé grâce au système Reflotron® (Roche, Rotkreutz, Suisse), préalablement calibré conformément aux recommandations du fabricant.

3. Paramètres perceptifs

i. Questionnaire psychométrique

Les deux études de cette thèse ont utilisé un questionnaire subjectif d'évaluation de la perception de fatigue générale et de la récupération adapté du questionnaire de Hooper (Hooper and Mackinnon 1995), couramment utilisé dans les études en sciences du sport pour mesurer l'efficacité de techniques de récupération à la suite d'un exercice fatiguant mais aussi dans le haut niveau afin de mesurer l'état de fatigue d'un athlète en réponse à l'entraînement (Thorpe et al. 2016) (Haddad et al. 2013). Ce questionnaire comprenait les quatre items inclus dans le questionnaire de Hooper *: douleurs musculaires, fatigue, sommeil et stress* ainsi que deux items supplémentaires. L'impact de l'exercice fatiguant et des techniques de récupération a également été évalué sur les *sensations de récupération* des participants (Bleakley et al. 2014) (Abaidia et al. 2017). Les participants devaient ainsi évaluer leurs perceptions vis-à-vis de ces 5 items à l'aide d'échelles visuelles analogiques allant de 0 à 10 cm (0,1 cm de précision). Chaque extrémité présentait une borne qualitative (Annexes) les aidant à qualifier l'intensité/quantité de chaque item mesuré. Avant le début des études, les participants étaient éduqués vis-à-vis de la signification de chaque item.

ii. Perception de l'effort et charge d'entraînement

Le plus rapidement (~30 min) après les séquences de tennis (étude 2) ou après l'entraînement du matin et/ou de l'après-midi (étude 1) les participants ont côté la perception de l'effort (RPE) sur l'échelle modifiée de Foster (Foster et al. 2001) allant de 0 (repos) à 10 (maximal)(Echelle CR-10). Dans le cadre de l'étude 1, la valeur RPE obtenue a été multipliée par la durée (min) totale de l'entraînement correspondant afin de calculer la RPE-session (sRPE training load), selon la méthode de Foster (Foster et al. 2001). Les sRPE training load de l'entraînement du matin et de l'après-midi ont ensuite été additionnés pour obtenir une valeur totale sur la journée : Total sRPE training load.

6. Modalités de récupération

1. Cryothérapie corps entier

Dans le cadre des deux études de ce travail de thèse, les participants ont utilisé la technique de cryothérapie corps entier (WBC). Ce système de réfrigération (Zimmer Elektromedizin, Germany) est composé de trois compresseurs contenant trois gaz différents, qui mélangés un par un successivement, permettent d'obtenir et diffuser un air froid et sec à -110°C dans le but de provoquer une diminution de la température corporelle, musculaire et interne. Dans le cas de nos études, le système installé au CNE (Figure 19 a), b)) comportait une première pièce à -60°C permettant une adaptation progressive et une stabilisation de la température des participants et une pièce finale dans laquelle était diffusé l'air sec et froid à -110°C. Un personnel médical veillait au bon déroulement de chacune des étapes de la séance grâce à un contact permanent (visuel et auditif) facilité par la présence de micros et de caméras disposés dans l'ensemble des pièces du dispositif. Les participants étaient tenus de se mettre en sous-vêtements ou maillot de bain, sur une peau préalablement séchée, afin d'optimiser les échanges thermiques provoqués par le froid.

Après avoir enlevé tout objet métallique (chaine, bague, montre) et lentilles de contact, les parties sensibles étaient protégées avec des gants (mains), chaussettes et chaussures (pieds), chapeau/bandeau (oreilles) afin d'éviter aux vaisseaux vascularisant ces parties de se collaber. Les voies aériennes supérieures étaient également protégées grâce au port d'un masque chirurgical afin d'éviter de potentielles brûlures au niveau des muqueuses (Figure 23a). Une fois équipés, les participants passaient 20 sec dans la pièce à -60°C puis rentraient dans celle à -110°C pour une durée de 3 min dans laquelle les consignes étaient de marcher et respirer calmement. Le personnel médical indiquait les minutes écoulées et pouvait à tout moment intervenir et faire sortir le participant. A la fin de la séance, les participants ressortaient par la pièce à -60°C avant de se rhabiller et de rester une dizaine de minutes dans une pièce tempérée. Lors des deux études, les séances de WBC effectuées par les joueurs étaient obligatoirement précédées par un examen de non-contre-indication à la pratique de la

WBC (risques cardio-vasculaires, insuffisance respiratoire et circulatoire, allergie au froid…).

2. Immersion en eau froide

Figure 23. Photographies illustratives de la tenue obligatoire (a) portée par les participants lors d'une séance de cryothérapie corps entier (b) et lors d'une séance d'immersion en eau froide (en avant de la photo c)) utilisés lors des études de cette thèse

Au cours des deux études, les participants ont également effectué une récupération par immersion en eau froide (CWI). Le protocole effectué par les joueurs de l'étude 1 correspondait à celui habituellement utilisé sur le circuit professionnel, à savoir qu'ils immergeaient leurs membres inférieurs jusqu'à hauteur de hanche (Figure 23c, participant de droite), durant 11 min dans le même bassin à une température contrôlée à 11°C (Machado et al. 2016). Dans le cadre de l'étude 2, dans le but de comparer cette technique à celle de la CCE, les participants assignés à cette technique étaient tenus de s'immerger 11 min jusqu'au cou, en position assise ou debout, dans le bassin d'eau froide (température contrôlée à 11°C) construit dans l'espace de balnéothérapie du CNE (Figure 23c), participant à gauche de la photo). La séance avait lieu immédiatement après avoir effectué la dernière mesure « POST » (~ 15 min après la fin des séquences de tennis).

3. Récupération passive

Lors de l'étude 2, les participants affectés à cette technique de récupération devaient rester en position assise à température ambiante durant 11 minutes.

4. Techniques de récupération disponibles au Centre National d'Entraînement

Un nombre conséquent de techniques de récupération était à disposition des joueurs au CNE. De ce fait, chacune des techniques de récupération ne sera pas détaillée dans cette partie. Des infographies relatives aux protocoles des techniques de cryothérapie corps entier, immersion en eau froide, bain contrasté, bain chaud, hammam, sauna, immersion tempérée étaient affichées dans l'espace de récupération. Pour les techniques d'étirements, rouleaux de massage, récupération active, port de vêtements de compression, des informations supplémentaires sur le protocole utilisé par les joueurs étaient demandées par l'investigateur afin de juger si ceux-ci étaient conformes aux standards de l'étude. Les techniques de récupération par pressothérapie, mobilisation articulaire, massages et soins d'ostéopathie étaient sous le contrôle d'un kinésithérapeute. De la même manière, l'investigateur s'est alors assuré si les séances effectuées pouvaient être inclues dans l'étude. Enfin, l'investigateur était présent lors de chacune des séances de récupération effectuées, lui permettant ainsi de vérifier le bon déroulement des protocoles (hors techniques effectuées par les kinésithérapeutes).

Etude 1

Poignard M., Montalvan B., De Larochelambert Q., Guilhem G., Bieuzen F., Impact of recovery practices adopted by elite tennis players according to training type clusters, Front. Sports Act, 2020.

1. Abstract

Introduction: Modern tennis players face congested schedules that force the adoption of various recovery strategies. Thus, recovery must be fine-tuned with an accurate quantification of its impacts, especially with regards to training-induced fatigue. The present study aimed to examine the training type clusters and recovery practices adopted by elite tennis players under ecological training conditions. The respective impacts of training type clusters and recovery techniques on subjective variables, which reflect the players' recovery perceptions, were subsequently determined.

Methods: During 15 consecutive months, a total of 35 elite tennis players filled out questionnaires to report their daily training load, training session content, adopted recovery modalities after training, and perceived recovery.

Results: The hierarchical analysis identified three clusters : “combined tennis and S&C training”, “predominant tennis training” and “predominant S&C training”. Muscle soreness and perceived fatigue were not significantly different among these three clusters (p=0.07 to 0.65). Across the 146 recorded training and recovery sessions, players primarily employed a combination of 2 or 3 modalities, with cooling strategies being the most widely used technique (87.6%). Mixed linear models revealed that independent of training clusters, cooling strategies significantly reduced muscle soreness (Δmuscle soreness: β=-1.00, p =0.02). Among the cooling techniques used, whole-body cryotherapy induced a greater perceived recovery than cold-water immersion (p=0.02).

Conclusion: These results showed that perceived recovery was not sensitive to training clusters or the associated acute training load. However, cooling strategies were relevant for the alleviation of tennis training-induced soreness. This study represents an initial step towards a periodized approach of recovery interventions, based on the interactions between training load, training contents, and perceived recovery.

2. Introduction

Elite tennis players face a continuous increase in competition density, resulting in increased physical demands and injury rates (Fu et al., 2018). To be well-prepared, players begin their training seasons around the middle of November, with a preparatory

phase lasting between five and seven weeks. Then, players alternate between pre-competitive and competitive phases with a training vs. competition ratio around 40-60% (Kovacs, 2018). However, these training phases are crucial, not only for fitness training but also for the development of technical and tactical skills. Composite training, combined with a congested schedule, can result in several states of fatigue, requiring coaches and athletes to implement appropriate recovery periods and techniques. Therefore, understanding (i) the nature of fatigue induced by this style of training and (ii) the recovery status of elite tennis players is necessary to optimize the periodization of appropriate recovery techniques (Kellmann et al., 2018).

Tennis-induced fatigue is the consequence of numerous factors, such as playing style, gender, training status, age, playing surface, ball type, and environment (Fernandez-Fernandez et al., 2009), which result in various physiological and psychological disturbances. These potential stressors can be evaluated through training/competition load indicators designed to assess whether an athlete is adapting well to the training, competition loads, and stimuli. The Session-Rating of Perceived Exertion (sRPE) is an ecological and non-invasive training/competition load indicator which has been validated for various sports, including tennis (Foster et al., 2001; Gomes et al., 2015; Haddad et al., 2017). Recent studies have evaluated the loads imposed during tennis competitions (Ojala and Hakkinen, 2013; Duffield et al., 2014), but few studies have addressed the daily or weekly distribution of training sessions and training loads imposed on an elite tennis player under ecological conditions (Murphy et al., 2015).

To monitor an athlete's recovery status and to measure how the recovery modality affects post-exercise recovery, the Hooper questionnaire (Hooper and Mackinnon, 1995), which is based on multiple subjective variables, has been widely used in several studies. (Bleakley et al., 2012; Bieuzen et al., 2013; Duffield et al., 2014; Costello et al., 2015; Schaal et al., 2015). Subjective variables have also recently been shown to be sensitive to changes in training loads during applied professional team sports research (Moalla et al., 2016; Thorpe et al., 2017). However, to our knowledge, no study has assessed the impacts of training loads on subjective recovery in high-level tennis players.

Investigating the effects of professional training load and recovery modalities are paramount, given that a wide variety of recovery techniques (e.g. water immersions, active recovery, stretching, whole-body cryotherapy, compression garments…) are available to tennis players. However, inconsistent results have been reported regarding the impacts of different recovery techniques on the fatigue induced by training or competition (Bahnert et al., 2013; Halson et al., 2014; Roberts et al., 2015; Dupuy et al., 2018; Tavares et al., 2019). Elite tennis centers have developed some practical guides regarding recovery techniques that are provided to coaches and athletes; however, no systematic evidence has been reported regarding the efficiencies of these techniques. Recently, a study reported that 80% of competitive tennis players adopted multiple post-exercise recovery strategies, primarily foam rolling, cold-water immersion, hot-water immersion, and the intake of protein shakes (Fleming et al., 2018). However, research examining the effects of these techniques on tennis players remains limited. For example, only one study found that combining cold water immersion with compression garments was able to alleviate post-training muscle soreness (Duffield et al., 2014). Some recent studies have improved the understanding of recovery for specific disciplines, including professional football and rugby, and have promoted recommendations for specific recovery strategies that should be applied to the highest-level athletes, based on the specific demands of these sports (Nédélec et al., 2015; Tavares et al., 2017). Thus, a better understanding of the efficiencies of the post-exercise recovery routines adopted by tennis players could help fill the gap between scientific evidence and actual practice.

In this context, the aims of the study were as follows: (i) to constitute groups according to training contents and training loads and to analyze its effects on subjective variables, used to represent perceived recovery; and (ii) to provide an overview of the recovery habits adopted by elite tennis players and to determine their effects on subjective variables, according to the defined training groups. To address these two aims, we used a hierarchical clustering approach to gather the entire dataset of training sessions into subgroups according to training content, duration, and load. This approach allowed the inclusion of the uniform and consistent categorical variable of “training” into a linear

mixed model, to evaluate the impacts of recovery modalities on subjective recovery variables. We hypothesized that different clusters would elicit significantly different effects on perceived fatigue and muscle soreness (Moalla et al., 2016). Based on previous literature, we consequently expected that cold recovery interventions would have larger impacts on muscle soreness than other interventions.

3. Methods

1. Participants

Sixteen male players from the Association of Tennis Players (age = 19.0 ± 3.0 years; stature : 185.5 ± 7.8 cm; body mass : 77.8 ± 10.1 kg; years on circuit = 4.5 ± 5.0), sixteen female players from the Women's Tennis Association (age = 20.1 ± 4.3 years; stature : 171.6 ± 5.5 cm; body mass : 60.5 ± 4.0 kg; years on circuit = 3.7 ± 4.0), and three female junior players from the International Tennis Federation engaged in Junior Grand Slam (age = 16.0 ± 0.7 years; stature : 171.0 ± 5.0 cm; body mass : 60.0 ± 5.0 kg), were included in this study. No male junior players were included in this study. At the time of the experiment, the male players were ranked (median over the 15 months of the experiment) as follows: 16 players were in the top 1,000, including 12 in the top 500. Female players were ranked as follows: 16 players were in the top 1,000, including 9 in the top 500, and 3 with no professional ranking. Players and their parents (for minors) were informed of the procedures before they provide their written informed consent. All procedures conformed to the standards of the Declaration of Helsinki, and the study was approved by the ethics committee.

2. Procedure

The training load, subjective variables, and recovery techniques were monitored, using an application designed specifically for this study. For each training day, players filled out a training load questionnaire, a recovery modalities form, and a psychometric questionnaire. Players reported the contents, duration, and intensity of both morning and afternoon training sessions. At the end of the day, before recovery (PRE) and strategies being implemented, participants indicated all of the recovery modalities that they were planning to use (from 1 to 5 recovery interventions) and filled out the

psychometric questionnaire. The next morning (12-16 h after recovery, POST), before training, players filled out the same psychometric questionnaire to isolate the potential effects of the recovery modality on the subjective variables (Figure 1). All sessions performed by the participants were recorded over 15 consecutive months, only in the presence of the same investigator at the training center (201 days over the 15 months).No training sessions were recorded during the competitive phase. Prior to the study, all players were familiarized with all questionnaires included in the application.

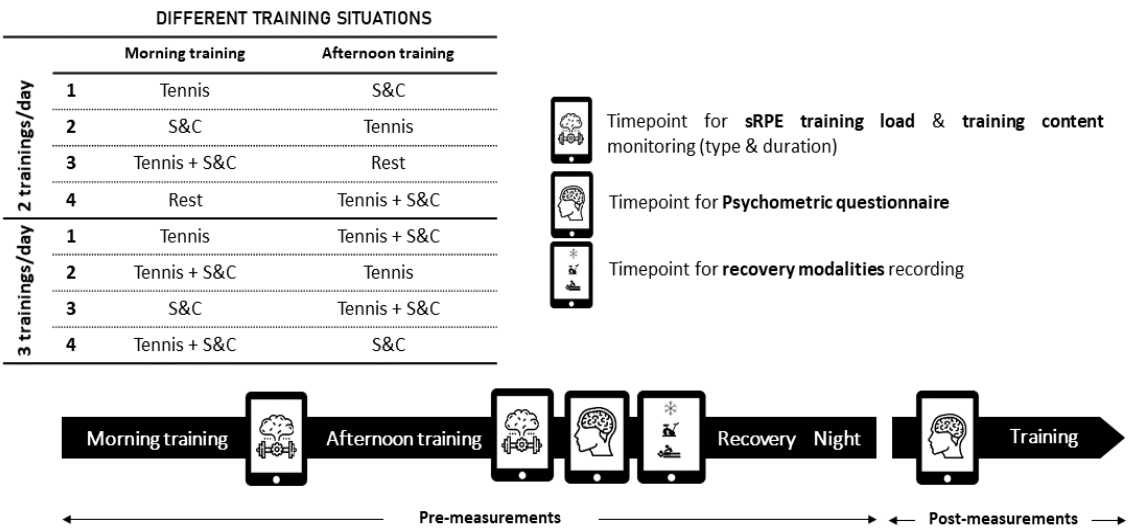


Figure 1. Overview of the experimental design. Tennis: tennis training; S&C: strength and conditioning training; Rest: no training. Pre-measurement: at the end of the training day; Post-measurement: the next morning, after recovery and before training.

i. Training monitoring

The training content was considered to reflect "tennis training" when players trained on a tennis court. These training sessions included technical and tactical drills, services, point play, and non-official match play, which developed technical and tactical skills. These workouts elicited specific motor tasks associated with tennis practice, including lateral sprints, rushes, cutting-maneuvers, smashes, drop landing, and jumps. "Strength and conditioning training" (S&C) corresponded to all off-court training session, for which the primary objective was developing physical fitness specific to tennis, including aerobic exercise (high-volume, low-intensity work), anaerobic exercise (interval training, using tennis-specific work/rest intervals), speed and power training (sprinting and explosive exercises), strength training (high-repetition, low-resistance

exercise), and plyometric training. Within 30 min following morning and afternoon training sessions, players indicated their rate of perceived exertion (RPE) on a ten-point category-ratio scale (CR-10 Borg Scale) modified by Foster et al. (2001). We then assessed sRPE training load for the morning and afternoon training sessions, using the methods described by Foster et al. (2001). Total sRPE training load was calculated as the sum of morning and afternoon sRPE training load values.

ii. Psychometric questionnaire

The psychometric questionnaire was adapted from the Hooper questionnaire (Hooper and Mackinnon, 1995). Immediately after training, and just before recovery, players were asked to score the 3 following subjective variables: muscle soreness, stress, and perceived fatigue. The next morning, before training, players scored the same 3 variables and 2 additional factors: sleep quality and perceived recovery. All 5 variables were presented and rated on a 0–10 cm visual analog scale (VAS), with 0.1-cm accuracy. Changes between PRE and POST measurements for muscle soreness, perceived fatigue, and stress were calculated. To minimize bias, only one investigator collected all data, to preserve consistency and homogeneity. Before the study, all players were first educated regarding the meanings of the self-reported items, according to the definitions described by the Hooper questionnaire (Hooper et al., 1995). Each tennis player was blinded to the results of the other participants. Qualitative indicators used to assist players with reporting perceptions in the psychometric questionnaire were as follows:

- Muscle soreness: 0 = no muscle soreness to 10 = Very high muscle soreness
- Perceived fatigue: 0 = no perceived fatigue to 10 = extremely exhausted
- Stress: 0 = no stress to 10 = extremely stressed
- Sleep quality: 0 = excellent to 10 = very bad, with insomnia
- Perceived recovery: 0 = No at all to 10 = Completely recovered

iii. Recovery modalities

A total of 15 different recovery modalities were implemented by players and were pooled into 5 distinct categories. The recovery modalities that aim to decrease muscle temperature were considered to be “Cooling strategies”, including whole-body cryotherapy (WBC) (3 min at -110°C), cold-water immersion (CWI) (11 min at 11°C), and contrast water therapy (CWT) (7 repetitions of 1 min/1 min at 11/40°C). Hot-water immersion and steam room modalities were classified as “heating strategies”. We pooled foam-rolling and stretching into a “Flexibility techniques” category, as these techniques are known to improve the range of motion during passive conditions (Sands et al., 2013; Macdonald et al., 2014). Active recovery, electrostimulation, thermoneutral water immersion, compression garments (Agu et al., 1999; Menetrier et al., 2015), and external pneumatic compression were categorized as “lower limb blood flow stimulation”. We classified all therapeutic procedures that required the use of physical agents (physiotherapists and osteopaths) into the group “Physiotherapy techniques”, including joint mobilization, massages, and osteopathy.

3. Data collection and selection

A total of 146 sessions corresponding to the predominant training situations performed by tennis players, were selected and analyzed over the 387 sessions recorded (Figure 1, Figure 2) in order to preserve the homogeneity of the data. These training situations corresponded to two or three training sessions per day and included at least one S&C training session and one tennis training session. Sessions that included no training, two similar training sessions (e.g. two tennis training) or four training sessions in a day were excluded from our analysis (Figure 1). Sessions that included a recovery technique which did not follow general guidelines were also excluded from further analysis. A total of 91% of the monitored sessions were recorded during a preparatory phase and 9% of the monitored sessions during a pre-competitive phase. Players filled an average of 4.1 ± 3.5 questionnaires over the 146 sessions.

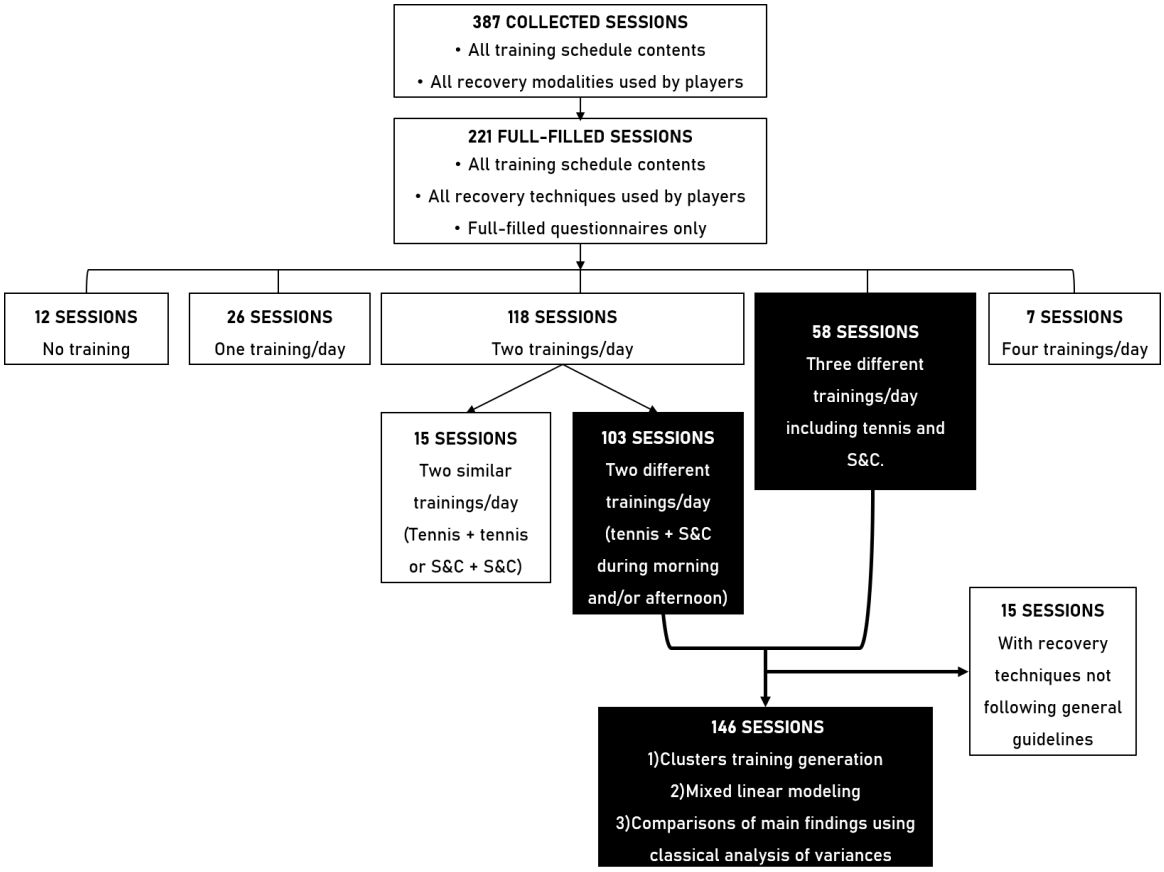


Figure 2. Selection of sessions flow chart. White boxes represent excluded sessions and the corresponding exclusion criteria while black boxes represent selected sessions and the corresponding inclusion criteria.

4. Statistical analysis

All variables are presented as the mean ± standard deviations (SD). To divide the 146 training sessions into training profile clusters, we used principal component analysis, followed by the application of hierarchical clustering for the principal components, using FactoMineR (version 1.41) in R Studio (Version 1.1.463). The selection variables were total sRPE training load, total tennis training session duration, and total strength & conditioning training session duration. The squared Euclidean distances technique was used, and we fixed the possible number of clusters between 2 and 5. To investigate how training profile clusters and recovery modalities affected subjective variables, we employed linear mixed-effects models, which are an extension of linear regressions, to consider the repeated measurements within participants (146 recorded sessions from 35 players). We used the lmer function of the lme4 (version 1.1-21) package in R Studio, where output subjective variables (Δmuscle soreness, Δperceived fatigue, sleep quality,

and perceived recovery) were analyzed into separate models. We included a per player random intercept and a fixed effect for the input variables (clusters and recovery modalities). Interactions between the clusters and recovery modalities were tested, but interactions were not examined between recovery modalities, due to an insufficient number of observations. P-values were obtained using Welch-Satterthwaite t-tests, for all full models, and the significance level was fixed at $p < 0.05$. If an association between an input variable and an output subjective variable was observed, we performed an additional test (Likelihood Ratio Test [LRT]), using an analysis of variance (ANOVA) to compare a model without the input variable against a model with the input variable. All assumptions (linearity, absence of collinearity, independence, and normality of residuals) were checked with the plot, qqnorm function of the car package (3.0-2) in R. When a significant effect was observed in the linear mixed-effects models, differences between modalities within the same recovery category were assessed, using a one-way ANOVA for normally distributed data or a Kruskal-Wallis test for non-normally distributed data. Similar statistical analyses were performed to determine differences between clusters for the subjective variables. When a significant main effect or interaction was observed, a Bonferroni post hoc test was used to locate the difference. The level of significance was set to $p < 0.05$. These latter statistical analyses were conducted using the IBM Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) (IBM SPSS Statistics, 20.0.0, SPSS Inc., USA). Effect sizes (ESs) were calculated using the following formula, for non-parametric data: $r = z / \sqrt{N}$, where refers to the z value obtained from the Mann-Whitney U test and N refers to the number of observations (Fritz et al., 2012). Interpretations were based on Cohen's formula, where: r = 0.2, 0.5, and 0.8 were considered to be small, medium, and large, respectively.

4. Results

1. Cluster analysis

The hierarchical cluster analysis identified three training type clusters (Figure 3) which were consistent with three theorical training microcycles that are recommended during training periods. The first cluster defined as "Combined tennis and S&C training", was statistically defined by a lower total duration of tennis training (-13.7 min), a lower total

strength training duration (-17.2 min), and a smaller total sRPE training load (-187.7 A.U) compared with the means for all clusters (overall means). The second, defined as a "Tennis-specific oriented training" cluster, was statistically defined by a higher total tennis training duration (+86.1 min) and a lower total strength training duration (-28.8 min) compared with the overall means. The third, defined as a "S&C oriented training" cluster, was statistically defined by a higher total strength training duration (+70.3 min) and a higher total sRPE training load (+482.1 A.U) compared with the overall means. Kruskal-Wallis analyses showed no significant differences among clusters for muscle soreness (p = 0.10, ES: -0.19 to -0.09) and perceived fatigue (p = 0.07, ES: -0.16 to -0.08). We observed no significant differences among clusters for Δmuscle soreness (p = 0.65), Δperceived fatigue (p = 0.98), sleep quality (p = 0.11), or perceived recovery (p = 0.12). The results for the stress subjective variables were not interpretable as a median, and the values of the lower and upper quartiles for Δstress were 0 (-0.1–0.1) and 0.4 (0.0–1.6), respectively, for stress reported on PRE questionnaires.

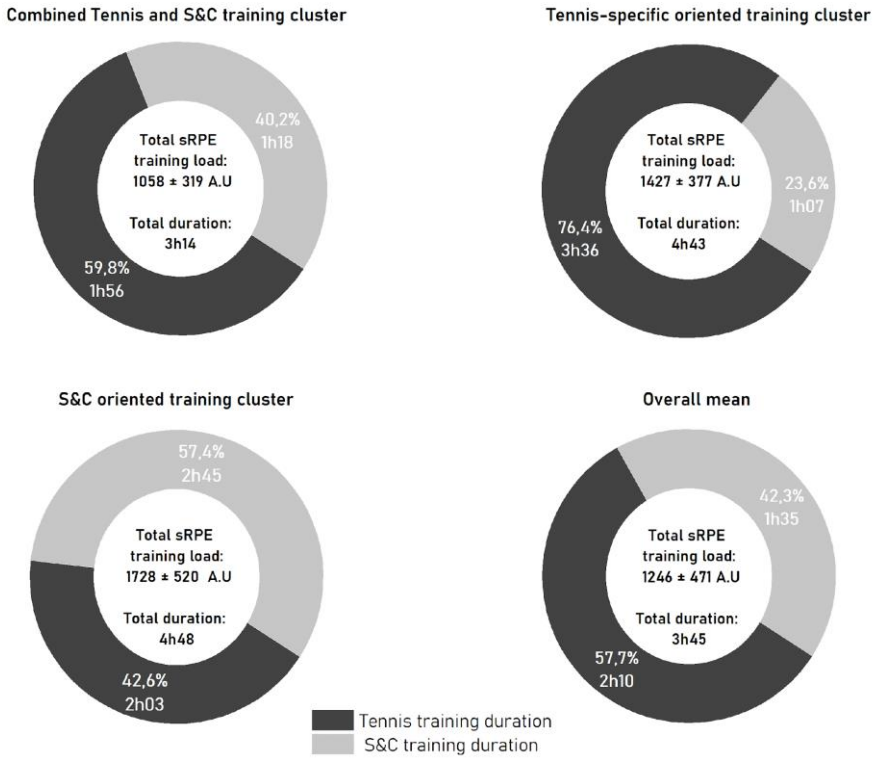


Figure 3. Mean ± SD of the three selections variables for each of training clusters and the overall mean. Overall mean: average of the 146 sessions; S&C (strength and conditioning) training duration expressed in hours and %; tennis training duration expressed in hours.

2. Recovery techniques adopted by professional tennis players

Most of the players (69.2%) used a combination of 2 (41.8%) or 3 (27.4%) recovery modalities, with an average of 2.6 ± 1.0 techniques per session. Cooling (CWI, CWT, and WBC) was used by 87.6% of the players. Passive mobilization was the second-most commonly used technique (61.6%), followed by physiotherapy techniques (47.9%), lower limb blood flow stimulation (46.5%), and heating strategies (14.3%) (Table 1).

3. Mixed linear model results

We did not observe any significant interactions between clusters and recovery modalities (all p values > 0.05). The linear mixed-model regression analysis revealed that cooling strategies were associated with Δmuscle soreness (β = -1.00, 95% confidence interval [CI] [-1.8, -0.1], p = 0.02). The LRT confirmed that cooling strategies significantly reduced muscle soreness ($\chi 2 = 4.93$, p = 0.02).

4. Comparison of cold recovery modalities

Because we noticed a significant association between cooling strategies and Δmuscle soreness, wecompared the effect of each modality on the same subjective recovery variables. We observed no significant differences between CWI, CWT and WBC for Δmuscle soreness (p = 0.33), Δperceived fatigue (p = 0.60) or sleep quality (p = 0.45). Kruskal-Wallis analyses revealed significant differences between cold recovery modalities (p = 0.03) for perceived recovery, with a higher score for WBC compared with CWI (p = 0.02). No significant differences were observed among the other cooling techniques (all p values = 1.0).

		Passive mobilization	Physiotherapy techniques	Heating strategies	Lower limb blood flow stimulation	Cooling strategies
		Number of uses per each recovery modalities				
		Foam-rolling (n=4); Stretching (n=86)	Joint mobilization (n=5); Massages (n=53); Osteopathy (n=12)	Hot immersion (n=20); Steam room (n=1)	Active recovery (n=55); Electrostimulation (n=2); Thermo-neutral Water Immersion (n=2); Compression garments (n=4); External pneumatic compression (n=5)	Whole-body cryotherapy (n=51); Cold-Water immersion (n=64); Contrast Water Therapy (n=13)
		Number of recovery modalities used after a training day				
Number of recovery strategies implemented per session	Total	n				
1	17	1	2	0	1	13
2	61	27	19	5	21	49
3	40	32	26	5	23	34
4	21	22	15	6	17	24
5	7	8	8	5	6	8
Total	**146**	**90**	**70**	**21**	**68**	**128**

Table 1. Summary of recovery modalities used after a training day. The total number of times players chose a specific recovery modality after a training day is reported as n.

		Δmuscle soreness			Δperceived fatigue			Sleep quality			Perceived recovery		
		β	CI	p value	β	CI	p value	β	CI	p value	β	CI	p value
	FIXED EFFECT												
TRAINING CLUSTERS	**Intercept**	0.26	[-0.8 ; 1.3]	0.61	-0.60	[-1.8 ; 0.6]	0.32	3.85	[2.6 ; 5.1]	0.00	5.12	[4.1 ; 6.2]	0.00
	Cluster 2	-0.45	[-1.4 ; 0.5]	0.34	-0.52	[-1.6 ; 0.5]	0.33	0.44	[-0.7 ; 1.6]	0.42	-0.14	[-1.0 ; 0.7]	0.74
	Cluster 3	0.31	[-0.4 ; 1.0]	0.39	-0.15	[-1.0 ; 0.6]	0.71	0.29	[-0.5 ; 1.1]	0.49	-.01	[-0.7 ; 0.6]	0.96
RECOVERY MODALITIES CATEGORIES	**Cooling strategies**	-1.00	[-1.8 ; -0.1]	0.02*	-0.48	[-1.5 ; 0.5]	0.33	-0.32	[-1.4 ; 0.7]	0.54	.12	[-0.7 ; 1.0]	0.78
	Heating strategies	-0.17	[-1.0 ; 0.7]	0.70	-0.11	[-1.1 ; 0.9]	0.83	0.04	[-1.0 ; 1.1]	0.93	.65	[-0.2 ; 1.5]	0.14
	Passive mobilization	-0.11	[-0.8 ; 0.5]	0.72	-0.04	[-0.8 ; 0.7]	0.91	-0.23	[-1.0 ; 0.5]	0.53	.44	[-0.2 ; 1.1]	0.15
	Lower limb blood flow stimulation	-0.04	[-1.0 ; 0.3]	0.25	-0.26	[-1.0 ; 0.4]	0.48	0.06	[-0.7 ; 0.8]	0.87	-.27	[-0.9 ; 0.3]	0.36
	Physiotherapy techniques	-0.17	[-0.8 ; 0.4]	0.59	0.43	[-0.3 ; 1.1]	0.24	0.14	[-0.6 ; 0.9]	0.70	.16	[-0.4 ; 0.8]	0.59

Table 2. Results of the mixed-effects models testing the distinct effect of training clusters and recovery modalities on subjective variables. β: small point estimates; CI : 95% confidence intervals ; *p<0.05 ; Δ muscle soreness = muscle soreness (POST) - muscle soreness (PRE) ; Δ perceived fatigue = perceived fatigue (POST) perceived fatigue (PRE).

5. Discussion

The present study reported 3 major findings: (i) professional tennis players consistently adopt recovery methods after training, primarily utilizing a combination of 2 to 3 techniques, with cooling techniques being the most widely used modality; (ii) muscle soreness and perceived fatigue are not significantly different depending on training profile clusters; and (iii) only cooling strategies were found to be efficient for attenuating muscle soreness, regardless of the training type cluster.

Given that 91% of considered sessions were monitored between mid-November and the end of December, our data may represent the distribution of training loads during the preseason period. Tennis players daily experienced a total sRPE training load of 1246 ± 471 A.U. per day, which is similar to the total sRPE training load of 1267 A.U. that was recently reported by Murphy et al. (2015) for high-performance junior tennis players during a 4-week pre-competition period. In more detail, the daily tennis training volume obtained in our study (130.3 ± 41.0 min) was similar to the 151.0 ± 12.1 min daily training volume reported by Murphy et al. (2015). In contrast, they observed shorter strength and conditioning volumes (45.0 ± 14.9 min), in comparison with the 95.5 ± 50.2 min observed in our study. This observation is consistent coherent with the increase in strength training loads that occur between 17 and 20 years of age, as the players involved in our study were approximately 3 years older, on average, than the players in the Murphy et al.(2015).

Three clusters, representing the different types of classic training days, were identified among the professional tennis players in this study. The “combined tennis and S&C training” cluster better reflects a typical training day, as it represented the majority of monitored sessions (n = 97). In addition, the total sRPE training load, tennis training duration, and strength and conditioning training duration values for “combined tennis and S&C training” cluster were similar to the overall means calculated for all sessions. Thus, a typical training day appears to consist of an approximately evenly distributed volume of tennis and strength and conditioning training. Training days with a predominant volume of either tennis (“Tennis-specific oriented training” cluster , n = 18) or strength and conditioning (“S&C oriented training” cluster, n = 31) training appears

to be less experienced by professional tennis players who compete in international tournaments.

Contrary to our hypothesis, the training clusters did not show any significant differences for muscle soreness or perceived fatigue, either before or after recovery intervention. This finding was not consistent with the findings of previous studies, which showed a positive correlation between training load and muscle soreness or perceived fatigue in professional football players (Moalla et al., 2016; Thorpe et al., 2017). However, this potential association remains controversial because, to our knowledge, no study has provided any theoretical and validated explanation to support these findings (Saw et al., 2016). Furthermore, muscle soreness and perceived fatigue can be elevated for up to 72 h following matches or training. Some items may have been more sensitive to differences in the clusters if additional time points had been collected later in the recovery time-course (Ojala and Hakkinen, 2013). In this context, the level of fatigue has recently been reported to be more sensitive to accumulated training days among professional football players (Thorpe et al., 2017). Future research is warranted to explore the impacts of accumulated and chronic training loads on these subjective variables in professional tennis players.

After a day of training, 86.3% of the professional tennis players included in the current study used a combination of 2 to 5 recovery modalities, with 69.2% of players using 2 or 3 modalities. This observation is in line with a recent study reported by Fleming et al. (Fleming et al., 2018) which indicated that 80% of competitive tennis players used multiple recovery modalities after a match. A combination of at least 2 recovery modalities appeared to be a well-integrated post-training habit among the professional tennis players involved in this study. The only study that explored the effects of a combined mixed-method recovery intervention found that the combination of 3 recovery modalities CWI, compression garments, and sleep-hygiene recommendations) was effective for reducing muscle soreness after twice-a-day, on-court, tennis sessions (Duffield et al., 2014). This finding could, therefore, be considered to be reflective of the progressive transfer of evidence-based knowledge into recovery practices in tennis.

More than 83% of players performed a cooling intervention (CWI, WBC, or CWT) after training, which is supported by similar recent studies, highlighting the considerable use of cooling strategies, particularlyCWI, among elite rugby players (Tavares et al., 2017), professional soccer teams (Nedelec et al., 2013), and competitive tennis players (Fleming et al., 2018). Similar to other sports, passive mobilization (stretching) and low-limb blood flow stimulation (active recovery) were also used frequently by the players included in this study (Bahnert et al., 2013). The easy access to recovery methods available at the Tennis Center may have influenced the athletes' behaviors and biased the selection of recovery routines (Bahnert et al., 2013). Because a substantial number of training sessions (146 sessions) was monitored among a large cohort of players (35 professional players), the present data can confidently be considered to be reflective of the recovery habits adopted by professional tennis players during preparatory/pre-competitive phases in a high-level environment.

Using this representative cohort, mixed linear models allowed us to independently test the impacts of clusters and recovery methods on the subjective variables. First, the absence of significant associations between subjective variables and clusters confirmed that neither muscle soreness nor perceived fatigue was related to the total sRPE training load or content. Our primary finding was that cooling techniques were significantly associated with attenuated muscle soreness (Table 2) the following day (12–16 h after training). These results are consistent with previous research that revealed positive impacts associated with CWI (Nedelec et al., 2013; Ihsan et al., 2016), WBC (Hausswirth et al., 2011), and CWT (Bieuzen et al., 2013) on decreased muscle soreness. Similar results were found by Duffield et al. (2014), who reported a significant decrease in muscle soreness the morning after a tennis training day when a combination of CWI, compression garments, and sleep education was applied. Recent research reported no positive effects for CWI or WBC on muscle soreness sustained by recreational athletes after a fatiguing protocol performed under controlled laboratory conditions, which could be imperfectly representative of the degree of muscle damage induced by professional tennis practice (Wilson et al., 2018). The common purpose of recovery techniques is to decrease cutaneous, muscle, and core temperatures (Costello et al.,

2012; Bieuzen et al., 2013; Ihsan et al., 2016), to induce an analgesic effect during the first hours after exercise, via the inhibition of nociceptors. Such acute mechanisms were unlikely to influence the present measurements, as data regarding muscle soreness and other subjective variables were collected between 12 and 16 h post-recovery (Ihsan et al., 2016). Cooling more likely limited edema formation and inflammatory responses, through the modulation of blood flow (CWI, WBC, and CWT) and the stimulation of fluid transport (CWI and CWT), thereby, decreasing muscle soreness (Costello et al., 2012; Ihsan et al., 2016). We also cannot completely exclude a potential placebo effect, as demonstrated by recent studies (Broatch et al.; Wilson et al., 2018), even if this observation was made in recreational athletes with very different training histories and objectives than those characteristics of professional training players.

Contrary to the results of our study, 20–30 min of massage performed after exercise has been reported to reduce delayed-onset muscle soreness for up to 72 h post-exercise (Guo et al., 2017), as confirmed by a recent meta-analysis that found that massage was the most effective technique for reducing muscle soreness (Dupuy et al., 2018). Similarly, foam rolling (Wiewelhove et al., 2019), electrostimulation (Borne et al., 2015), and compression garments (Marqués-Jiménez et al., 2015) have all been demonstrated to attenuate muscle soreness after exercise. Exercise may induce various physiological and psychological stresses, depending on numerous factors, such as mode, duration, or training status (Halson et al., 2014). However, some previous studies (Guo et al., 2017; Dupuy et al., 2018; Wiewelhove et al., 2019) have been meta-analyses, combining data from multiple various fatiguing protocols, which have very limited transfer to ecological contexts due to the lack of distinction in the levels of muscle soreness induced by exercise and the training levels of the athletes. The present study appraised real and ecological psychophysiological responses to training and recovery in professional tennis players. The potential positive effects of certain recovery interventions (foam rolling and electrostimulation), which are less commonly utilized by tennis players, may have been concealed by the use of more popular recovery techniques that have been demonstrated to be inefficient in the literature (stretching and active recovery) (Van Hooren and Peake, 2018). Although cooling strategies significantly alleviated muscle

soreness, none of the cold recovery modalities that were monitored in the present study attenuated perceived fatigue, in contrast with the positive effects of cold modalities and/or massages that have previously been reported in the literature (Dupuy et al., 2018). Contrary to previous studies performed in elite athletes, we did not observe improved sleep quality following WBC and CWI (Schaal et al., 2015). However, these reports were anecdotal, and most research studies have found little evidence for improved sleep after cold application (Broatch et al., 2019).

Because the underlying mechanisms may differ between different cold techniques, we strived to distinguish the respective effects of each cooling strategy used by professional players. No significant differences between cold modalities were observed for muscle soreness of perceived fatigue. Based on previous studies, we expected a greater decrease in muscle soreness after CWI or CWT compared with WBC (Bleakley et al., 2012; Hohenauer et al., 2015). WBC showed a significant increase in perceived recovery compared with CWI. These results are in line with a study reported by Hausswirth et al. (2011) (+21.7 on a 100-point rating scale), who showed an increase in perceived recovery after WBC compared with passive condition 24 h after a simulated trail run. Indeed, previous studies have revealed that WBC may increase norepinephrine and dopamine release, resulting in an additional analgesic effect and the increases perception of recovery and well-being. Inversely, a previous study showed no effect of CWI on psychological recovery after exercise (Cheung et al., 2003). However, considering the time-course of subjective variable measurements (> 12 h post-recovery), these findings should be considered with caution, as the timing of norepinephrine and dopamine release in response to cooling strategies remains unclear. These latter statistical comparisons between cold modalities were different from the mixed linear model because they did not independently test the effects of each intervention. Other techniques used in combination with a cooling strategy could, therefore, influence subjective variables. The high variability in the different subjective variables confirmed that responses to recovery interventions are specific and individual.

6. Limitations

Some methodological considerations should be noted when interpreting the present absolute values of subjective recovery variables. First, training clusters may have elicited significantly different effects on subjective recovery variables if no recovery interventions (i.e., a control condition) had been implemented. However, this condition would not be representative of real-world professional athlete conditions. We used the linear mixed model to overcome this bias, by estimating each subjective recovery variable for each training cluster while excluding the potential effects of recovery modalities. Second, raw data of subjective variables (Δmuscle soreness, Δperceived fatigue, sleep quality, and perceived recovery) were unfortunately not available as players mostly used a combination of modalities. Thus, linear mixed model allowed to estimate subjective variables that would likely be recorded for each recovery modalities categories (Table 2). Third, one should acknowledge that some key variables recognize to alter subjective recovery were not controlled in the present study, such as menstrual cycle or travel. However, the data collection period, which was restricted to the training phase, limited the potential influences of travel or jet lag on fatigue. Fourth, the data collection period was circumscribed to the training phases of players (≈ 40% of the season). On the one hand, this controlled period of time restricted the number of training sessions that could be monitored for each player. On the other hand, it limited the potential influences of travel or jet lag on fatigue.

7. Conclusion

This study showed that professional tennis players face substantial daily training loads (total sRPE training load) during training periods, with no consistent impacts on acute subjective recovery. Future research should investigate the potential impacts of accumulated training loads over longer periods of time. The benefits of recovery routines consisting of multiple recovery techniques appear to be well-anchored in practice. During general, specific preparations or during the taper period, cold modalities appear to efficiently decrease tennis training-induced muscle soreness compared with other recovery techniques. However, future research should include more data, with homogeneous repartition between recovery interventions, to compare the efficiencies of different combinations of recovery interventions. Although effective,

cold recovery should be implemented at key strategic moments, to limit fatigue without blunting expected adaptations. The inter-individual variability observed among the perceived responses to training loads and recovery strengthens the necessity to perform continuous training load monitoring to improve recovery periodization, based on individual training-induced fatigue.

8. Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest

9. Funding

This research was supported by the French Ministry of Sport (16R09)

10. Author Contributions

MP, FB, BM conceived and designed research. MP conducted experiments. MP, FB, GG, QDL, BM analyzed data. MP, FB, GG wrote the manuscript.

11. Acknowledgments

The authors would like to acknowledge participants for their generous involvement in this study. All authors read and approved the manuscript. No potential conflict of interest was reported by the authors.

12. References

Agu, O., Hamilton, G., and Baker, D. (1999). Graduated compression stockings in the prevention of venous thromboembolism. *Br J Surg* 86(8), 992-1004. doi: 10.1046/j.1365-2168.1999.01195.x.

Bahnert, A., Norton, K., and Lock, P. (2013). Association between post-game recovery protocols, physical and perceived recovery, and performance in elite Australian Football League players. *J Sci Med Sport* 16(2), 151-156. doi: 10.1016/j.jsams.2012.05.008.

Bieuzen, F., Bleakley, C.M., and Costello, J.T. (2013). Contrast water therapy and exercise induced muscle damage: a systematic review and meta-analysis. *PLoS One* 8(4), e62356. doi: 10.1371/journal.pone.0062356.

Bleakley, C., McDonough, S., Gardner, E., Baxter, G.D., Hopkins, J.T., and Davison, G.W. (2012). Cold-water immersion (cryotherapy) for preventing and treating muscle soreness after exercise. *Cochrane Database Syst Rev* (2), CD008262. doi: 10.1002/14651858.CD008262.pub2.

Borne, R., Hausswirth, C., Costello, J.T., and Bieuzen, F. (2015). Low-frequency electrical stimulation combined with a cooling vest improves recovery of elite kayakers

following a simulated 1000-m race in a hot environment. *Scand J Med Sci Sports* 25 Suppl 1**,** 219-228. doi: 10.1111/sms.12392.

Broatch, J.R., Petersen, A., and Bishop, D.J. (2014). Postexercise cold water immersion benefits are not greater than the placebo effect. *Med Sci Sports Exerc* 46(11)**,** 2139-2147. doi: 10.1249/MSS.0000000000000348.

Broatch, J.R., Poignard, M., Hausswirth, C., Bishop, D.J., and Bieuzen, F. (2019). Whole-body cryotherapy does not augment adaptations to high-intensity interval training. *Sci Rep* 9(1)**,** 12013. doi: 10.1038/s41598-019-48518-1.

Cheung, K., Hume, P., and Maxwell, L. (2003). Delayed onset muscle soreness: treatment strategies and performance factors. *Sports Med* 33(2)**,** 145-164.

Costello, J.T., Baker, P.R., Minett, G.M., Bieuzen, F., Stewart, I.B., and Bleakley, C. (2015). Whole-body cryotherapy (extreme cold air exposure) for preventing and treating muscle soreness after exercise in adults. *Cochrane Database Syst Rev* (9)**,** CD010789. doi: 10.1002/14651858.CD010789.pub2.

Costello, J.T., Culligan, K., Selfe, J., and Donnelly, A.E. (2012). Muscle, skin and core temperature after -110 degrees c cold air and 8 degrees c water treatment. *PLoS One* 7(11)**,** e48190. doi: 10.1371/journal.pone.0048190.

Duffield, R., Murphy, A., Kellett, A., and Reid, M. (2014). Recovery from repeated on-court tennis sessions: combining cold-water immersion, compression, and sleep recovery interventions. *Int J Sports Physiol Perform* 9(2)**,** 273-282. doi: 10.1123/ijspp.2012-0359.

Dupuy, O., Douzi, W., Theurot, D., Bosquet, L., and Dugue, 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.

Fernandez-Fernandez, J., Sanz-Rivas, D., Sanchez-Munoz, C., Pluim, B.M., Tiemessen, I., and Mendez-Villanueva, A. (2009). A comparison of the activity profile and physiological demands between advanced and recreational veteran tennis players. *J Strength Cond Res* 23(2)**,** 604-610. doi: 10.1519/JSC.0b013e318194208a.

Fernandez-Fernandez, J., Sanz-Rivas, D., Sarabia, J.M., and Moya, M. (2015). Preseason Training: The Effects of a 17-Day High-Intensity Shock Microcycle in Elite Tennis Players. *J Sports Sci Med* 14(4)**,** 783-791.

Fleming, J.A., Naughton, R.J., and Harper, L.D. (2018). Investigating the Nutritional and Recovery Habits of Tennis Players. *Nutrients* 10(4). doi: 10.3390/nu10040443.

Foster, C., Florhaug, J.A., Franklin, J., Gottschall, L., Hrovatin, L.A., Parker, S., et al. (2001). A new approach to monitoring exercise training. *J Strength Cond Res* 15(1)**,** 109-115.

Fritz, C.O., Morris, P.E., and Richler, J.J. (2012). Effect size estimates: current use, calculations, and interpretation. *J Exp Psychol Gen* 141(1)**,** 2-18. doi: 10.1037/a0024338.

Fu, M.C., Ellenbecker, T.S., Renstrom, P.A., Windler, G.S., and Dines, D.M. (2018). Epidemiology of injuries in tennis players. *Curr Rev Musculoskelet Med* 11(1)**,** 1-5. doi: 10.1007/s12178-018-9452-9.

Gomes, R.V., Moreira, A., Lodo, L., Capitani, C.D., and Aoki, M.S. (2015). Ecological Validity of Session RPE Method for Quantifying Internal Training Load in Tennis.

International Journal of Sports Science & Coaching 10(4), 729-737. doi: 10.1260/1747-9541.10.4.729.

Guo, J., Li, L., Gong, Y., Zhu, R., Xu, J., Zou, J., et al. (2017). Massage Alleviates Delayed Onset Muscle Soreness after Strenuous Exercise: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Front Physiol* 8, 747. doi: 10.3389/fphys.2017.00747.

Haddad, M., Stylianides, G., Djaoui, L., Dellal, A., and Chamari, K. (2017). Session-RPE Method for Training Load Monitoring: Validity, Ecological Usefulness, and Influencing Factors. *Front Neurosci* 11, 612. doi: 10.3389/fnins.2017.00612.

Halson, S.L., Bartram, J., West, N., Stephens, J., Argus, C.K., Driller, M.W., et al. (2014). Does hydrotherapy help or hinder adaptation to training in competitive cyclists? *Med Sci Sports Exerc* 46(8), 1631-1639. doi: 10.1249/MSS.0000000000000268.

Hausswirth, C., Louis, J., Bieuzen, F., Pournot, H., Fournier, J., Filliard, J.R., et al. (2011). Effects of whole-body cryotherapy vs. far-infrared vs. passive modalities on recovery from exercise-induced muscle damage in highly-trained runners. *PLoS One* 6(12), e27749. doi: 10.1371/journal.pone.0027749.

Heidari, J., Beckmann, J., Bertollo, M., Brink, M., Kallus, W., Robazza, C., et al. (2018). Multidimensional Monitoring of Recovery Status and Implications for Performance. *Int J Sports Physiol Perform*, 1-24. doi: 10.1123/ijspp.2017-0669.

Hohenauer, E., Taeymans, J., Baeyens, J.P., Clarys, P., and Clijsen, R. (2015). The Effect of Post-Exercise Cryotherapy on Recovery Characteristics: A Systematic Review and Meta-Analysis. *PLoS One* 10(9), e0139028. doi: 10.1371/journal.pone.0139028.

Hooper, S.L., and Mackinnon, L.T. (1995). Monitoring overtraining in athletes. Recommendations. *Sports Med* 20(5), 321-327. doi: 10.2165/00007256-199520050-00003.

Hooper, S.L., Mackinnon, L.T., Howard, A., Gordon, R.D., and Bachmann, A.W. (1995). Markers for monitoring overtraining and recovery. *Med Sci Sports Exerc* 27(1), 106-112.

Ihsan, M., Watson, G., and Abbiss, C.R. (2016). What are the Physiological Mechanisms for Post-Exercise Cold Water Immersion in the Recovery from Prolonged Endurance and Intermittent Exercise? *Sports Med* 46(8), 1095-1109. doi: 10.1007/s40279-016-0483-3.

Kellmann, M., Bertollo, M., Bosquet, L., Brink, M., Coutts, A.J., Duffield, R., et al. (2018). Recovery and Performance in Sport: Consensus Statement. *Int J Sports Physiol Perform* 13(2), 240-245. doi: 10.1123/ijspp.2017-0759.

Kovacs, M. (2018). "The Role of Scheduling and Periodization in Competitive Tennis Players," in *Tennis Medicine,* eds. G. Di Giacomo, T.S. Ellenbecker & W.B. Kibler. (Cham: Springer International Publishing), 679-686.

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(1), 131-142. doi: 10.1249/MSS.0b013e3182a123db.

Marqués-Jiménez, D., Calleja-Gonzalez, J., Arratibel, I., Delextrat, A., and Terrados, N. (2015). Are compression garments effective for the recovery of exercise-induced muscle damage? A systematic review with meta-analysis. *Physiology & behavior* 153. doi: 10.1016/j.physbeh.2015.10.027.

Menetrier, A., Mourot, L., Degano, B., Bouhaddi, M., Walther, G., Regnard, J., et al. (2015). Effects of three postexercice recovery treatments on femoral artery blood flow kinetics. *J Sports Med Phys Fitness* 55(4), 258-266.

Moalla, W., Fessi, M.S., Farhat, F., Nouira, S., Wong, D.P., and Dupont, G. (2016). Relationship between daily training load and psychometric status of professional soccer players. *Res Sports Med* 24(4), 387-394. doi: 10.1080/15438627.2016.1239579.

Murphy, A.P., Duffield, R., Kellett, A., Gescheit, D., and Reid, M. (2015). The Effect of Predeparture Training Loads on Posttour Physical Capacities in High-Performance Junior Tennis Players. *Int J Sports Physiol Perform* 10(8), 986-993. doi: 10.1123/ijspp.2014-0374.

Nédélec, M., Halson, S., Abaidia, A.E., Ahmaidi, S., and Dupont, G. (2015). Stress, Sleep and Recovery in Elite Soccer: A Critical Review of the Literature. *Sports Med* 45(10), 1387-1400. doi: 10.1007/s40279-015-0358-z.

Nedelec, M., McCall, A., Carling, C., Legall, F., Berthoin, S., and Dupont, G. (2013). Recovery in soccer : part ii-recovery strategies. *Sports Med* 43(1), 9-22. doi: 10.1007/s40279-012-0002-0.

Ojala, T., and Hakkinen, K. (2013). Effects of the tennis tournament on players' physical performance, hormonal responses, muscle damage and recovery. *J Sports Sci Med* 12(2), 240-248.

Roberts, L.A., Raastad, T., Markworth, J.F., Figueiredo, V.C., Egner, I.M., Shield, A., et al. (2015). Post-exercise cold water immersion attenuates acute anabolic signalling and long-term adaptations in muscle to strength training. *J Physiol* 593(18), 4285-4301. doi: 10.1113/JP270570.

Sands, W.A., McNeal, J.R., Murray, S.R., Ramsey, M.W., Sato, K., Mizuguchi, S., et al. (2013). Stretching and Its Effects on Recovery. *Strength and Conditioning Journal* 35(5), 30-36. doi: 10.1519/ssc.0000000000000004.

Saw, A.E., Main, L.C., and Gastin, P.B. (2016). Monitoring the athlete training response: subjective self-reported measures trump commonly used objective measures: a systematic review. *Br J Sports Med* 50(5), 281-291. doi: 10.1136/bjsports-2015-094758.

Schaal, K., Y, L.E.M., Louis, J., Filliard, J.R., Hellard, P., Casazza, G., et al. (2015). Whole-Body Cryostimulation Limits Overreaching in Elite Synchronized Swimmers. *Med Sci Sports Exerc* 47(7), 1416-1425. doi: 10.1249/MSS.0000000000000546.

Tavares, F., Beaven, M., Teles, J., Baker, D., Healey, P., Smith, T.B., et al. (2019). Effects of Chronic Cold-Water Immersion in Elite Rugby Players. *Int J Sports Physiol Perform* 14(2), 156-162. doi: 10.1123/ijspp.2018-0313.

Tavares, F., Smith, T.B., and Driller, M. (2017). Fatigue and Recovery in Rugby: A Review. *Sports Med* 47(8), 1515-1530. doi: 10.1007/s40279-017-0679-1.

Thorpe, R.T., Strudwick, A.J., Buchheit, M., Atkinson, G., Drust, B., and Gregson, W. (2017). The Influence of Changes in Acute Training Load on Daily Sensitivity of Morning-Measured Fatigue Variables in Elite Soccer Players. *Int J Sports Physiol Perform* 12(Suppl 2), S2107-S2113. doi: 10.1123/ijspp.2016-0433.

Van Hooren, B., and Peake, J.M. (2018). Do We Need a Cool-Down After Exercise? A Narrative Review of the Psychophysiological Effects and the Effects on

Performance, Injuries and the Long-Term Adaptive Response. *Sports Med* 48(7), 1575-1595. doi: 10.1007/s40279-018-0916-2.

Vescovi, J.D. (2017). Acute:chronic training loads in tennis: which metrics should we monitor? *Br J Sports Med* 51(18), 1321-1322. doi: 10.1136/bjsports-2017-097596.

Wiewelhove, T., Doweling, 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.

Wilson, L.J., Cockburn, E., Paice, K., Sinclair, S., Faki, T., Hills, F.A., et al. (2018). Recovery following a marathon: a comparison of cold water immersion, whole body cryotherapy and a placebo control. *Eur J Appl Physiol* 118(1), 153-163. doi: 10.1007/s00421-017-3757-z.

Etude 2

Poignard M., Guilhem G., Montalvan B., Bieuzen F., Cryotherapy as a recovery technique during consecutive days of simulated tennis matches: comparison of whole-body cryotherapy, cold water immersion and passive recovery, Med. Sci. Sports Exerc. **Soumis.**

1. Abstract

Purpose This study aimed to investigate the effect of three recovery modalities (whole-body cryotherapy [WBC], cold-water immersion [CWI] and passive recovery [PAS]) on post-simulated tennis-match recovery.

Methods Thirteen competitive male tennis players completed three consecutive simulated tennis matches followed by recovery (WBC, CWI, PAS) in a crossover design. Maximal voluntary contraction (MVC) peak torque, creatine kinase activity (CK), muscle soreness, ball accuracy and ball velocity together with voluntary activation, low- and high- frequency torque and EMG activity were recorded before and after each match and 24 h following the 3rd match.

Results MVC peak torque (-7.7±11.3 %; p=0.001) and the high to low frequency torque ratio (-10.0±25.8 %; p<0.05) decreased on Day 1 alongside a light increase of CK from 161.0±100.2 to 226.0±106.7 UA L^{-1} (p=0.001). Pre-match CK activity increased (p=0.016) throughout the days of the protocol with no differences between recovery methods. MVC peak torque returned to baseline values on Day 2, Day 3 and Day 4 (p=0.052). Muscle soreness increased across days with PAS recovery (p=0.005), while no main effect of time was observed with WBC or CWI (all p>0.292). Technical performance was maintained across matches with WBC and PAS, but increased for CWI on Day 3 vs Day 1 (p=0.017).

Conclusion A 1.5-hour simulated tennis match leads to light muscle damage and changes in neuromuscular function but no decline in tennis performance or muscle force. These impairments were recovered from within 24 h and not exacerbated due to accumulated workload induced by consecutive matches. The muscle soreness resulting from three consecutive matches was similarly alleviated by both CWI and WBC.

2. Introduction

Professional tennis season imposes congested schedules upon players, who potentially play a tournament every week that consists of four or five matches plus the finale, with a limited timeframe (<24 h) for recovery between matches (1). In this context, appropriate strategies are required to minimize fatigue and accelerate recovery between matches and tournaments. Although some matches can last more than five hours, the typical duration is 1.5 h with an effective playing time (EPT) of 20% for all types of players on hard court surfaces (2). However, the unpredictable nature of a tennis game (e.g. duration, opponent, environment, surface) makes it challenging to accurately estimate the load and the athlete response experienced during match play. This can partly explain why there is no consensus regarding validated protocols for the simulation of tennis matches (1, 3, 4).

Cooling strategies are now widely used by tennis players to aid recovery between matches (5). The most popular techniques include cold-water immersion (CWI) and whole-body cryotherapy (WBC), which aim to decrease tissue and muscle temperatures and thereby protect the musculoskeletal system from further exercise-induced alterations, in turn increasing athletic performance (6, 7). Previous studies proposed that CWI attenuates secondary exercise-induced muscle damage on the basis of a reduced increase in creatine kinase concentration (8, 9). Both techniques have also been found effective in decreasing the perception of muscle soreness and thus are proposed to attenuate delayed onset muscular soreness (10-12). By improving physical and perceptual states, CWI and WBC may accelerate neuromuscular function recovery (11-13) and limit functional performance decrements (8). In the context of performance,

a few studies have demonstrated CWI to efficiently attenuate muscle soreness and limit performance decrements after intermittent-sprint exercises and/or team sports (10, 14, 15). CWI in combination with compression garments and sleep hygiene recommendations was likewise confirmed by a recent study to alleviate muscle soreness in an ecological tennis setting (16), with subsequent increase in playing time and lower body power-generating capacity after one day of repeated on-court tennis training (16). In contrast, no study has yet confirmed the potential benefit of WBC in field conditions (17, 18). Relative to WBC, CWI could be more efficient due to the hydrostatic pressure of water and to the conductive effect conferring greater ability to reduce tissue temperature (19). However, recent studies directly comparing the potential effects of WBC and CWI on muscle soreness and functional recovery have reported conflicting results (11, 20), requiring further investigation in the context of specific exercise-induced fatigue (21).

Recently, Gesheit et al. (22) and Ojala & Hakkinen (23) reported progressive impairments of lower limb maximal and explosive force over successive days of tennis play, and also up to 48 h after the end of the last match (23). They both proposed that physical fatigue could partly explain alterations in service stroke velocity, service accuracy and movement patterns (EPT, work-to-rest ratio). Gesheit et al. (22) also revealed increases in fatigue and soreness ratings, suggesting that impairment of tennis-specific performance is associated with complex interactions between perceptual, physiological and functional alterations. However, those studies did not investigate neuromuscular fatigue, therefore leaving incomplete our understanding of the development of fatigue during tennis practice (24). Meanwhile, Girard et al. (25)

observed alterations in voluntary activation accompanied by peripheral fatigue, including low-frequency peripheral fatigue during and 30 min after 3-h match play. Taken together, the documented low-frequency peripheral fatigue (related to impaired excitation-contraction coupling), increase in creatine kinase concentration and elevated perceptions of muscle soreness suggest that tennis play may trigger muscle damage (3, 22, 23, 25, 26).

This study aimed to investigate the effect of three recovery modalities (WBC, CWI and passive recovery [PAS]) on tennis-specific performance monitored over three days of simulated tennis matches with assessment of some associated markers of physiological and neuromuscular fatigue. Specifically, we used an instrumented tennis court to monitor tennis-specific performance during five drills expected to simulate the workload and physiological stress elicited by a 1.5-h tennis match on each of three consecutive days. We hypothesized that (i) daily use of WBC or CWI could be beneficial for limiting post-match fatigue and accumulated fatigue (after three consecutive matches) compared with the passive condition; and (ii) CWI could attenuate muscle soreness and loss of lower limb force-generating capacity to a greater extent than WBC.

3. Methods

1. Participants

Thirteen well-trained regional tennis players (mean ± SD; age=28 ± 6 yr; height=180 ± 6 cm; body mass=73 ± 6 kg; two left-handers; 11 right-handers; mean training volume=7 ± 3 $h.week^{-1}$) volunteered to participate in this study. Before the experiment, all participants underwent a medical examination to rule out potential contraindications to intense cold exposure (cardiovascular risk factor, history of respiratory disease, cold

hypersensitivity). Players were informed of the procedures and the risks associated with tests and investigations before providing their written consent. All procedures conformed to the standards of the Declaration of Helsinki and the study was approved by the ethics committee of Sud Méditerranée IV (No. 17 10 05) and by the French Health Agency (IRB no 2017-A02255-48).

2. Experimental Overview

Participants first completed two sessions to become familiar with all neuromuscular, physiological and perceptual measures and to perform each of the recovery interventions. They were also accustomed to each step of the simulated tennis matches by performing one repetition of tennis serve exercise and one repetition of each of the five included tennis drills. Oral and written instructions regarding expected movement patterns, velocity and accuracy of the strokes were also provided for each exercise and drill. Then, players completed three 4-day experimental conditions in a randomized order separated by at least seven days (Figure 1). Participants were asked to refrain from exercise during the four days of each testing session. All trainings performed during the three days preceding each session were collected to control for potential residual fatigue from previous strenuous training. Food and hydration diaries were completed 24 h before and during the four days of the first experimental condition and that same diet replicated over the three subsequent experimental conditions. Day 1, Day 2 and Day 3 followed similar testing schedules at the same times of day (± 2 h) to minimize the effects of circadian rhythms. Participants were asked to not consume stimulant (caffeine, alcohol) and anti-inflammatory medications during the three weeks of the protocol. On arrival, players performed *pre measurements* consisting of (i) a

psychometric questionnaire, (ii) a fingertip sample of capillary blood to assess creatine kinase activity, (iii) a 10-min warm-up on a cycle ergometer, (iv) neuromuscular tests, and (v) a second 10-min on-court warm-up. Participants then performed *tennis sequences* on the tennis court. Within 5 min after the end of the last tennis serve exercise, participants performed *post measurements* consisting of (i) neuromuscular tests, (ii) rating of the perceived exertion (RPE) of tennis matches, (iii) creatine kinase activity assessment, and (iv) completing a psychometric questionnaire. Then, they performed their assigned recovery intervention (Figure 1). On Day 4, participants carried out only pre measurements, except the second warm-up. Participants were allowed to consume water *ad libitum* during all sessions. All testing was performed in a temperature-controlled environment (21 °C and 55% relative humidity).

3. Simulated tennis matches

Tennis matches were designed to simulate as closely as possible an actual match play of 90 min, which is the typical average match duration of a professional tennis event (2). The protocol was performed on an indoor tennis court (GreenSet surface, GreenSet Worldwide S.L., Barcelona, Spain), and the duration of the total work completed during tennis matches was designed to reflect the typical EPT (% of total play time) on hard court surface, which is approximately 20% (2). The actual EPT was consequently 18 min for each simulated match, for a total duration of 37.5 min per condition.

Based on previous research (27), five different drills (Figure 2, Table 1) were chosen by investigators and senior national coaches. These drills are often prescribed in the training of top professional tennis players because they elicit all the movement

patterns, various game situations and physiological responses consistent with real match play (27). To standardize the fatiguing protocol (i.e. tennis matches), all drills were performed using a ball machine (HighTOF, Echouboulains, France), placed just behind the baseline center mark, that supported setting and recording a predefined program (number and frequency of balls, duration of rallies, ball velocity, ball effects, zones of impact) (Table 1). The reliability and accuracy of this device have been previously demonstrated, with the coefficient of variation for the velocity ranging from 1 to 2% (28). For each of the five drills, a predefined program allowed the ball to be fed to specific areas in the order detailed in Figure 2a. For each stroke, players had to hit the ball cross-court into one of the two target zones (marked on the court with white tape) (Figure 2b) with the "best possible velocity/accuracy ratio".

To ensure representation of all the specific movements and strokes that would be experienced in a real tennis match, *tennis serve* exercises were also included but were not further analyzed (Table 1). In those exercises, players had to achieve three accurate serves in a specific target zone (Figure 2b) marked within 1 m of the center-service line (22). They were instructed to serve at a steady pace with the same rule as in tennis drills, with additional serves allowed until time ran out (1 min). Right-handed players served from the deuce side and left-handed players from the advantage side.

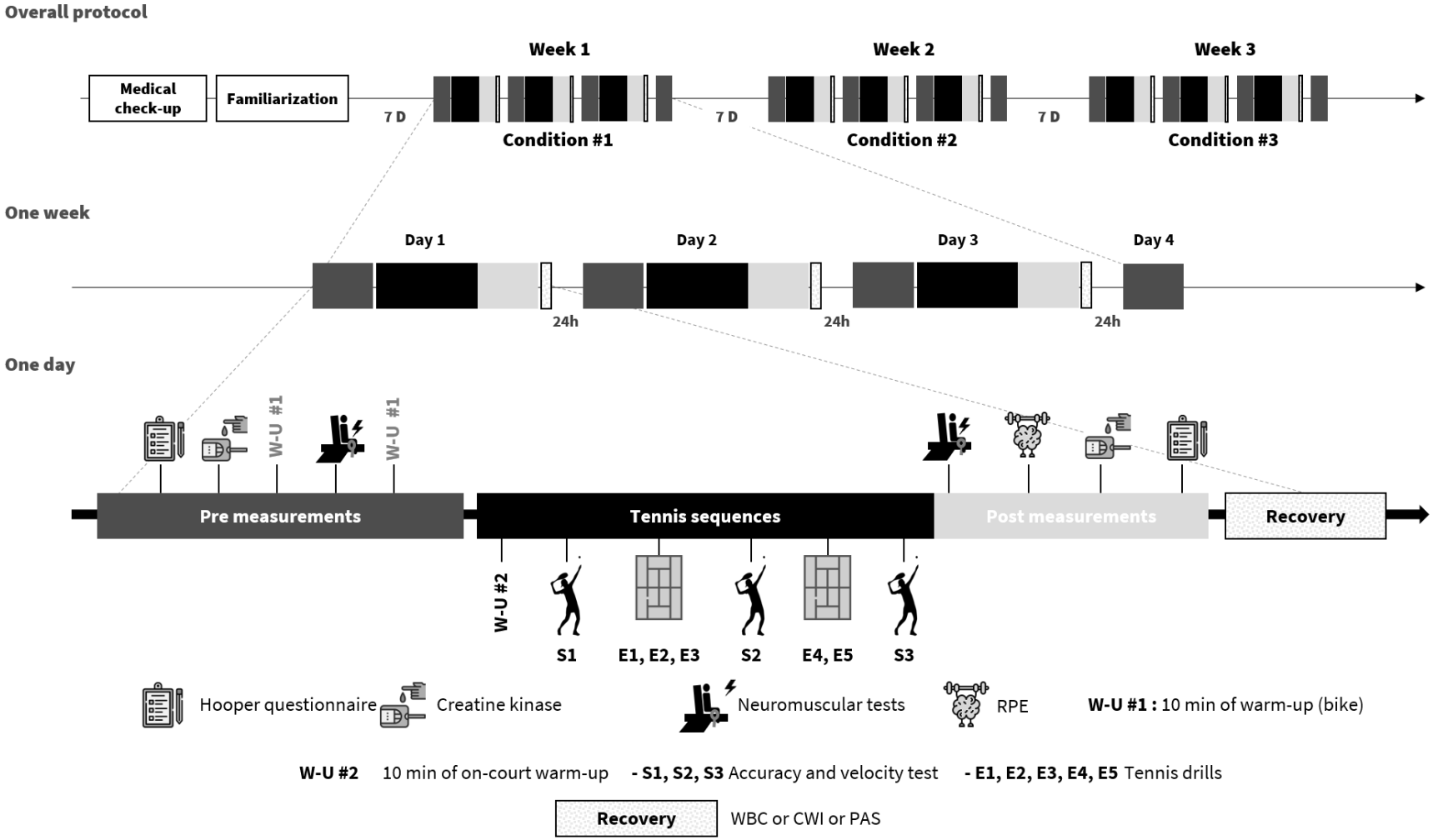


Figure 1. Schematic of the experimental design.

Under all conditions, a minimum of 100 balls was used every eight tennis matches to standardize playing conditions. Strong encouragement and live feedback were provided during all tennis matches. Participants wore a heart rate (HR) monitor (Polar Wearlink coded, Polar Electro Oy, Finland) from the on-court warm-up and throughout all tennis matches, and data were downloaded to specific software (Polarflow, Polar Electro Oy, Finland) to obtain mean HR.

4. Recovery Interventions

Recovery interventions were all performed within 30 min after completion of a tennis match and under medical supervision at the National Tennis Center (French Tennis Federation, Paris, France). In the cold-water immersion condition (CWI), players were seated for 11 min immersed up to the suprasternal notch in water held at 11 °C in a pool of the recovery area. The whole-body cryotherapy sessions (WBC) were administered in a system (Zimmer Elektromedizin, Germany) comprising two rooms each maintained at a constant temperature (-60 °C, -110 °C) throughout the protocol. Participants were first asked to dry their skin and to wear underwear or shorts, a surgical mask, a headband, gloves, dry socks and shoes. All piercings, glasses and contact lenses were removed. Participants were then allowed to enter and remain for 20 s in the -60 °C chamber, after which they proceeded to the -110 °C chamber and remained for three minutes. A doctor had visual and auditory contact with participants at all times and encouraged them to breathe and walk slowly around the chamber. For the passive condition (PAS), participants remained seated for 10 min at room temperature (22 °C).

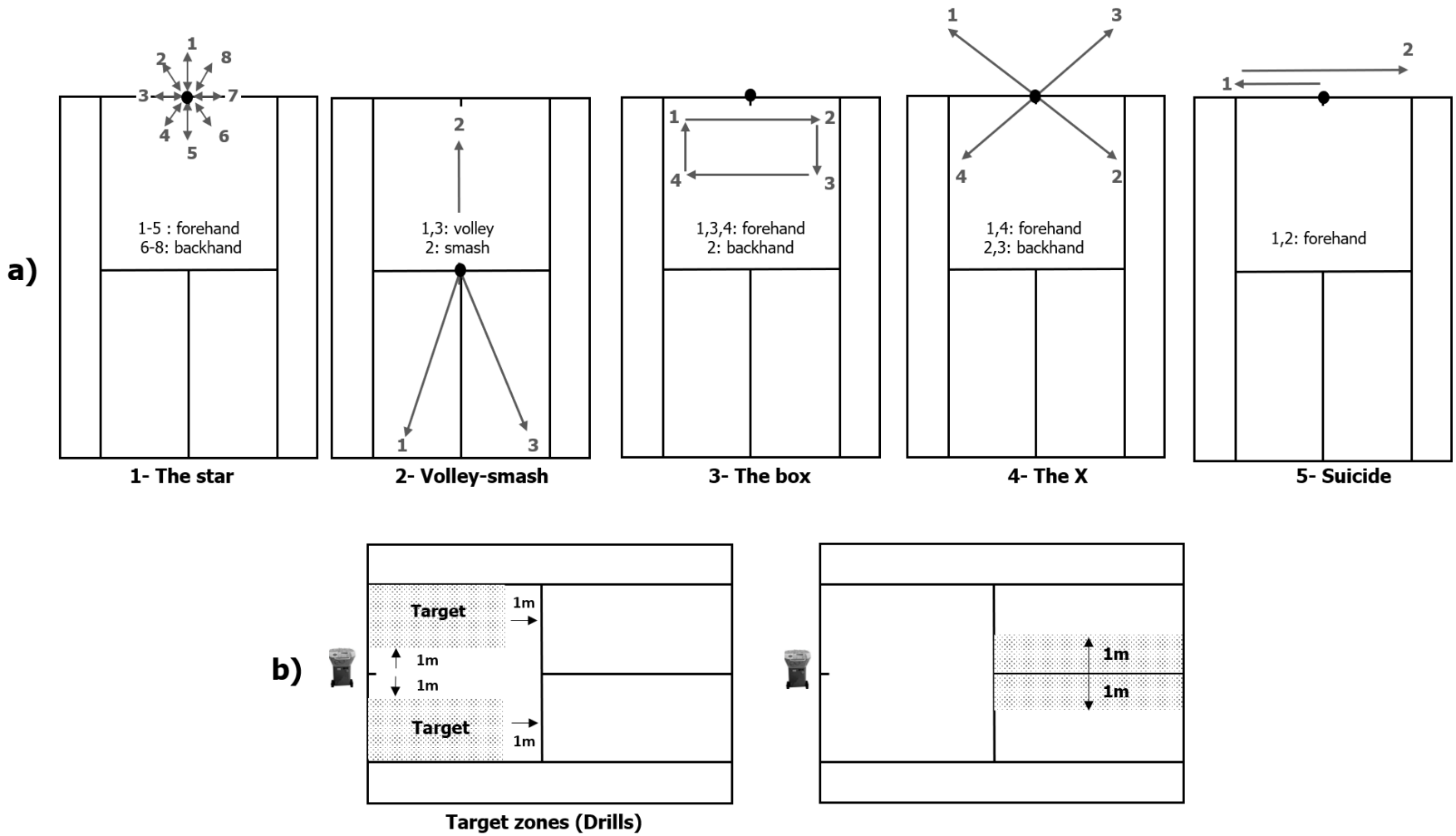


Figure 2. a) Movement and stroke patterns of the five tennis drills. b) Schematic view of the ball machine and target zones for tennis drills (left) and the tennis serve exercise (right).

Drills	Repetitions	Total strokes/repetition	Work time (s)	Rest time (s)
Warm up	/	/	**300**	/
Serve exercise 1	**/**	**/**	**60**	**/**
Break	/	/	/	90
STAR	**6**	**13**	**30**	**15**
Break	/	/	/	90
VOLLEY-SMASH	**6**	**13**	**30**	**30**
Break	/	/	/	90
THE BOX	**6**	**13**	**30**	**15**
Break	/	/	/	90
Serve exercise 2	**/**	**/**	**60**	**/**
Break	/	/	/	90
THE X	**6**	**13**	**30**	**15**
Break	/	/	/	90
SUICIDE	**6**	**11**	**30**	**15**
Break	/	/	/	90
Serve exercise 3	**/**	**/**	**60**	**/**
TOTAL	**/**	**378**	**1380**	**1170**

Table 1. Description of the simulated tennis match. Warm-up consisted of 1 min of forehand with balls thrown to the central area of the court, 2 min of alternating forehand and backhand strokes with balls thrown into the right and left corners of the baseline, 1 min of volley and smashes and ended with 1 min of tennis serves. During the warm-up, players were told to hit balls cross-court into one of the two target zones. After the warm-up, players performed tennis matches as follows: Tennis serve 1, 90 sec of break, The star, 90 sec of break, Volley-smash, 90 sec of break, The box, 90 sec of break, Tennis serve 2, 90 sec of break, The X, 90 sec of break, Suicide, 90 sec of break, Tennis serve 3. The star, The box, The X and Suicide drills consisted of six repetitions of 30 seconds of exercise and 15 seconds of rest. The Volley-smash drill consisted of six repetitions of 30 seconds of exercise and 30 seconds of rest. Between strokes, players were instructed to return to the center mark.

5. Measurements

i. Assessment of neuromuscular function

During all measurements, participants were seated on an isokinetic dynamometer (Con-Trex, CMV AG, Dübendorf, Switzerland), fastened in by means of adjustable straps across the chest and pelvis and having the distal dominant leg fixed to the dynamometer lever arm with the knee and ankle angles set at 90 ° (0° = full extension). The torque signal from the isokinetic dynamometer and surface electromyography (EMG) activity were synchronized and recorded at 2000 Hz using an analog-to digital converter designed by our laboratory (Custom DT, INSEP, Paris, France). Mechanical data and EMG activity were analyzed using custom-written scripts (Origin 9.1, OriginLab corporation, USA). Before all testing, participants performed a standardized warm-up with ten 5-s isometric MVCs of the knee extensors at about 50% of MVC peak torque. Neuromuscular testing procedures consisted of two MVCs performed without electrical stimulation followed by three trials of electrically-evoked contractions (Figure 2). Participants were strongly encouraged, and a visual representation of the exerted torque was displayed on a screen placed in front of them.

ii. Maximal Voluntary Contraction Peak Torque

Participants performed two 5-s MVCs of the knee extensor muscles separated by 1 min rest periods. Torque signal was corrected for gravity and low-pass filtered at 20 Hz using a third-order Butterworth filter. The highest peak torque value achieved over the two trials was considered as the peak knee extensor torque.

iii. Electrically Evoked Contractions

Electrically-evoked quadriceps contractions were elicited using a high-voltage stimulator (DS7AH, Digitimer, Hertfordshire, UK) that delivered rectangular pulses of 200 µs duration with maximal voltage of 400 V. The anode (5 × 13 cm; Schwa-medico,

France) was located on the gluteal fold. At the beginning of the experiment, a motor-point pen (Compex, France) was used to find the optimal site of stimulation in the femoral triangle. Then, the self-adhesive cathode (10 mm diameter, Micromed, France) was placed on the skin and the skin marked with a permanent marker to standardize the stimulation site. The stimulation intensity required to evoke a maximal isometric twitch was determined by gradually increasing the intensity (10 mA at each step) until no further increases of torque (plateau) and M-wave amplitude were achieved. Then, a supramaximal intensity stimulus (120% of maximal intensity) was delivered to secure supramaximal stimulus during electrically evoked contractions. The intensity of stimulation ranged between 60 to 160 mA. Three trials were performed, separated by 30-s rest periods as detailed in Figure 3. The average values across trials were determined for further analysis.

The following parameters were determined from mechanical responses elicited by electrically evoked contractions (Figure 3): (i) Db100, high frequency doublet peak torque induced by 100-Hz paired stimuli (10 ms interval); (ii) Db10, low frequency doublet peak torque induced by 10-Hz paired stimuli (100 ms interval); and (iii) $Db10.Db100^{-1}$, the high to low frequency torque ratio.

Voluntary activation was determined according to the following formula (29):

$$VA = (1 - \frac{superimposed\ MVC\ Db100}{Db100}) \times 100$$

iv. EMG

Surface EMG activity was recorded from the *vastus lateralis* muscle (VL) during voluntary and electrically-evoked contractions using a pair of Ag/AgCl self-adhesive electrodes (recording zone area: 520 mm^2; inter-electrode distance: 20 mm; Blue sensor N-00-S,

Ambu, Copenhagen, Denmark). Participant skin was carefully shaved, abraded and cleaned with alcohol before positioning electrodes with respect to the underlying muscle fiber arrangement, consistent with the Surface EMG for the Non-Invasive Assessment of Muscles (SENIAM) project's recommendations; the reference electrode was placed over the patella. Electrode positions were marked with permanent marker to ensure standardized recordings throughout the study. Raw EMG signals were pre-amplified (input impedance: 10 GΩ; CMRR: 100dB; bandwidth: 6-500 Hz; gain: 1000; Mazet Electronique Model, Electronique du Mazet, Mazet Saint-Voy, France) and band-pass filtered (10-400 Hz, zero lag 3rd order Butterworth filter).

From the EMG response during evoked contractions, the following parameters were determined: (i) the peak-to-peak M-wave amplitude (PPA) induced by a single stimulation, (ii) the maximal root mean square (RMS) value of the EMG signal calculated over a moving window of 250 ms during the MVC before the superimposed Db100, and (iii) the RMS as normalized to the PPA (RMS_{max})

6. Creatine kinase activity

A lancing device (Accu-Chek® Safe-T Pro Plus, Roche, France) allowed the careful sampling of 32 µL blood from a fingertip capillary of each player. The blood sample was then placed on a measurement strip and analyzed by a Reflotron Plus system according to the manufacturer's recommendations (Roche Diagnostics, Basel, Switzerland).

7. Perceptual measures

i. RPE

Ratings of perceived exertion (RPE) were collected immediately after tennis matches and before neuromuscular function tests. Players responded to the question "How did

you perceive your exertion during the tennis match?" on a ten-point category-ratio scale (30).

ii. Psychometric questionnaire

Every day, before all measurements, players were asked to rate perceived muscle soreness on a 0-10 cm visual analog scale (0.1-cm accuracy) by only one investigator to minimize bias. Muscle soreness was thereafter evaluated after each tennis match and before neuromuscular function tests. Each participant was blinded to the results of other participants.

8. Tennis Specific Performances

For each ball stroked by the player, ball velocity (BV) and ball accuracy (BA) were recorded. The velocity of each ball ($km.h^{-1}$) was measured and recorded directly with the PlaySight® system (PlaySight Interactive, Ltd., Kokhav Ya'ir, Israel). Throughout each match, a dedicated investigator recorded each of the balls that landed in the target zone (labelled as "accurate") and any groundstroke errors (outside the tennis court). At the end of the protocol, all videos recorded by the PlaySight system were visualized to double-check reported data. Technical performance index (TP) was calculated for each repetition of the five tennis drills the as the product of accuracy and velocity of the ball (28). The PlaySight system did not allow accurate recording of ball velocity during the Volley-smash drill. Consequently, the means of each of the other four drills (The star, The box, The X, Suicide) were averaged over days, conditions and participants.

9. Statistical Analysis

Data from one participant were discarded for all parameters due to a significant level of fatigue having been induced by previous training before each condition despite the

aforementioned recommendations and the specifications of inclusion criteria. Data are presented as mean ± standard deviation. Normality of distribution was checked using the Shapiro-Wilk test. MVC peak torque, CK activity, PPA, RPE, Db10 and RMS were found to be normally distributed while muscle soreness, VA, RMS_{max}, Db100, $Db10.Db100^{-1}$, TP, ball accuracy and groundstroke errors were not normally distributed. For normal data, main baseline parameters (MVC peak torque, CK activity, muscle soreness) were evaluated with a one-way (recovery) within-participant, general linear model ANOVA. Non-parametric baseline data were evaluated using a one-way within-participant Friedman test.

i. Fatigue induced by a tennis match (Day 1)

When data met normality assumptions, the potential effect of tennis matches (PRE-POST exercise) on Day 1 was evaluated with a two-way (time [PRE, POST] × recovery [WBC, CWI, CON]) general linear model ANOVA. For non-parametric data, a Wilcoxon test was performed to evaluate the effect of tennis matches and a Friedman test was used to assess the effect of recovery interventions on post-exercise measurements.

ii. Daily pre-match values

Comparisons between pre-exercise values (Baseline, Day 2, Day 3, Day 4) were analyzed using a two-way (time × recovery [WBC, CWI, CON]) within-participant general linear model ANOVA. For non-normal data, a Friedman test assessed the effect of time and, if an effect was observed, was followed by another Friedman test to investigate between-group difference.

Where Mauchly's assumption of sphericity was violated, Greenhouse–Geisser and Huynh-Feldt corrections were used. If a main effect was observed with a Friedman test,

post-hoc analyses with Bonferroni corrections were performed. Non-parametric tests and general linear model ANOVAs were analyzed using IBM SPSS Statistics version 25 (IBM, Somers, NY).

4. Results

There were no significant differences between recovery groups at baseline (p>0.23) for the following parameters: MVC, peak torque CK activity, muscle soreness, VA, RMS, PPA, RMS_{max}, Db10, Db100 and $Db10.Db100^{-1}$. No significant differences between recovery groups were observed on Day 1 (p>0.05) for tennis-specific performance (TP, accuracy and groundstroke errors).

1. Physiological and neuromuscular fatigues induce by a tennis match (Day 1)

Tennis matches induced RPE scores of 7 ± 2, with no main effect of recovery (p=0.638). For both MVC peak torque and CK activity, a main effect of time (p=0.001) was observed as a result of exercise (Post 1 vs Baseline); the MVC peak torque decreased by 7.7 ± 11.3% and CK activity increased from 161.0 ± 100.2 UA L^{-1} to 226.0 ± 106.7 UA L^{-1}. In the recovery context, the same two metrics exhibited neither a main effect of recovery (p=0.317 and p=0.701, respectively) nor a time × recovery interaction effect (p=0.307 and p=0.347, respectively). For VA, a main effect of time was observed as a result of tennis matches; in the CWI, WBC, and PAS groups, VA significantly decreased by 5.2 ± 6.5%, 7.9 ± 6.6% and 8.0 ± 9.0%, respectively. No between-groups differences were observed at Post 1 (p=0.529) (Table 2). Regarding mechanical response parameters, we found a main effect of time (p=0.007) for Db10, which decreased by 24.8 ± 16.2% but evidenced neither a main effect of recovery (p=0.698) nor a time × recovery interaction (p=0.226). Meanwhile, Db100 significantly decreased by 12.6 ± 12.3% (p=0.016), 14.4 ± 9.1% (p=0.003), and 14.8

± 12.5% (p=0.003) respectively in the CWI, WBC, and PAS groups, with no significant differences observed between recovery groups (p=0.695). Likewise, Db10.Db100^{-1} also decreased in all three groups (CWI p=0.033, WBC p=0.026, PAS p=0.005) with no significant differences between groups (p=0.234).

2. Daily Pre-Match values

MVC peak torque. No significant effect of time (p=0.052) or time × recovery interaction (p=0.329) were obtained from MVC peak torque values, and no differences in the pre-match values on Day 2, Day 3 and Day 4 were observed in comparison with the baseline (Figure 3).

CK activity and muscle soreness A significant effect of time (p=0.016) was observed on pre-match CK activity; values were increased on Day 4 by 194.4 ± 171.2 U.L^{-1} with no interaction effect (time × recovery; p=0.470; Figure 4a). No main effect of time was observed on muscle soreness for CWI (p=0.356) and WBC (p=0.292), but a main effect was identified for PAS (p=0.005) with peak values of 1.8 ± 1.1 on Day 3 (p=0.011) and 2.7 ± 2.5 on Day 4 (p=0.002) (Figure 4b). No between-recovery group differences in muscle soreness were observed across days.

Peripheral fatigue. We found no difference between recovery groups (all p>0.05) at any time point and no time effect (p>0.05) in any group for Db10.Db100^{-1}, Db10 or Db100 (Table 2).

Centrale fatigue. VA values did not show a main time effect in any group (all p>0.05; Table 2).

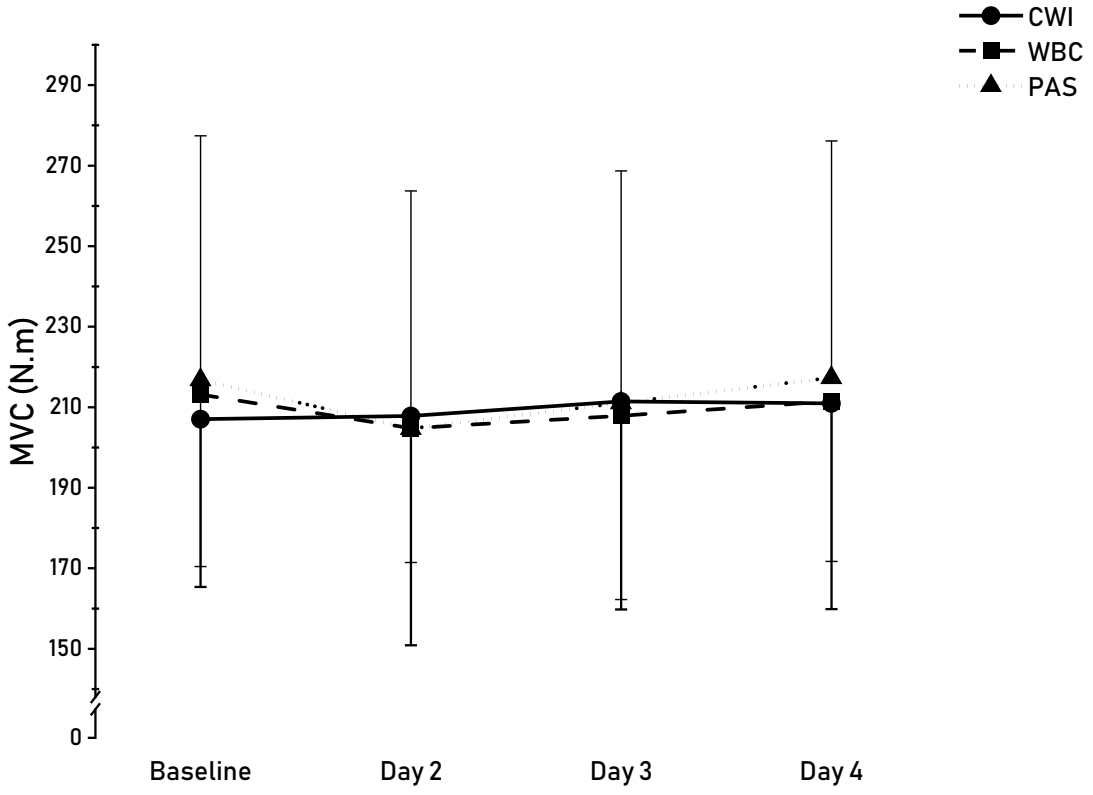


Figure 3. Changes in pre-match values of MVC torque. Mean ± SD. CWI: cold-water immersion group, WBC: whole-body cryotherapy group, PAS: passive recovery. (level of significance $p<0.05$)

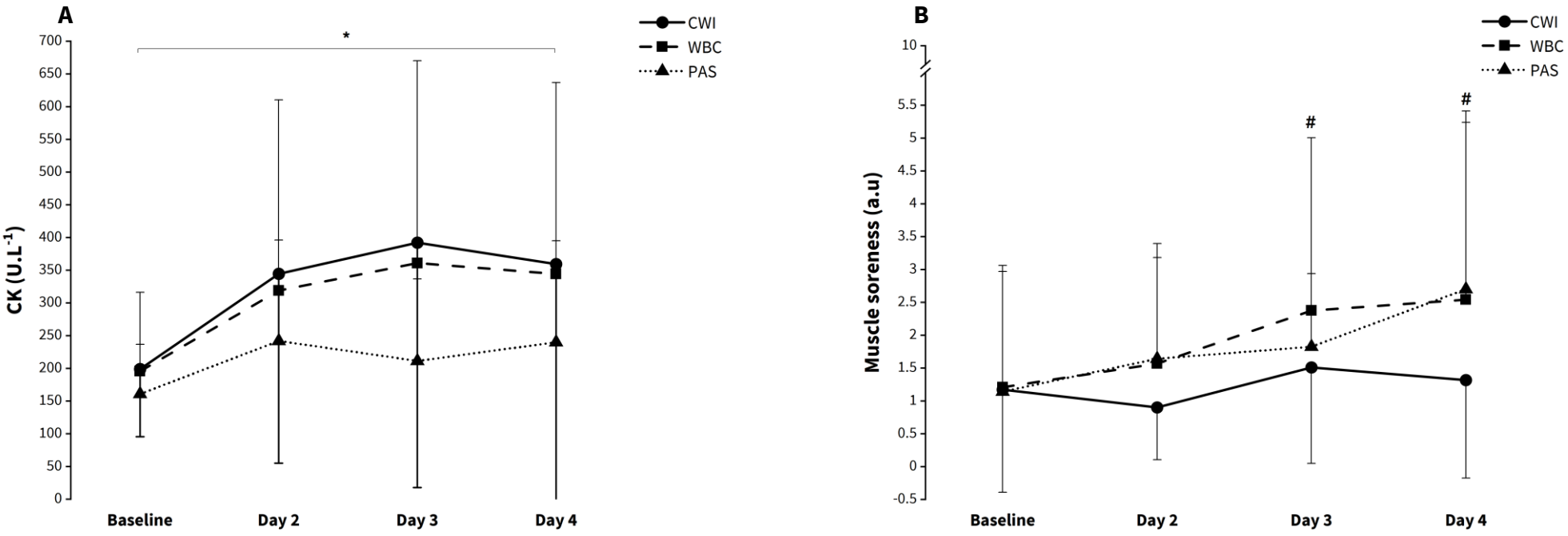


Figure 4. Changes in pre-match values of (a) creatine kinase activity and (b) muscle soreness. Data are expressed as mean ± SD. *Significant difference compared with baseline for the PAS group. *Significant time effect for CK activity, regardless of the group. # Significant difference compared with baseline for the PAS group. CWI: cold-water immersion group, WBC: whole-body cryotherapy group, PAS: passive recovery. (level of significance $p<0.05$).

	Condition	Baseline	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4
Peripheral fatigue indicators						
PT10	CWI	72,50 ± 15,92	56,86 ± 17,82#	78,89 ± 22,74	77,97 ± 15,45	71,74 ± 18,62
N.m	WBC	78,74 ± 17,92	57,88 ± 15,38#	69,44 ± 20,52	76,87 ± 16,46	72,48 ± 21,75
	PAS	73,35 ± 19,51	53,53 ± 20,21#	71,33 ± 22,96	75,45 ± 22,31	73,07 ± 21,01
PT100	CWI	82,1 ± 9,7	71,7 ± 12,8#	82,9 ± 11,7	82,0 ± 11,3	82,7 ± 10,9
N.m	WBC	85,1 ± 10,0	72,9 ± 11,9#	79,8 ± 9,9	81,6 ± 9,1	79,4 ± 16,4
	PAS	82,6 ± 12,9	70,5 ± 15,7#	77,1 ± 19,4	81,0 ± 16,8	84,5 ± 15,9
Db10/Db100	CWI	0,88 ± 0,12	0,78 ± 0,12#	0,95 ± 0,19	0,95 ± 0,08	0,86 ± 0,16
au	WBC	0,92 ± 0,12	0,79 ± 0,13#	0,86 ± 0,19	0,94 ± 0,12	0,90 ± 0,11
	PAS	0,90 ± 0,17	0,74 ± 0,18#	0,91 ± 0,15	0,92 ± 0,12	0,86 ± 0,14
Central fatigue indicators						
Voluntary activation	**CWI**	91,6 ± 8,3	87,0 ± 10,6#	91,3 ± 6,4	92,9 ± 7,1	93,5 ± 6,8
%	**WBC**	89,9 ± 10,9	83,4 ± 14,4#	87,9 ± 12,6	87,9 ± 9,9	90,3 ± 10,4
	PAS	91,1 ± 12,4	84,7 ± 17,2#	90,6 ± 12,9	90,1 ± 14,0	92,2 ± 8,9
RMS/PPA	**CWI**	0,07 ± 0,03	0,06 ± 0,02[a]	0,07 ± 0,02	0,07 ± 0,03	0,06 ± 0,02
a.u	**WBC**	0,06 ± 0,03	0,05 ± 0,03[b]	0,06 ± 0,03	0,06 ± 0,02	0,06 ± 0,02
	PAS	0,07 ± 0,04	0,06 ± 0,03	0,07 ± 0,03	0,07 ± 0,03	0,07 ± 0,02
RMS	**CWI**	0,32 ± 0,09	0,24 ± 0,08#	0,31 ± 0,10	0,30 ± 0,11	0,26 ± 0,07
mV	**WBC**	0,28 ± 0,16	0,22 ± 0,10#	0,22 ± 0,09	0,24 ± 0,11	0,25 ± 0,08
	PAS	0,29 ± 0,14	0,25 ± 0,12#	0,29 ± 0,12	0,27 ± 0,12	0,29 ± 0,09
PPA	**CWI**	4,61 ± 1,72	4,43 ± 1,61#	4,69 ± 1,76	4,99 ± 1,76	4,81 ± 1,64
mV	**WBC**	4,63 ± 1,85	4,74 ± 1,87#	4,34 ± 2,00	4,49 ± 1,70	4,67 ± 2,09
	PAS	4,63 ± 1,66	4,17 ± 1,72#	4,15 ± 1,88	4,29 ± 1,76	4,39 ± 1,66

Table 2. Peripheral & central fatigue indicators; Mean ± SD. PPA: peak-to-peak M-wave amplitude; Db10: low frequency doublet peak torque induced by the 10 Hz paired stimuli; Db100: high frequency doublet peak torque induced by the 100 Hz paired stimuli Db10.Db100^{-1}: the high to low frequency torque ratio, % VA: % of the maximal voluntary activation; RMS : the Root Mean Square of the EMG; RMS.PPA^{-1}: RMS was normalized to the PPA. CWI: cold-water immersion group, WBC: whole-body cryotherapy group, PAS: passive recovery. #Significantly lower as compared with baseline value

3. Tennis-specific performance

Ball accuracy. There was an effect of time for ball accuracy level in the CWI group (p=0.040), which significantly increased by 10.6 ± 7.1% from Day 1 to Day 3 (p=0.01). In contrast, there was no effect of time for WBC (p=0.05) or PAS (p=0.545). We did not observe differences between recovery groups on Day 2 (p=0.735) or Day 3 (p=0.500).

Technical performance. An effect of time on technical performance was observed for CWI (p=0.017), with performance significantly increased by 10.6 ± 11.0% on Day 3 vs Day 1 (p=0.019). In contrast, there was no effect of time for WBC (p=0.558) or for PAS (p=0.920). There was no time-group difference on either Day 2 (p=0.920) or Day 3 (p=0.558) (Figure 5a).

Groundstroke errors. Throughout the simulated tennis matches, an effect of time on groundstroke errors was observed with CWI (p=0.002) and with WBC (p=0.046). For CWI, the number of errors (i.e. balls outside the target zones) on Day 3 significantly decreased by 12.9 ± 10.6% vs Day 1 (p=0.001) and by 5.8 ± 17.6 % vs Day 2 (p=0.001). For WBC, the number of errors on Day 2 significantly decreased by 7.8 ± 15.7% vs Day 1 (p=0.041) while on Day 3, the number of errors increased by 10.3 ± 10.4 % compared to Day 2 (p=0.001). No effect of time was obtained on groundstroke errors for PAS (p = 0.472). There were no between-recovery groups differences on either Day 2 (p=0.472) or Day 3 (p=0.472) (Figure 5b).

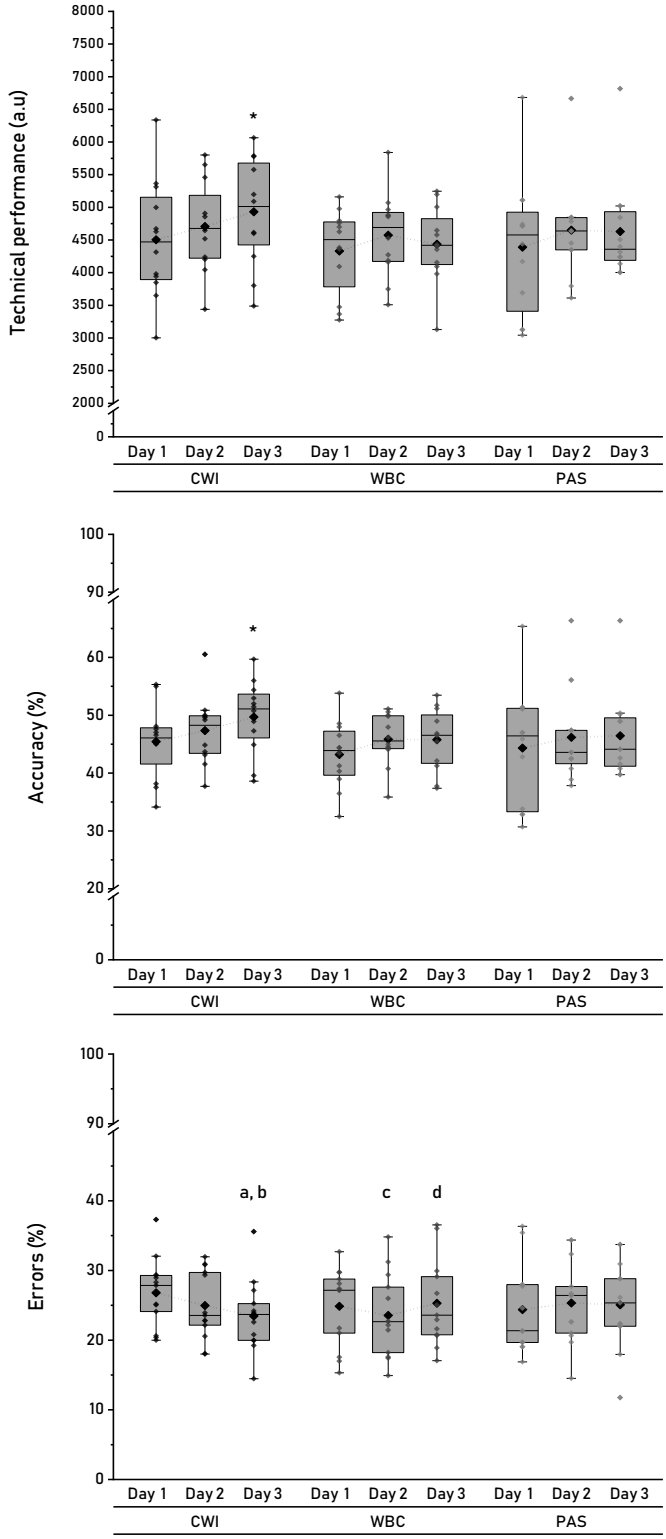


Figure 5. Changes in tennis-specific performance in terms of (a) technical performance (TP; accuracy × velocity) and (b) groundstroke errors. *Significant difference compared with Day 1 for the CWI group. a Significantly lower as compared with Day 1 for the CWI group; b significantly lower as compared with Day 2 for the CWI group; c significantly lower as compared with Day 1 for the WBC group; d significantly higher as compared with Day 2 for the WBC group. CWI: cold-water immersion group, WBC: whole-body cryotherapy group, PAS: passive recovery. (level of significance $p<0.05$).

5. Discussion

This study investigated the effects of three recovery modalities (WBC, CWI and passive recovery [PAS]) on physiological, perceptual, and functional parameters, including peripheral and central markers of accumulated fatigue and tennis-specific performance, during three consecutive days of simulated tennis matches. The consecutive days of tennis matches led to light muscle damage, but neuromuscular function and tennis-specific performance were not altered throughout the protocol. Daily application of CWI or WBC attenuated muscle soreness with no further impact on any physiological response or performance index.

During matches, the effective playing time was around 18 min, which for a 1.5-h match is in line with the 20% EPT reported in previous studies (2). This effort elicited a RPE estimated at 7 and a mean intensity of around 142 beats.min^{-1}, which are likewise consistent with previous data (27). Matches on Day 1 were observed to induce a significant decrease in knee extensor MVC peak torque (-7.7%). Although few studies have evaluated physiological and functional responses to less than 2 h of match play, the decline in force observed in the present study is consistent with the range of lower-body force loss described by Girard et al. (25) and Fabre et al. (4) after 3 h and 45 min of match play, respectively. Differences are likely due to the duration and type of protocol used and the muscle groups investigated (plantar flexor muscles) in those studies. Similarly, differences in match play duration with respect to previous studies could explain the relatively low-amplitude increase in CK activity (≈ 46 U.L^{-1}) elicited by one match in the present experiment (23, 31).

The observed torque decrement was accompanied by significant decreases in Db10.Db100^{-1}, Db100, Db10 and PPA, suggesting peripheral failure. Similar to findings from previous studies, the decrease in the Db10.Db100^{-1} ratio suggests that simulated matches altered excitation-contraction coupling (25, 32), defined as low-frequency fatigue (LFF; (26)). Stretch-shortening cycle exercises potentially trigger LFF caused by metabolic by-products factors and/or mechanical stress associated with eccentric actions (33, 34). Although no parameters assessed in the present study allowed further investigation of the cause and localization of LFF, we could reasonably speculate that excitation-contraction coupling impairment is due to muscle damage (mechanical stress) rather than metabolic perturbations as the recovery duration between match points was sufficient to limit metabolic by-product accumulation (32). This hypothesis is supported by the increase in CK activity that occurred after the match (Figure 4a).

In addition to peripheral failure, the observed decline in voluntary activation (from 91% to 85%, Table 2) demonstrated potential impairment of central neural drive following a tennis match. In line with previous studies by Girard (25, 32), which reported a tennis match-induced reduction in quadriceps muscle activity, our results suggest that tennis matches induce alterations in neural drive, which probably contributes to the observed torque loss. Our experimental method did not allow further investigation and localization of the neural input impairment. However, Girard et al. (32) proposed that exercise-induced impairments in central drive occur at the spinal level (i.e. reduced motoneuron excitability, increased presynaptic inhibition), originating from peripheral reflex inhibition via group III and IV afferents that is ultimately attributable to muscle damage. This is consistent with the observed muscle damage putatively elicited by

repeated braking actions included in the present protocol (i.e. cutting manoeuvers, postural adjustments, changes in direction and ground receptions), which are recognized to elicit eccentric contractions of the lower-limb extensor muscles (32, 35). The observed decrease in MVC peak torque concomitant with both peripheral and central activation failure and a rather small but significant elevation of CK activity can confidently be considered to reflect light induced muscle damage. These observations are also consistent with the fatigue after tennis practice reported in the literature (31).

Tennis-specific performance as assessed through accuracy, groundstroke errors and technical performance was not affected by the three days of tennis matches (Figure 5). These results contrast with (22), which reported a decrease in service stroke velocity, and (23), which reported decrements in service accuracy and movement patterns (EPT, work-to-rest ratio). The shorter duration of the present tennis matches, where the above-mentioned studies used matches of 2-4 h, could potentially explain these discrepancies (24, 27). We also observed a cross-day trend toward increased accuracy and technical performance and decreased groundstroke errors. It could be argued that players became accustomed to the repeated and identical exercises over the course of the protocol and anticipated their movement patterns.

Regarding the associated markers of fatigue, an overall increase in CK activity was evident throughout the three days of the protocol. However, no differences were found between matches, and the magnitude of the CK activity increase was rather small (Day 4: +314 $U.L^{-1}$ vs Baseline) and substantially lower than that reported by Ojala and Hakkinen after three consecutive 2-h matches (23). The small increase of CK activity is in line with the slight but significant progressive increase in muscle soreness observed

in the passive condition over consecutive matches, and also with the daily recovery of MVC torque, for which values returned to baseline at Pre 2, Pre 3 and Pre 4 (Figure 3, Figure 4). Similarly, the acute decreases in peripheral and central drive observed in Day 1 were recovered on Day 2 and not exacerbated on subsequent days (Table 2) (36). The muscle damage highlighted by increased CK activity and muscle soreness was probably too light to translate into neuromuscular function markers (i.e. VA, Db10, Db100, Db10.Db100^{-1}) and subsequent functional parameters (MVC peak torque).

The daily status of tennis players observed in this study differed from the findings of Ojala & Hakkinen (23) and Gescheit et al. (22), who reported decreased physical capacities (MVC force, maximal and explosive force) and concomitant altered tennis-specific performance (i.e., locomotor movement patterns, stroke play characteristics). We could speculate that the three consecutive matches induced low-amplitude muscle damage and neuromuscular impairments that did not trigger any substantial alterations in tennis-specific performance (22, 23). These discrepancies are also likely attributable to the duration and type of protocol used, as Girard et al. (1) recently reported that under a similar protocol (20 min of EPT), physical capabilities (i.e. sprint abilities and explosive power) were restored to pre-match baseline 24 h into recovery.

Regarding recovery modalities, WBC and CWI similarly attenuated muscle soreness throughout the consecutive days of the experiment with no differences between the modalities (Figure 4b). Although the observed analgesic effect of CWI is consistent with previous studies (10, 14, 16), the present work is the first to demonstrate a similar result with WBC in practical settings (37). Both CWI and WBC have been proposed to limit inflammation, edema and the appearance of blood markers of muscle damage through

cold-induced vasoconstriction, likely reducing delayed onset muscle soreness (7, 19, 38). However, only a few studies have reported reduced muscle soreness or attenuation of CK after WBC exposure (11, 17, 18). Neither CWI nor WBC were effective at attenuating the efflux of CK over the three consecutive days of tennis matches. These results are not surprising as the efficiency of cold modalities in limiting exercise-induced muscle damage and associated blood markers is still widely debated (15, 38, 39). Mawhinney et al. (19) recently demonstrated a reduction in muscle blood flow after CWI and WBC exposure, which could aid in attenuating inflammation and edema, thus resulting in reduced delayed muscle soreness.

Based on the additional effect of hydrostatic pressure and the greater thermal conductivity of water, CWI was expected to lead to a larger decrease in muscle temperature (19) and to attenuate muscle soreness to a greater extent than WBC (40). Contrary to Abaidia et al. (11), who recently reported lower muscle soreness with CWI compared with WBC at 24-48 h after hamstring eccentric contractions, we did not observe any significant differences between the cold modalities. This may originate from the tennis matches producing less muscle damage and secondary inflammation relative to the high-intensity eccentric protocol used in the above-mentioned study (9, 11).

In addition to physiological mechanisms, the role of the placebo effect is well-documented as a means for WBC and CWI to enhance recovery through psychological mechanisms (i.e. improved perception of recovery, decreased muscle soreness and fatigue) (20, 41). Such alternative mechanisms should be considered given that muscle pain has been shown to reduce force-generating capacity in the absence of muscle

damage (42). We could speculate that the greater decreases in groundstroke errors observed with CWI and WBC (Figure 5) could be related to the modalities' positive effects on muscle soreness (43). Cook and Beaven (44) recently demonstrated that perception of the effectiveness of CWI was correlated with subsequent performance. This suggests that perceived recovery should be considered when assessing the efficiency of recovery strategies, especially with athletes (45). However, reduced muscle soreness is not necessarily associated with improved technical performance. Equivocal findings have been reported on the efficiency of CWI recovery techniques at attenuating manifestations of fatigue and limiting performance decrements over consecutive days of exercise (14, 18, 46-48). As functional parameters (MVC peak torque) and central and peripheral neuromuscular fatigue in this study were fully recovered by the day following a match, we unfortunately could not further investigate this question.

6. Limitations

Pilot studies allowed the design of simulated tennis matches that induce load and fatigue similar to a real 1.5-h tennis match. To compare recovery interventions, the tennis-induced fatigue was standardized, with matches reproducing the same load between days and participants throughout the protocol. Consequently, participants probably became accustomed to the repeated standardized exercises, leading to a protective effect over matches that reduced later fatigue and muscle damage relative to what would be induced in real match conditions. Moreover, it is likely that factors such as one's opponent, environmental conditions and mental exertion could influence external and internal load and the manifestations of fatigue. Nevertheless, no methods have been developed to standardize these factors in tennis practice.

7. Conclusion

The present study showed that in well-trained tennis players, a 1.5-h simulated tennis match leads to light muscle damage and neuromuscular function alterations without decline in specific and non-specific performance. These impairments were completely recovered within 24 h and were not exacerbated by consecutive matches. This suggests that repeated CWI and WBC do not provide the additional benefits expected from cumulative effects over time. Meanwhile, muscle soreness subsequent to successive matches was equally attenuated by CWI and WBC recovery techniques. This outcome should be considered in training and recovery periodization particularly for high-level athletes, given the potential impact of perceived sensation and fatigue on performance (49, 50).

8. Acknowledgments

The authors would like to acknowledge participants for their generous involvement in this study. All authors read and approved the manuscript. M. Poignard received a PhD scholarship (CIFRE contract no 2015/749) funded by the French Tennis Federation and the French Agency of Research and Technology. The Laboratory Sport, Expertise and Performance is a partner of the French-speaking network ReFORM, recognized as a Research Centre for the Prevention of Injury and Illness and the Protection of Athletes by the Olympic Committee (IOC). As a member of the IOC Medical Research Network, ReFORM has received funding from the IOC to establish long-term research programmes on the prevention of injuries and illnesses in sport for the protection of athlete health. No potential conflict of interest was reported by the authors. These results are presented honestly, and without fabrication, or inappropriate data manipulation. The

results of the present study do not constitute endorsement by the American College of Sports Medicine.

9. References

1. Girard O, Christian RJ, Racinais S, Periard JD. Heat stress does not exacerbate tennis-induced alterations in physical performance. *Br J Sports Med*. 2014;48 Suppl 1:i39-i44.
2. Kovacs MS. Tennis physiology: training the competitive athlete. *Sports Med*. 2007;37(3):189-98.
3. Gomes RV, Moreira A, Lodo L, Nosaka K, Coutts AJ, Aoki MS. Monitoring training loads, stress, immune-endocrine responses and performance in tennis players. *Biol Sport*. 2013;30(3):173-80.
4. Fabre JB, Martin V, Gondin J, Cottin F, Grelot L. Effect of playing surface properties on neuromuscular fatigue in tennis. *Med Sci Sports Exerc*. 2012;44(11):2182-9.
5. Fleming JA, Naughton RJ, Harper LD. Investigating the Nutritional and Recovery Habits of Tennis Players. *Nutrients*. 2018;10(4).
6. Costello JT, Culligan K, Selfe J, Donnelly AE. Muscle, skin and core temperature after -110 degrees c cold air and 8 degrees c water treatment. *PLoS One*. 2012;7(11):e48190.
7. Bleakley C, McDonough S, Gardner E, Baxter GD, Hopkins JT, Davison GW. Cold-water immersion (cryotherapy) for preventing and treating muscle soreness after exercise. *Cochrane Database Syst Rev*. 2012;(2):CD008262.
8. Ascensao A, Leite M, Rebelo AN, Magalhaes S, Magalhaes J. Effects of cold water immersion on the recovery of physical performance and muscle damage following a one-off soccer match. *J Sports Sci*. 2011;29(3):217-25.
9. Pooley S, Spendiff O, Allen M, Moir HJ. Comparative efficacy of active recovery and cold water immersion as post-match recovery interventions in elite youth soccer. *J Sports Sci*. 2019:1-9.
10. Tavares F, Beaven M, Teles J et al. Effects of Chronic Cold-Water Immersion in Elite Rugby Players. *Int J Sports Physiol Perform*. 2019;14(2):156-62.
11. Abaidia AE, Lamblin J, Delecroix B et al. Recovery From Exercise-Induced Muscle Damage: Cold-Water Immersion Versus Whole-Body Cryotherapy. *Int J Sports Physiol Perform*. 2017;12(3):402-9.
12. Hausswirth C, Louis J, Bieuzen F et al. Effects of whole-body cryotherapy vs. far-infrared vs. passive modalities on recovery from exercise-induced muscle damage in highly-trained runners. *PLoS One*. 2011;6(12):e27749.
13. Leeder J, Gissane C, van Someren K, Gregson W, Howatson G. Cold water immersion and recovery from strenuous exercise: a meta-analysis. *Br J Sports Med*. 2012;46(4):233-40.
14. Rowsell GJ, Coutts AJ, Reaburn P, Hill-Haas S. Effects of cold-water immersion on physical performance between successive matches in high-performance junior male soccer players. *J Sports Sci*. 2009;27(6):565-73.

15. Montgomery PG, Pyne DB, Cox AJ, Hopkins WG, Minahan CL, Hunt PH. Muscle damage, inflammation, and recovery interventions during a 3-day basketball tournament. *European Journal of Sport Science*. 2008;8(5):241-50.
16. Duffield R, Murphy A, Kellett A, Reid M. Recovery from repeated on-court tennis sessions: combining cold-water immersion, compression, and sleep recovery interventions. *Int J Sports Physiol Perform*. 2014;9(2):273-82.
17. Russell M, Birch J, Love T et al. The Effects of a Single Whole-Body Cryotherapy Exposure on Physiological, Performance, and Perceptual Responses of Professional Academy Soccer Players After Repeated Sprint Exercise. *J Strength Cond Res*. 2017;31(2):415-21.
18. Grainger A, Comfort P, Heffernan S. No Effect of Partial-Body Cryotherapy on Restoration of Countermovement-Jump or Well-Being Performance in Elite Rugby Union Players During the Competitive Phase of the Season. *Int J Sports Physiol Perform*. 2019:1-23.
19. Mawhinney C, Low DA, Jones H, Green DJ, Costello JT, Gregson W. Cold Water Mediates Greater Reductions in Limb Blood Flow than Whole Body Cryotherapy. *Med Sci Sports Exerc*. 2017;49(6):1252-60.
20. Wilson LJ, Dimitriou L, Hills FA, Gondek MB, Cockburn E. Whole body cryotherapy, cold water immersion, or a placebo following resistance exercise: a case of mind over matter? *Eur J Appl Physiol*. 2019;119(1):135-47.
21. Ihsan M, Abbiss CR, Gregson W, Allan R. Warming to the ice bath: Don't go cool on cold water immersion just yet! *Temperature*. 2020:1-3.
22. Gescheit DT, Cormack SJ, Reid M, Duffield R. Consecutive days of prolonged tennis match play: performance, physical, and perceptual responses in trained players. *Int J Sports Physiol Perform*. 2015;10(7):913-20.
23. Ojala T, Hakkinen K. Effects of the tennis tournament on players' physical performance, hormonal responses, muscle damage and recovery. *J Sports Sci Med*. 2013;12(2):240-8.
24. Reid M, Duffield R. The development of fatigue during match-play tennis. *Br J Sports Med*. 2014;48 Suppl 1:i7-11.
25. Girard O, Lattier G, Maffiuletti NA, Micallef JP, Millet GP. Neuromuscular fatigue during a prolonged intermittent exercise: Application to tennis. *J Electromyogr Kinesiol*. 2008;18(6):1038-46.
26. Vollestad NK. Measurement of human muscle fatigue. *J Neurosci Methods*. 1997;74(2):219-27.
27. Reid M, Duffield R, Dawson B, Baker J, Crespo M. Quantification of the physiological and performance characteristics of on-court tennis drills. *Br J Sports Med*. 2008;42(2):146-51; discussion 51.
28. Brechbuhl C, Girard O, Millet GP, Schmitt L. On the Use of a Test to Exhaustion Specific to Tennis (TEST) with Ball Hitting by Elite Players. *PLoS One*. 2016;11(4):e0152389.
29. Merton PA. Voluntary strength and fatigue. *J Physiol*. 1954;123(3):553-64.
30. Foster C, Florhaug JA, Franklin J et al. A new approach to monitoring exercise training. *J Strength Cond Res*. 2001;15(1):109-15.
31. Gomes RV, Santos RC, Nosaka K, Moreira A, Miyabara EH, Aoki MS. Muscle damage after a tennis match in young players. *Biol Sport*. 2014;31(1):27-32.

32. Girard O, Racinais S, Micallef JP, Millet GP. Spinal modulations accompany peripheral fatigue during prolonged tennis playing. *Scand J Med Sci Sports*. 2011;21(3):455-64.
33. Allen DG, Lamb GD, Westerblad H. Skeletal muscle fatigue: cellular mechanisms. *Physiol Rev*. 2008;88(1):287-332.
34. Martin V, Millet GY, Lattier G, Perrod L. Effects of recovery modes after knee extensor muscles eccentric contractions. *Med Sci Sports Exerc*. 2004;36(11):1907-15.
35. Gandevia SC. Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiol Rev*. 2001;81(4):1725-89.
36. Periard JD, Girard O, Racinais S. Neuromuscular adjustments of the knee extensors and plantar flexors following match-play tennis in the heat. *Br J Sports Med*. 2014;48 Suppl 1:i45-i51.
37. Costello JT, Baker PR, Minett GM, Bieuzen F, Stewart IB, Bleakley C. Whole-body cryotherapy (extreme cold air exposure) for preventing and treating muscle soreness after exercise in adults. *Cochrane Database Syst Rev*. 2015;(9):CD010789.
38. Ihsan M, Watson G, Abbiss CR. What are the Physiological Mechanisms for Post-Exercise Cold Water Immersion in the Recovery from Prolonged Endurance and Intermittent Exercise? *Sports Med*. 2016;46(8):1095-109.
39. de Freitas VH, Ramos SP, Bara-Filho MG et al. Effect of Cold Water Immersion Performed on Successive Days on Physical Performance, Muscle Damage, and Inflammatory, Hormonal, and Oxidative Stress Markers in Volleyball Players. *J Strength Cond Res*. 2019;33(2):502-13.
40. Bleakley CM, Bieuzen F, Davison GW, Costello JT. Whole-body cryotherapy: empirical evidence and theoretical perspectives. *Open Access J Sports Med*. 2014;5:25-36.
41. Broatch JR, Petersen A, Bishop DJ. Postexercise cold water immersion benefits are not greater than the placebo effect. *Med Sci Sports Exerc*. 2014;46(11):2139-47.
42. Graven-Nielsen T, Lund H, Arendt-Nielsen L, Danneskiold-Samsøe B, Bliddal H. Inhibition of maximal voluntary contraction force by experimental muscle pain: a centrally mediated mechanism. *Muscle Nerve*. 2002;26(5):708-12.
43. Minett GM, Duffield R. Is recovery driven by central or peripheral factors? A role for the brain in recovery following intermittent-sprint exercise. *Front Physiol*. 2014;5:24.
44. Cook CJ, Beaven CM. Individual perception of recovery is related to subsequent sprint performance. *Br J Sports Med*. 2013;47(11):705-9.
45. Poignard M, Guilhem G, de Larochelambert Q, Montalvan B, Bieuzen F. The Impact of Recovery Practices Adopted by Professional Tennis Players on Fatigue Markers According to Training Type Clusters. *Frontiers in Sports and Active Living*. 2020;2.
46. Leeder JDC, Godfrey M, Gibbon D et al. Cold water immersion improves recovery of sprint speed following a simulated tournament. *Eur J Sport Sci*. 2019;19(9):1166-74.

47. Schaal K, Y LEM, Louis J et al. Whole-Body Cryostimulation Limits Overreaching in Elite Synchronized Swimmers. *Med Sci Sports Exerc*. 2015;47(7):1416-25.
48. Rupp KA, Selkow NM, Parente WR, Ingersoll CD, Weltman AL, Saliba SA. The effect of cold water immersion on 48-hour performance testing in collegiate soccer players. *J Strength Cond Res*. 2012;26(8):2043-50.
49. Marcora S. Perception of effort during exercise is independent of afferent feedback from skeletal muscles, heart, and lungs. *J Appl Physiol (1985)*. 2009;106(6):2060-2.
50. St Clair Gibson A, Baden DA, Lambert MI et al. The conscious perception of the sensation of fatigue. *Sports Med*. 2003;33(3):167-76.

Discussion Générale

L'objectif général de la thèse consistait à caractériser la fatigue induite par l'entraînement et la compétition spécifique au tennis de haut-niveau afin de pouvoir évaluer l'efficacité des techniques de récupération les plus couramment adoptées par les joueurs, en particulier l'effet de l'application de techniques de récupération par le froid sur la fatigue. Pour cela, nous avons :

a) Observé les habitudes de récupération des joueurs professionnels de tennis sur une saison au regard de la charge d'entraînement,

b) Evalué l'efficacité des stratégies de récupération sur des marqueurs perceptifs de fatigue (douleurs musculaires, fatigue perçue, stress, sommeil),

c) Testé l'effet de l'immersion en eau froide et de la cryothérapie corps entier dans un contexte de séquences de matchs simulés sur la récupération de paramètres neurophysiologiques, fonctionnels et spécifiques au tennis.

Cette approche nous a permis de démontrer :

a) Que l'utilisation des combinaisons de techniques de récupération après une journée d'entraînement parmi lesquelles les techniques de récupération par le froid étaient majoritaires,

b) Qu'un match de tennis d'1h30 induit de légers dommages musculaires associés à une fatigue centrale et périphérique recouvrée dans les 24h,

c) L'absence de fatigue accumulée lors de l'enchaînement de trois jours de matchs de tennis dans le cadre d'un protocole standardisé,

d) Le bénéfice des techniques d'immersion en eau froide et de la cryothérapie corps entier sur les douleurs musculaires.

Ici nous discuterons plus particulièrement :

a) Des variations interindividuelles de la charge induite par la pratique du tennis à haut niveau, de la fatigue résultante et de l'effet des techniques de récupération en contexte écologique de pratique,

b) Des contraintes méthodologiques associées à la caractérisation et à la simulation d'un match de tennis et des solutions disponibles pour dépasser certaines de ces limites,

c) Des mécanismes impliqués dans le développement de la fatigue au tennis pouvant contribuer à expliquer nos résultats,

d) Des habitudes de récupération majoritairement adoptées à ce jour par les joueurs de tennis de haut-niveau, comme une étape nécessaire à l'identification de leviers permettant de mieux disséminer les connaissances scientifiques pour mieux individualiser les pratiques en la matière,

e) Des effets bénéfiques de la cryothérapie corps entier et de l'immersion en eau froide sur les sensations de douleurs musculaires,

f) Des mécanismes psychophysiologiques associés à l'efficacité de l'immersion en eau froide et de la cryothérapie corps entier qui peuvent potentiellement influencer/atténuer les sensations de douleurs musculaires, sans avoir de conséquences significatives sur les paramètres fonctionnels et les performances spécifiques.

1. Variations interindividuelles de la charge, de la fatigue et de l'effet des techniques de récupération

Alors que l'utilisation des stratégies de récupération permettrait une récupération plus rapide augmentant la qualité des entraînements suivants (voir Chapitre 1, Figure 7), l'action non contrôlée d'une technique de récupération peut également limiter ces adaptations et avoir un effet délétère sur la performance à long terme (Mujika et al. 2018) (Roberts et al. 2015) (Peake et al. 2017). Comprendre la fatigue induite au regard du contenu d'entraînement et de la charge lors de périodes d'entraînement permettrait d'utiliser de manière contrôlée les stratégies de récupération. Le chapitre 2 de ce manuscrit met en évidence une littérature limitée sur ce sujet. Les données disponibles sont principalement issues d'études évaluant la charge induite par des exercices spécifiques couramment utilisés lors d'entraînements au tennis, (Reid et al. 2008) de protocoles évaluant l'efficacité d'un entraînement sur le développement de qualités

physiques (Fernandez-Fernandez et al. 2015a) et/ou des études incluant une population d'étude de joueurs de tennis junior (Murphy et al. 2016) (Murphy et al. 2015a). À notre connaissance, aucune étude n'a évalué l'impact du stress de l'entraînement sur le développement de la fatigue de joueurs de tennis élites. Cette analyse de la charge et de la fatigue, indispensable si l'on souhaite proposer des stratégies de récupération adaptées, a constitué la première étape de l'étude 1 de ces travaux de thèse. Le tennis ne dispose à ce jour d'aucun indice de quantification validé de la charge externe et applicable à un contexte de pratique, notamment en raison du caractère composite des sollicitations rencontrées lors de la pratique. Aussi, la méthode d'évaluation de la charge interne par la sRPE a été choisie, celle-ci étant adaptée à des mesures quotidiennes chez une population de joueurs professionnels, et ce, quel que soit le type d'entraînement effectué. Dans un premier temps, l'ensemble des questionnaires récoltés (Méthodologie expérimentale) rend compte de la variabilité dans les types mais également dans la fréquence des séances effectuées par les joueurs d'une période d'entraînement (Figure 18, Figure 32). Au travers d'un score de sRPE totale, la charge était appréhendée globalement au regard du contenu d'une journée d'entraînement. Nos résultats montrent que la moyenne de la sRPE totale augmente, proportionnellement au nombre d'entraînements effectués dans une journée. Cependant, une large variabilité de cet indicateur est observée, pour un même nombre d'entraînements quotidiens, mais également au sein d'une catégorie incluant des séances d'entraînement similaires. Malgré la restriction de la collecte des données à 91% lors de périodes foncières et à 9% lors de périodes pré-compétitives, nous avons constaté que ces périodes incluent des contenus d'entraînement très variés, nécessaires aux développements de qualités aussi bien physiques, technico-tactiques que mentales. Les réponses psychophysiologiques à cette charge mixte sont spécifiques du mode, de l'intensité et de la durée de l'exercice, probablement à l'origine de cette variabilité (Viru and Viru 2000) (Skorski et al. 2019a) (Impellizzeri et al. 2019). Celles-ci sont également influencées par des caractéristiques individuelles comme le genre, l'âge, les capacité physiques ou encore le niveau d'expertise (Haddad et al. 2017). Fort de ces constats, et dans l'objectif de caractériser la fatigue pour un type d'entraînement donné, une classification hiérarchique par composante principale a été

effectuée, afin d'homogénéiser et regrouper les contenus d'entraînement. Cette analyse a permis d'identifier trois « clusters » basés sur les ressemblances entre les variables correspondant au type, à la durée ainsi que la charge d'entraînement associée (Figure 2).

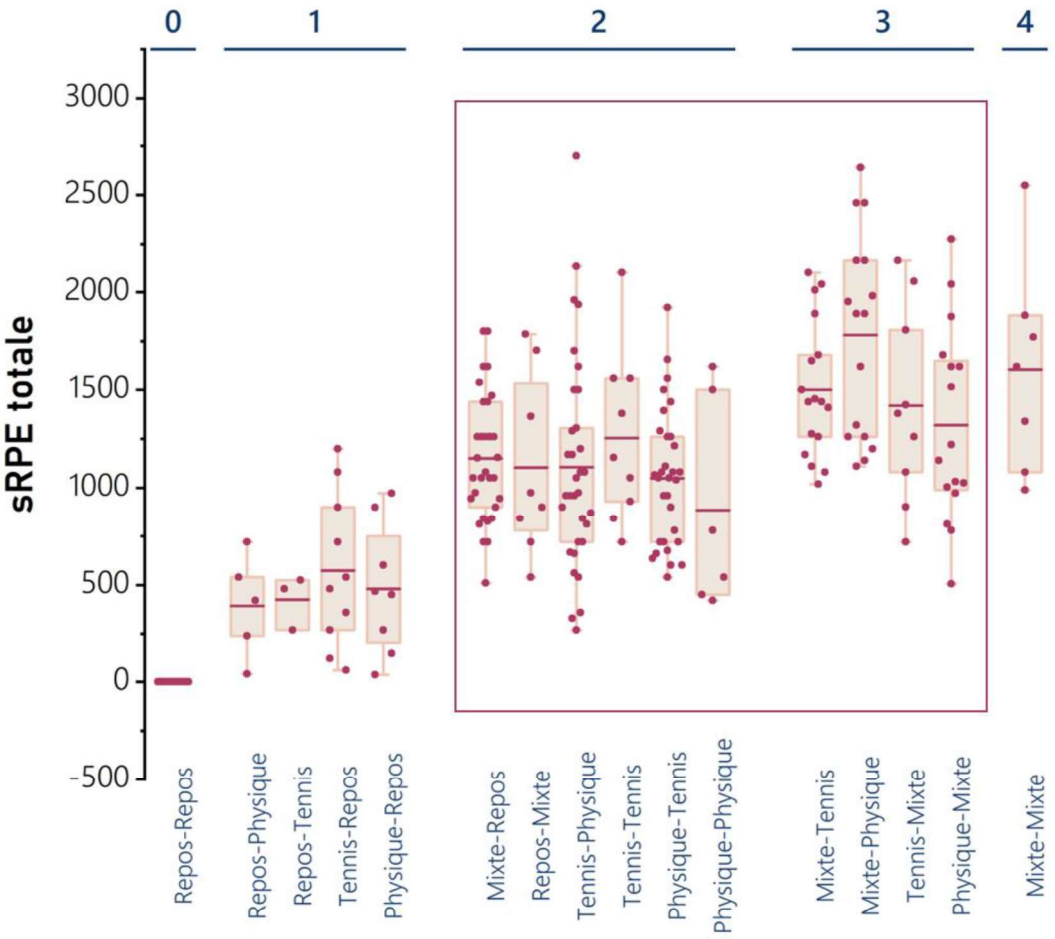


Figure 32. Charge d'entraînement associées aux sessions d'entraînement de l'étude 1

Une des hypothèses de l'étude 1, reposait sur de potentiels liens entre l'efficacité des techniques de récupération et la fatigue induite par des contenus spécifiques d'entraînement. Dans ce contexte, il est particulièrement important de souligner l'adéquation des clusters formés avec les recommandations de planification et contenus de l'entraînement proposés par la Fédération Française de Tennis. Le cluster 1, représentant la majorité des questionnaires enregistrés (n=97), est similaire à un cycle « préparatoire mixte physique/tennis ». Le cluster 2 (n=18) se rapproche d'un cycle « pré-compétitif spécifique" orienté vers le développement des capacités spécifiques au tennis. Le cluster 3 (n=31) est similaire à un cycle « pré-compétitif non-spécifique",

orienté vers le développement des capacités physiques. Les charges associées ainsi que les durées de chaque entraînement sont présentées en Figure 33.

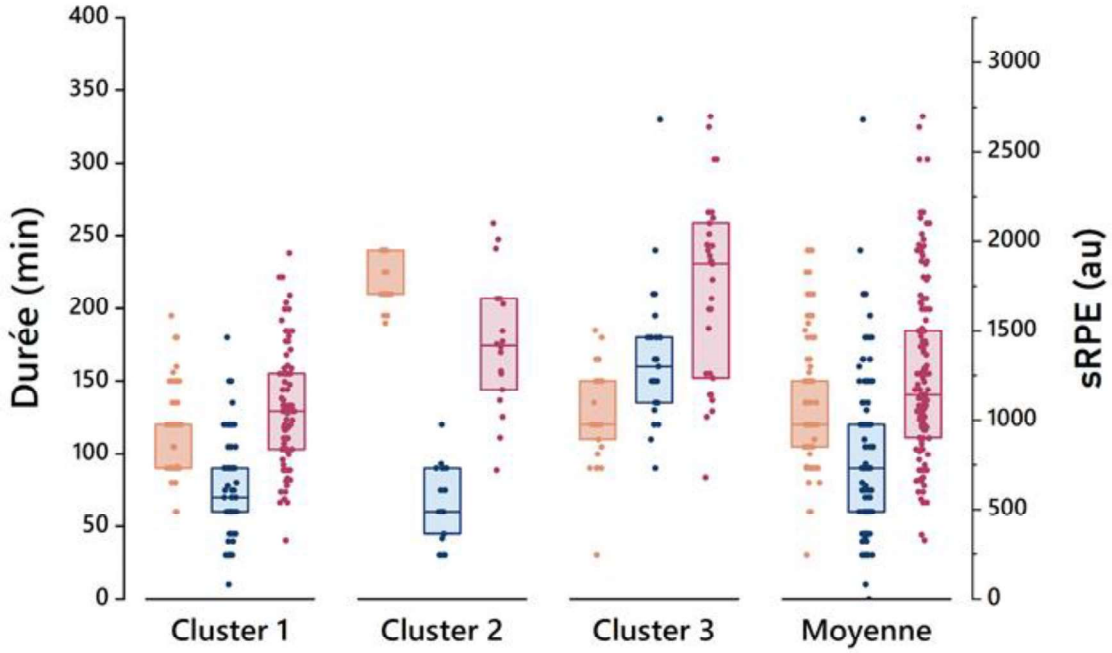


Figure 33. Charge et durée des entraînements (orange : entraînement de tennis ; bleu : entraînement physique ; rose: sRPEtotale)(Etude 1)

Quel que soit le cluster, les sensations de douleurs musculaires et de fatigue générale des joueurs n'étaient pas significativement différentes après une journée d'entraînement. La figure 33 témoigne d'une forte variabilité au sein des clusters formés sur l'ensemble des variables de sélection : sRPEtotale, durée de l'entraînement de tennis et de physique. Pour les mêmes raisons que celles évoquées précédemment (influence du mode, de l'exercice et de la durée de l'entraînement, caractéristiques individuelles), cette variabilité participe probablement à l'absence de différences significatives entre les clusters sur les sensations de douleurs musculaires, et de fatigue générale. En ce qui concerne les sensations de douleurs musculaires, ce résultat est cependant moins surprenant compte tenu du délai existant entre l'induction des dommages musculaires lors d'un exercice et la perception des douleurs musculaires, qui peut atteindre 72h après un match ou un entraînement (Ojala and Hakkinen 2013) (Paulsen et al. 2012).

Cette variabilité des réponses individuelles à la charge d'entraînement est également observée en réponse à différentes techniques de récupération utilisées par les joueurs (Figure 34).

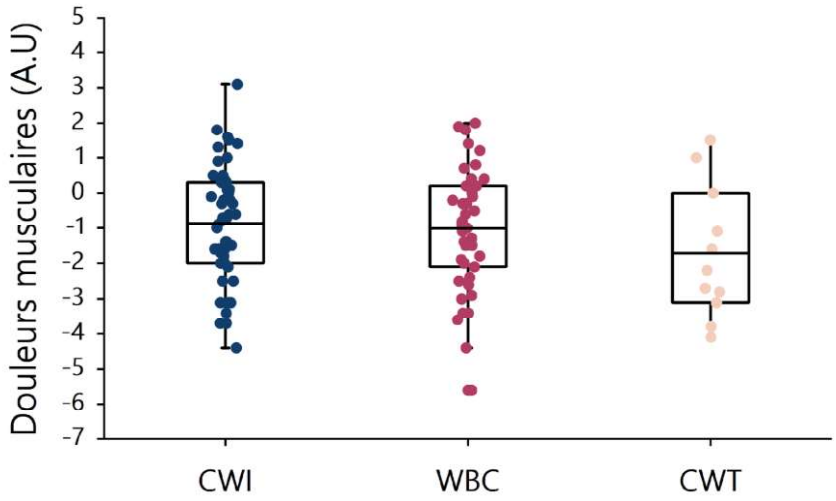


Figure 34. Comparaison de l'effet des techniques d'immersion en eau froide (CWI), cryothérapie corps entier (WBC), immersion contrastée (CWT) (Etude 1).

Alors que la nature du stress d'entraînements peut ici aussi expliquer, au moins en partie, l'hétérogénéité des douleurs musculaires rapportées, celle-ci peut aussi résulter de l'utilisation combinée d'autres techniques de récupération (e.g. Massages, électrostimulation). Certains auteurs rapportent que l'efficacité d'une technique de récupération dépend de caractéristiques individuelles propres à l'athlète notamment en ce qui concerne leur perception des effets bénéfiques de ces techniques (Sellwood et al. 2007). Il est important de noter que d'autres facteurs externes tels que le rythme circadien, la nutrition, l'hydratation, ou les conditions environnementales peuvent jouer un rôle dans la réponse individuelle à l'entraînement et la fatigue associée (Mann et al. 2014).

Enfin, la figure 35 démontre que l'indice de sRPE ne permet pas à lui seul d'expliquer les variations des douleurs musculaires et de fatigue perçue rapportés dans l'étude 1. Il semble alors nécessaire de développer et d'utiliser des indicateurs spécifiques à la discipline permettant de considérer l'ensemble des facteurs psychophysiologiques influençant la fatigue. Par exemple, des marqueurs de charge externe (e.g.

accéléromètres, GPS), permettant de caractériser les mouvements spécifiques de la discipline, ont aussi été associés aux variations de douleurs musculaires (Drew and Finch 2016) (Haddad et al. 2014).

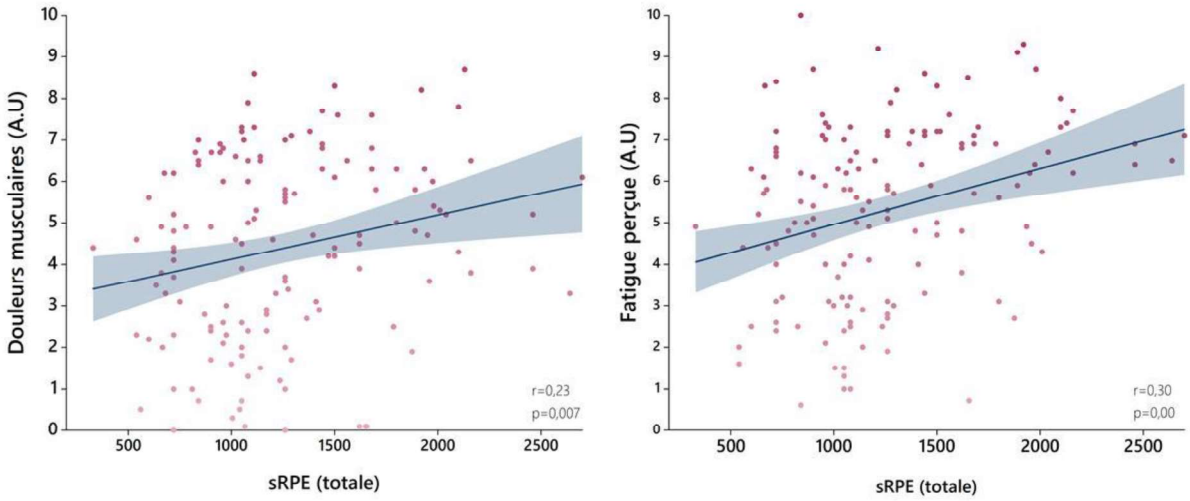


Figure 35. Corrélations entre la sRPEtotale et les sensations de douleurs musculaires (gauche) et la fatigue perçue (après entraînement et avant la récupération)(Etude 1)

Points clefs

- Comme la plupart des disciplines, l'activité tennis est soumise à diverses sources de variabilité rendant complexe l'étude de la relation entre la charge, la fatigue et la récupération.
- Les périodes foncières et pré-compétitives au tennis sont associées à des charges d'entraînement importantes. Cela nécessite d'analyser la charge et la fatigue à une échelle multidimensionnelle (physiologique, psychologique, émotionnel) (Kellmann et al. 2018).

Perspectives

- Il apparaît intéressant de développer l'usage de marqueurs de charge externe complémentaires à la sRPE (e.g. sprints sur 5m, changements de direction, nombre d'accélération/décélération) en complément de questionnaires psychométriques (e.g. ARSS, REST-Q). Cela permettrait d'affiner l'estimation de la charge et la fatigue associée (Modèle charge/fatigue/récupération, voir Chapitre 1).

- L'application de méthodes statistiques basées sur les inférences bayésiennes peut également permettre d'identifier les variations significatives de la fatigue propre à chaque joueur.

2. Enjeux méthodologiques associés à la caractérisation et à la simulation d'un match de tennis

L'une des difficultés relative à l'évaluation de l'efficacité de techniques de récupération réside dans la mise en place de protocoles permettant de reproduire une fatigue similaire à celle rencontrée dans un contexte écologique de pratique. La littérature scientifique est plus fournie sur les causes potentielles de la fatigue induite par un match de tennis, notamment grâce aux analyses spécifiques de charge (logiciels de capture du mouvement, analyses vidéo non automatisées) effectuées durant les tournois officiels (Gescheit et al. 2015) (Reid and Duffield 2014) (Johnson et al. 2006) (Whiteside et al. 2017). En revanche, la littérature met également en exergue la variabilité de cette charge externe (temporelle, spatiale et gestuelle) au cours d'un match, induisant par conséquent des réponses psychophysiologiques et neuromusculaires hétérogènes. Plusieurs travaux se sont attachés à décrire ces réponses, mais ils se sont régulièrement heurtés à l'imprévisibilité d'un match et de la charge associée. Cette limite explique probablement l'absence actuelle de consensus en ce qui concerne les paramètres impliqués dans le développement de la fatigue induite par la pratique du tennis et de son intensité.

Dans l'étude 2, nous avons utilisé un protocole de simulation de match dans le but de reproduire de manière la plus fiable possible la charge induite par un match de tennis. La standardisation d'un tel protocole était d'autant plus complexe que l'objectif était également de reproduire la fatigue accumulée sur plusieurs jours consécutifs comme cela est rencontrée majoritairement dans les compétitions officielles. Jusqu'à aujourd'hui, deux types de protocoles ont été principalement utilisés dans la littérature afin de reproduire les conditions d'un match réel, afin d'étudier le développement de la fatigue (Tableau 17). Le premier type de protocole, et le plus courant, correspond à la simulation d'un match de tennis en conditions réelles, impliquant deux joueurs sur une durée limitée et déterminée en fonction de la problématique investiguée (Gescheit et

al. 2015) (Girard et al. 2014) (Ojala and Hakkinen 2013) (Fabre et al. 2012). Parmi ces derniers, les protocoles prenant en compte l'EPT semblent les plus pertinents dans une démarche de standardisation puisque l'on sait que la durée des efforts est un facteur important de variabilité des réponses physiologiques au cours d'un match de tennis (Chapitre 2) (Fernandez-Fernandez et al. 2008) (Mendez-Villanueva et al. 2010) (Mendez-Villanueva et al. 2007b). La présence de l'adversaire permet d'intégrer la dimension compétitive (opposition) et permet également aux joueurs de développer une tactique propre à cette opposition, connue pour influencer les contraintes physiologiques (Reid et al. 2013). Si ce type de protocole apparaît le plus pertinent pour évaluer l'effet d'une condition expérimentale (surface, condition environnementale, fatigue accumulée) sur les mouvements caractéristiques et les paramètres temporels, celui-ci présente certaines limites lorsque l'on veut standardiser la charge dans l'objectif de reproduire une fatigue identique. En effet, l'étude 2 visait à évaluer l'effet des techniques de récupération sur la fatigue induite par un et plusieurs matchs. Or, il est bien admis que l'origine et l'intensité de la fatigue sont largement spécifiques du mode, de la durée et de l'intensité de l'exercice effectué (Skorski et al. 2019a). Dans ce contexte, la priorité était de standardiser au maximum la charge induisant la/les fatigue(s) sur lesquelles les techniques de récupération par le froid ont été démontrées efficaces (Chapitre 1, Chapitre 4). La phase de décélération d'un service ou d'une frappe et la phase de freinage lors des courses et changements de direction sont associées à des cycles étirement-détente, effectués à haute intensité et à vitesse élevée, à l'origine de dommages musculaires (Gomes et al. 2014) (Ojala and Hakkinen 2013). Dans ce cas de figure, un protocole standardisant le nombre de frappes ainsi que les mouvements spécifiques tout en contrôlant les caractéristiques temporelles semblait plus adapté à nos objectifs expérimentaux. La durée des exercices inclus dans le protocole a été adaptée et standardisée en fonction du temps de jeu effectif rapporté dans la littérature pour un match d'1h30 (20% EPT). Le ratio effort/récupération (1 :1,9) concorde avec ce qui est rapporté dans la littérature (≈1 :2) (Martin 2018), avec un nombre moyen de frappes par seconde de 0,4. s^{-1}, inférieur à ce qui est rapporté chez des joueurs professionnels lors de compétitions officielles (0,9 frappe. s^{-1}) (Martin 2018). La durée des points n'a pas pu être standardisée en raison des contraintes organisationnelles

souvent rencontrées dans le cadre de protocoles chroniques. Cependant, l'influence de cette caractéristique temporelle étant plutôt dans l'installation d'une fatigue d'origine métabolique (Mendez-Villanueva et al. 2010) (Ferrauti et al. 2001a), cela n'a pas constitué un biais méthodologique important compte tenu des hypothèses émises quant à l'efficacité des techniques de récupération par le froid. Enfin, comme rapporté dans l'étude de Reid et al. (2008), le protocole fatiguant a induit des réponses psychophysiologiques similaires à celles rencontrées lors de matchs de tennis officiels (RPE : 7, FCmoyenne : 142,7 bpm ; %Fcmax : 77%) (Chapitre 2).

	Simulation de match (Exercices spécifiques du tennis)	**Simulation de match (Règles classiques d'un match de tennis)**
AVANTAGES	. Standardisation de la charge externe (spatiale, temporelle [EPT]), gestuelle (nombre de frappes/min) . Standardisation de la charge physiologique	. Standardisation (limitée) de la charge externe temporelle (EPT, durée totale) . Pression de l'adversaire, mise en place tactique . Evaluation l'effet d'une condition expérimentale sur les caractéristiques temporelles (EPT, Ratio effort/récupération) et spatiales (mouvements spécifiques associés à la fatigue)
INCONVENIENTS	. Habituation des joueurs aux mouvements spécifiques inclus dans les exercices . Machine à balles : impossibilité de mise en place d'une tactique de jeu . Impossibilité d'évaluation de l'effet de la fatigue sur les caractéristiques temporelles et spatiales	. Charge externe (spatiale, gestuelle), temporelle (intermittence des efforts) et charge physiologique non standardisées
	Facteurs difficiles à standardiser	
	. Pression de l'objectif de performance . Pression mentale . Charge imposée par l'adversaire (style de jeu)	

Tableau 17. Comparaison des différents protocoles de simulation de match de tennis utilisés dans la littérature

Si la fatigue caractérisée ci-dessus a été similaire et reproductible au cours des trois jours de protocole, il convient cependant de souligner les inconvénients associés à ce type de protocole avant d'interpréter la fatigue induite et l'efficacité des techniques de récupération. Contrairement à une simulation basée sur les règles classiques d'un match, les mouvements et frappes associés aux exercices étaient volontairement similaires d'un jour et d'une condition à l'autre. Il est alors fort probable que les joueurs aient pu s'habituer progressivement aux exercices et anticiper les mouvements/déplacements. D'autres facteurs propres à la discipline, connus pour influencer le développement et l'intensité de la fatigue comme la pression liée à l'objectif de performance (particulièrement pour une population élite), la fatigue mentale ou encore la charge imposée par l'adversaire sont impossibles à standardiser dans un contexte expérimental.

Points-clefs :

- En raison des contraintes propres au tennis (e.g. imprévisibilité de la durée d'un match, style de jeu de l'adversaire) il est difficile de reproduire la charge associée à un match réel.
- Le protocole utilisé dans le cadre de l'étude 2 semble reproduit les contraintes physiologiques associées à un match de tennis, ce qui était un prérequis à l'exploration du développement de la fatigue lors d'un match de tennis.

Limites

- L'habituation des joueurs au protocole a pu induire des ajustements potentiels de l'engagement, malgré la familiarisation imposée en début de protocole.

Perspectives

- L'élaboration d'un protocole de simulation de match suivant les règles du tennis (avec opposant) pourrait permettre de quantifier la charge externe spécifique au tennis (GPS, accéléromètre) en complément d'un temps effectif de jeu contrôlé. Des modèles linéaires mixtes permettraient, a posteriori, d'étudier le développement de la fatigue en prenant en compte les variations inter-

individuelles propres à l'activité tennis (voir section précédente de la discussion).

3. Mécanismes impliqués dans le développement de la fatigue au tennis

L'étude 2 rapporte qu'un match d'une durée d'1h30 (EPT : 18 min) induit une diminution significative de la force maximale volontaire des quadriceps (-7,7%) associée à une baisse de l'activation centrale et à l'installation d'une fatigue périphérique (haute et basse fréquence). L'augmentation de la concentration en créatine kinase et l'augmentation des sensations de douleurs musculaires tendraient à confirmer les hypothèses émises dans les précédentes études suggérant la présence de dommages musculaires comme étant à l'origine de la fatigue neuromusculaire centrale et périphérique observée (Girard et al. 2008; Girard et al. 2011). Cependant, la fatigue induite semble être modérée au vu des variations de l'activité de la créatine kinase (≈ 46 $U.L^{-1}$) et des sensations de douleurs musculaires rapportées par les joueurs, suggérant la présence de dommages musculaires relativement modérés (Paulsen et al. 2012) (Figure 5 de l'Étude 2).

Notre étude rapporte une récupération totale du pic de couple de force mesuré lors d'une MVC, 24 h après le premier match, ce qui est cohérent avec les résultats observés par l'équipe de Girard et al. (2014). En revanche, notre résultat diffère de ceux obtenus par Ojala et Hakkinen (Ojala and Hakkinen 2013) qui rapportent une récupération incomplète de la force maximale et du RFD atteint par les extenseurs du genou, mesurés après un match simulé de 2 h. Dans l'étude d' Ojala and Hakkinen (2013), la liberté pour chaque joueur de développer sa propre tactique a probablement impliqué des déplacements plus importants associés à de plus fortes contraintes biomécaniques et neuromusculaires comparativement au protocole de l'étude 2 (Figure 36). Cette hypothèse repose sur la présence de dommages musculaires et de sensations de douleurs musculaires plus importants, expliquant alors l'absence de récupération des paramètres fonctionnels 24 h après le premier match. Dans le cadre de l'étude 2, la force maximale étant recouvrée dans les 24 h, cela suggère que d'autres facteurs sont à

l'origine de la diminution transitoire de force observée après le match. En effet, une diminution des capacités à produire de la force perdurant au-delà de 24 h après un exercice est principalement due à la présence de dommages musculaires alors qu'une diminution transitoire peut être le résultat de l'effet combiné d'une fatigue neuromusculaire et de dommages musculaires (Doguet 2016; Paulsen et al. 2012). La diminution de l'amplitude de l'onde M (PPA) et du doublet électro-induit à 100 Hz (Db100) permet de confirmer cette hypothèse en accord avec les travaux de Girard et al. (2011), qui mettent en évidence une altération de la transmission-propagation du potentiel d'action après 3 h match (Girard et al. 2011).

Comme rapporté dans l'étude de Girard et al. (2008), nous observons une réduction de l'activation volontaire de 91% à 85% à la suite du match de tennis (Figure 36). Afin de comprendre les mécanismes impliqués dans le développement de la fatigue, le tennis est souvent comparé à d'autres disciplines intermittentes (e.g. football). Contrairement à ce qui a été observé dans l'étude de Rampinini et al. (2011), le déficit de la commande centrale induit par le match de tennis était recouvré dans les 24 h post-match. Ces différences peuvent s'expliquer par des charges excentriques supérieures, associées à des sprints de plus longues durées en football, induisant alors des dommages musculaires plus importants comparativement au tennis où le joueur frappe 80% des balles dans un périmètre de 2,5 m par rapport à sa position initiale (Gomes et al. 2014) (Kovacs 2007). Enfin, les sollicitations glycolytiques et oxydatives plus importantes au cours d'un match de football (déplétion en glycogène jusqu'à 2-3 jours) contribuent également aux différences observées sur les dommages musculaires et la fatigue neuromusculaire associée (Minett and Duffield 2014).

Nous avons observé une augmentation progressive et significative de la concentration en créatine kinase associée à une augmentation des douleurs musculaires au cours des quatre jours du protocole. Les dommages musculaires provoqués par le premier match ne semblent ainsi pas exacerbés par l'enchaînement des matchs suivants. Aussi, aucune variation significative n'est observée sur l'ensemble des paramètres fonctionnels et neuromusculaires. Cela suggère que l'enchaînement consécutif de trois jours de matchs de tennis induit de faibles dommages musculaires avec de faibles répercussions

sur les capacités neuromusculaires et fonctionnelles chez des joueurs bien entraînés. Jusqu'à aujourd'hui, les études ayant investigué le développement de la fatigue sur de tels paramètres impliquaient l'enchaînement de matchs de durée supérieure (>2 h ; voir Chapitre 3). La composante traumatique de la fatigue induite par le tennis pourrait ainsi être liée à la durée des matchs. Bien qu'une telle hypothèse nécessiterait d'être attestée, ces résultats soulèvent des pistes de compréhension des mécanismes à l'origine de la fatigue en fonction de la durée de l'effort. S'ils se confirment, ils pourraient conditionner les modalités de récupération à privilégier en fonction de la durée de match.

Aucune différence significative n'a été observée sur les paramètres de vitesse et de précision des frappes au cours des trois matchs réalisés au cours de l'étude 2. La littérature rapporte des résultats contradictoires quant aux conséquences de la fatigue sur ce type de performance. Cependant, les études rapportant ce type d'altérations utilisaient des protocoles très éloignés de ceux pouvant induire une fatigue rencontrée en condition réelle (Wu et al. 2010; Lyons et al. 2013). D'autres études plus proches d'un contexte réel de pratique, rapportant principalement une baisse de la vitesse au service, impliquaient des protocoles de durée supérieure à celle de l'étude 2 (Gescheit et al. 2015; Ojala and Hakkinen 2013). Enfin, il semblerait que la fatigue ait plutôt des conséquences sur les mouvements spécifiques et déplacements des joueurs (Gescheit et al. 2015), particulièrement chez les joueurs de tennis professionnels (Reid and Duffield 2014).

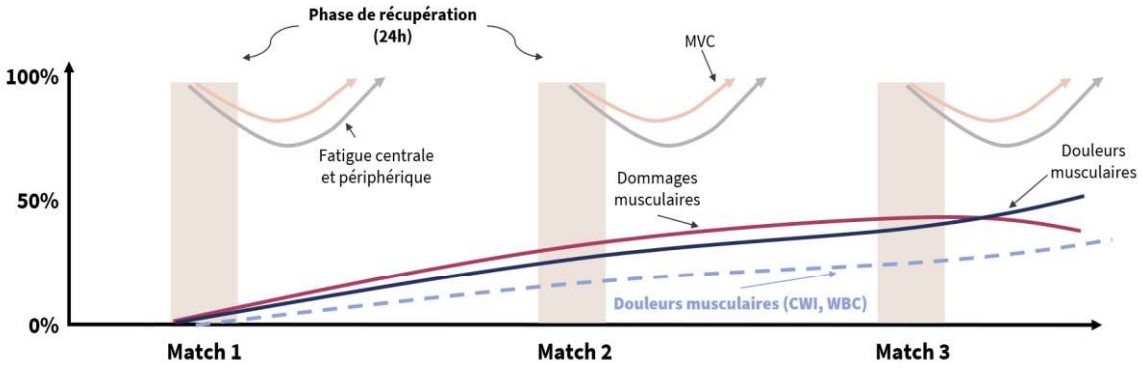


Figure 36. Cinétique de récupération des différents marqueurs (physiologique, neuromusculaire, fonctionnel} lors de trois matchs de tennis consécutifs (1h30). Adaptée à partir de (Skorski et al. 2019a)

Points clefs

- Ces données invitent à poursuivre l'utilisation d'indicateurs de performance reflétant la performance spécifique (e.g. vitesse, précision de la balle, déplacements du joueur, habileté à répéter des sprints) pour mieux appréhender les effets de la fatigue et de la récupération.

Limites

- Il est probable qu'une population élite répondent de manière spécifique à la fatigue induite par la pratique du tennis, en raison de leur niveau d'entraînement physique et tennistique (Gomes et al. 2014).
- Les stratégies d'anticipation induites par la familiarisation à l'exercice doivent être prises en considération dans l'évaluation de la composante traumatique induite par un match de tennis simulé.

Perspectives

- A l'aide d'un protocole similaire, évaluer l'effet de matchs de durée prolongée en utilisant des Paramètres fonctionnels spécifiques au tennis (sprints, changements de direction) (Girard et al. 2014) et sensibles à la fatigue (déplacements des joueurs) (Gescheit et al. 2015)
- Évaluer l'impact sur d'autres facteurs impliqués dans le développement de la fatigue: temps de réaction, fatigue mentale (Reid and Duffield 2014).

4. Habitudes de récupération du joueur de tennis de haut-niveau

Peu d'études se sont attachées à décrire les habitudes de récupération de joueurs de tennis alors même (i) qu'elles semblent particulièrement répandues, notamment à haut niveau (Venter et al. 2010) et (ii) qu'elles sont fondamentales dans l'évaluation de l'efficacité des techniques de récupération.

L'étude 1 de ce travail de thèse met en évidence que près de trois quart des joueurs de tennis (73,2 %) utilisent en moyenne deux à trois techniques de récupération (Figure 6). Ce résultat illustre que les pratiques semblent suivre de plus en plus l'état des

connaissances et les recommandations émises quant aux méthodes à mettre en place pour mieux récupérer (Calder 2009). Ce constat est partagé avec d'autres disciplines professionnelles comme le football australien (Bahnert et al. 2013). 83% des séances de récupération incluaient au moins une technique de récupération par le froid (Cryothérapie corps entier : 40% ; Immersion en eau froide : 50% ; Immersion contrastée : 10%) comme cela a été également rapporté dans d'autres disciplines professionnelles (football, rugby) (Nedelec et al. 2013; Tavares et al. 2017) ou des observations effectuées auprès de joueurs de tennis amateurs (Fleming et al. 2018).

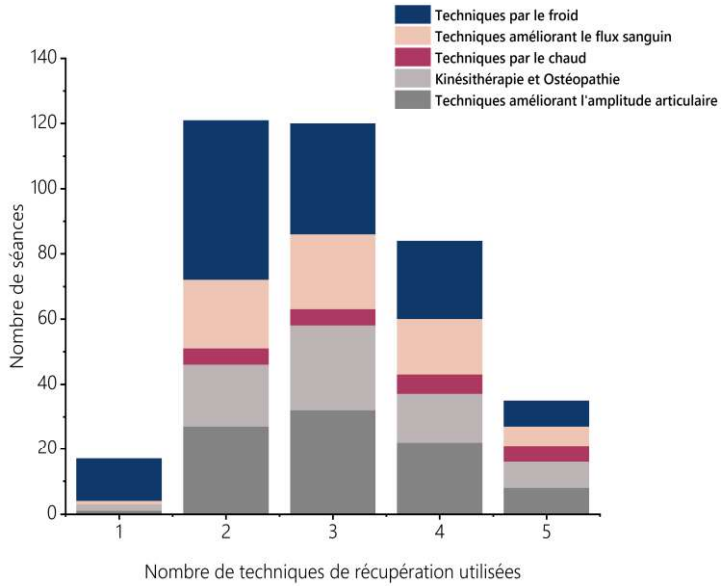


Figure 37. Répartition de l'utilisation des techniques de récupération regroupées en catégories selon le mode d'action physiologique en fonction du nombre de techniques de récupération utilisées par séance de récupération (Etude 1)

L'étude 1 permet aujourd'hui de faire le constat que les techniques de récupération par le froid sont largement utilisées quotidiennement dans un contexte professionnel d'entraînement, en accord avec les résultats de Venter et al. (2010). Dans le cadre de ces travaux de thèse, des données issues d'enquêtes effectuées lors des éditions 2016, 2017, 2018, 2019 du tournoi de Roland Garros à la demande de la FFT permettent de confirmer les résultats rapportés par l'équipe de Venter et al. (2010). D'une part, les meilleurs joueurs du circuit professionnel avait largement recours à la cryothérapie. D'autre part, nos données issues de cette même enquête permettent de faire état de la continuité et de la cohérence des habitudes de récupération entre un contexte d'entraînement et de compétition officielle. De manière intéressante, nous avons constaté une très faible

utilisation des techniques de récupération par le froid (cryothérapie corps entier, immersion en eau froide) chez les femmes. Sellwood et al. (2007) proposent que les sensations désagréables associées à l'exposition à un froid extrême pourraient être un des facteurs explicatifs expliquant les différences observées entre les joueuses et les joueurs. Les raisons guidant le choix des joueurs et joueuses dans l'étude 1 n'ont pas été investiguées. L'étude de Fleming et al. (2018) met en avant l'importance de l'avis du coach, mais également des preuves scientifiques dans l'adoption d'une technique de récupération. À partir de ces résultats, et compte-tenu des observations issues de ces travaux de thèse, nous pouvons ainsi émettre l'hypothèse que les bénéfices des techniques par le froid pour accélérer la récupération (sensations de douleurs musculaires principalement), rapportés dans la littérature actuelle, ont orienté les joueurs dans leur utilisation. Cette hypothèse est à prendre en compte et constitue un axe important de discussion lorsque l'on étudie les mécanismes psychophysiologiques impliqués dans l'efficacité des techniques de récupération par le froid.

Points clefs

- Les stratégies de récupération des joueurs de tennis professionnels incluent deux à trois techniques de récupération parmi lesquelles les techniques de récupération par le froid sont les plus utilisées.

5. Effets de la cryothérapie corps entier et de l'immersion en eau froide

1. Diminution des sensations de douleurs musculaires

L'étude 1 rapporte une association significative entre les techniques de récupération par le froid et la diminution des sensations de douleurs musculaires le lendemain matin, avant le début de l'entraînement suivant. Le choix méthodologique d'homogénéiser les données et de regrouper l'ensemble des techniques récupération, ne permettait pas de distinguer la contribution de l'immersion en eau froide, de la cryothérapie corps entier et de l'immersion contrastée dans la diminution des douleurs musculaires. Néanmoins, cette approche a permis de majorer la puissance de l'analyse statistique et d'extraire des résultats robustes en ce qui concerne les effets du froid de manière générale. L'étude 2 a permis de clarifier les effets de certains choix méthodologiques puisqu'elle

rapporte également une diminution des sensations de douleurs musculaires après utilisation de la cryothérapie corps entier et de l'immersion en eau froide. Ce résultat confirme les conclusions issues de la seule étude ayant investigué l'effet de l'immersion en eau froide sur la récupération après un match de tennis (combinée à l'utilisation de vêtements de compression et de recommandations sur l'hygiène du sommeil (Duffield et al. 2014). Au regard de la littérature rapportant des résultats équivalents dans des contextes de pratique impliquant des efforts similaires, les effets positifs aigus/chroniques de l'immersion en eau froide sur les douleurs musculaires semblent établis (Pooley et al. 2019; Rowsell et al. 2011; Ingram et al. 2009; Tavares et al. 2017; Ihsan et al. 2016). En revanche, l'étude 2 est la première à rapporter les effets bénéfiques aigus/chroniques de la WBC, dans un contexte écologique de pratique, ce qui constitue une des originalités principales de ce travail de thèse. Les études ayant comparé ces techniques dans un environnement standardisé en conditions de laboratoire rapportent des résultats contradictoires. Les études de Wilson (Wilson et al. 2018), d'Abaïdïa (Abaidia et al. 2017), et d'Hohenauer (Hohenauer et al. 2020) rapportent respectivement, un effet supérieur de la WBC par rapport à la CWI, un effet supérieur de la CWI par rapport à la WBC et l'absence d'effet positif de la CWI et de la WBC pour diminuer les douleurs musculaire comparativement à une condition contrôle.

Alors que les mécanismes présentés dans le Chapitre 1 de la revue de littérature permettaient de supposer un effet bénéfique supérieur de la CWI par rapport à la WBC pour diminuer les douleurs musculaires (Abaidia et al. 2017; Hohenauer et al. 2015), les résultats de l'étude 2 ne permettent pas de confirmer cette hypothèse.

2. Mécanismes impliqués dans la diminution des douleurs musculaires

L'application du froid (CWI, WBC) combinée à l'effet de la pression hydrostatique (CWI) est supposée limiter l'inflammation associée aux dommages musculaires (WBC, CWI) induits par l'exercice (Chapitre 1, Chapitre 4) en limitant la formation d'œdème et l'activité métabolique au sein du muscle (CWI). Ce mécanisme constitue la principale hypothèse émise pour expliquer une diminution des sensations de douleurs les jours suivants l'utilisation de la CWI et de la WBC. En parallèle, ce même mécanisme,

potentiellement impliqué dans l'atténuation de l'inflammation consécutive aux dommages musculaires (et de fait des sensations de douleurs musculaires), pourrait limiter la chute des capacités fonctionnelles et de fait expliquer un effet bénéfique de ces techniques sur les performances (Pournot et al. 2011b; Ihsan et al. 2016; Duffield et al. 2014). Ces hypothèses ont conduit au choix méthodologique d'inclure l'ensemble des paramètres physiologiques, fonctionnels et spécifiques à la performance dans l'étude 2. Cela, afin de nous permettre de confirmer ou d'infirmer les hypothèses avancées. Cependant, comme cela est observé dans une récente étude évaluant l'efficacité de la CWI dans un contexte d'enchaînement de matchs officiels de hockeyeurs (Krueger et al. 2020), les faibles niveaux de fatigue induits par le protocole de l'étude 2 ne permettent cependant pas d'investiguer davantage ces mécanismes.

Nous pourrions considérer l'absence de fatigue accumulée comme limitante dans l'exploration des mécanismes psychophysiologiques associés aux bénéfices du froid. Néanmoins, l'atténuation des douleurs musculaires par la CWI et la WBC, tout au long du protocole, en l'absence de variation significative des paramètres fonctionnels et spécifiques de performance, est un résultat intéressant. Il permet de supposer que l'effet positif de ces techniques sur les douleurs musculaires serait indépendant des mécanismes physiologiques associés évoqués précédemment. Certaines études suggèrent l'implication potentielle des aspects émotionnels et perceptifs dans la récupération des performances après un exercice, cela de manière indépendante des capacités fonctionnelles (Noakes 2012) (Marcora 2009) (Marcora 2009). Il faut cependant distinguer la perception de la récupération abordée dans ces études, des douleurs musculaires investiguées dans ces travaux de thèse. Aucune étude à ce jour n'a permis d'établir un lien direct entre ces différents paramètres et l'influence des sensations de douleurs musculaires sur les performances.

Enfin, l'étude de Broatch et al. (2014) propose que l'effet placebo participe en partie à l'efficacité de l'immersion en eau froide pour récupérer après un exercice à haute intensité. Dans cette étude, l'effet significatif de l'immersion en eau froide était similaire à une immersion tempérée dans laquelle une huile a été versée et proposée comme une nouvelle technique efficace pour récupérer. Cela supporte l'hypothèse de Sellwood et

al. (Sellwood et al. 2007) selon laquelle l'utilisation d'une technique de récupération perçue comme bénéfique par le sportif aurait plus d'influence sur les performances que les mécanismes physiologiques associés à cette technique.

Points clefs

- L'immersion en eau froide et la cryothérapie corps entier atténuent les sensations de douleurs musculaires.

Perspectives

- Il est nécessaire d'investiguer plus en détails les mécanismes d'ordres perceptifs et/ou psychologiques associés à la diminution des douleurs musculaires induite par la cryothérapie.
- Il apparaît également nécessaire d'étudier l'effet des combinaisons de techniques de récupération en fonction des habitudes observées chez les joueurs.
- L'exploration de paramètres psychosociologiques (expérience, croyance) potentiellement impliqués permettrait de statuer plus fortement quant à l'efficacité globale d'une technique de récupération, puisque cette dimension semble prépondérante dans les choix des techniques de récupération effectués par les joueurs.

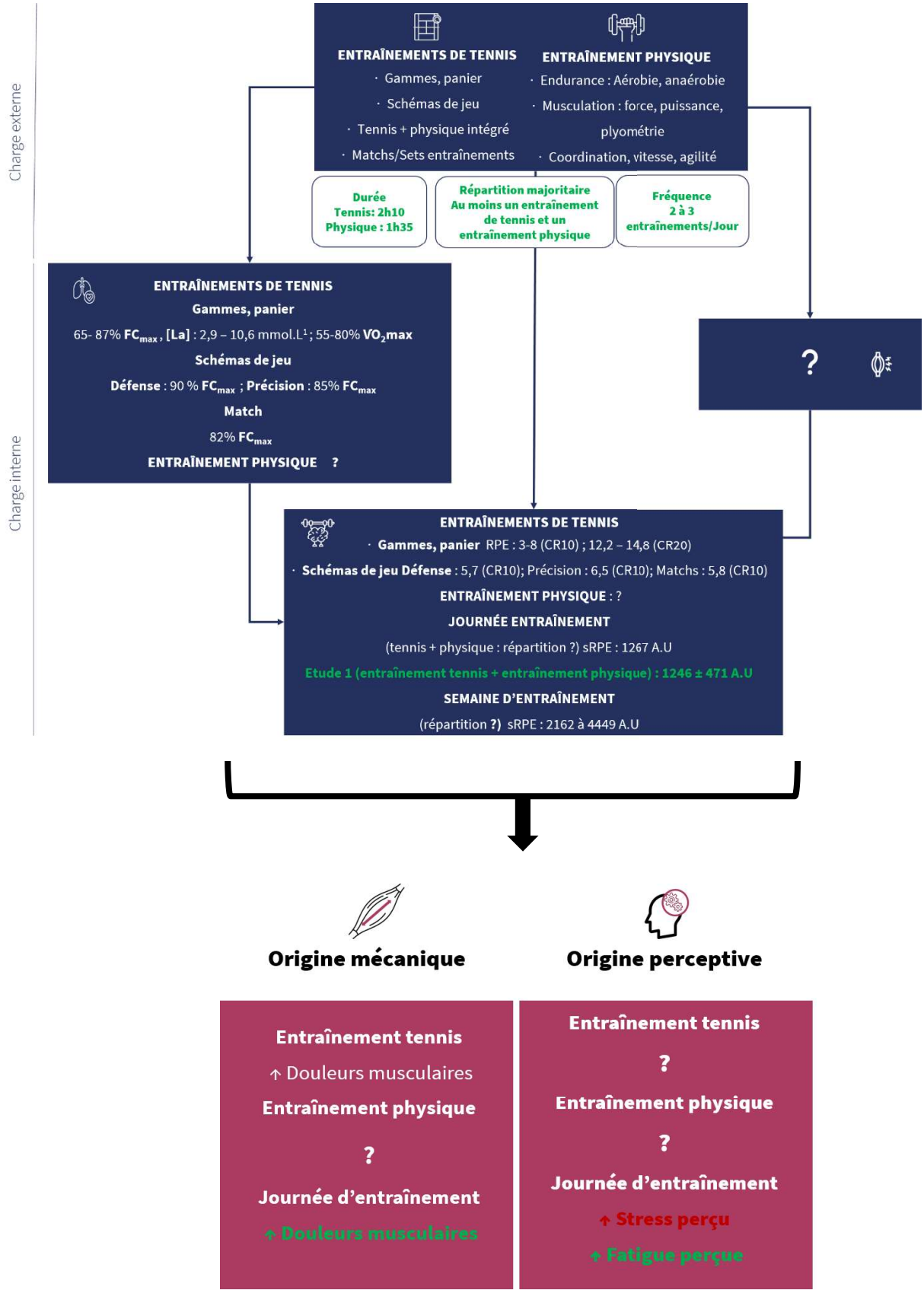


Figure 38. Apport de la littérature et des résultats de ces travaux de thèse dans les connaissances sur la charge et la fatigue induite lors de période d'entraînement d'un joueur de tennis professionnel (vert : effet démontré ; rouge : effet non démontré)

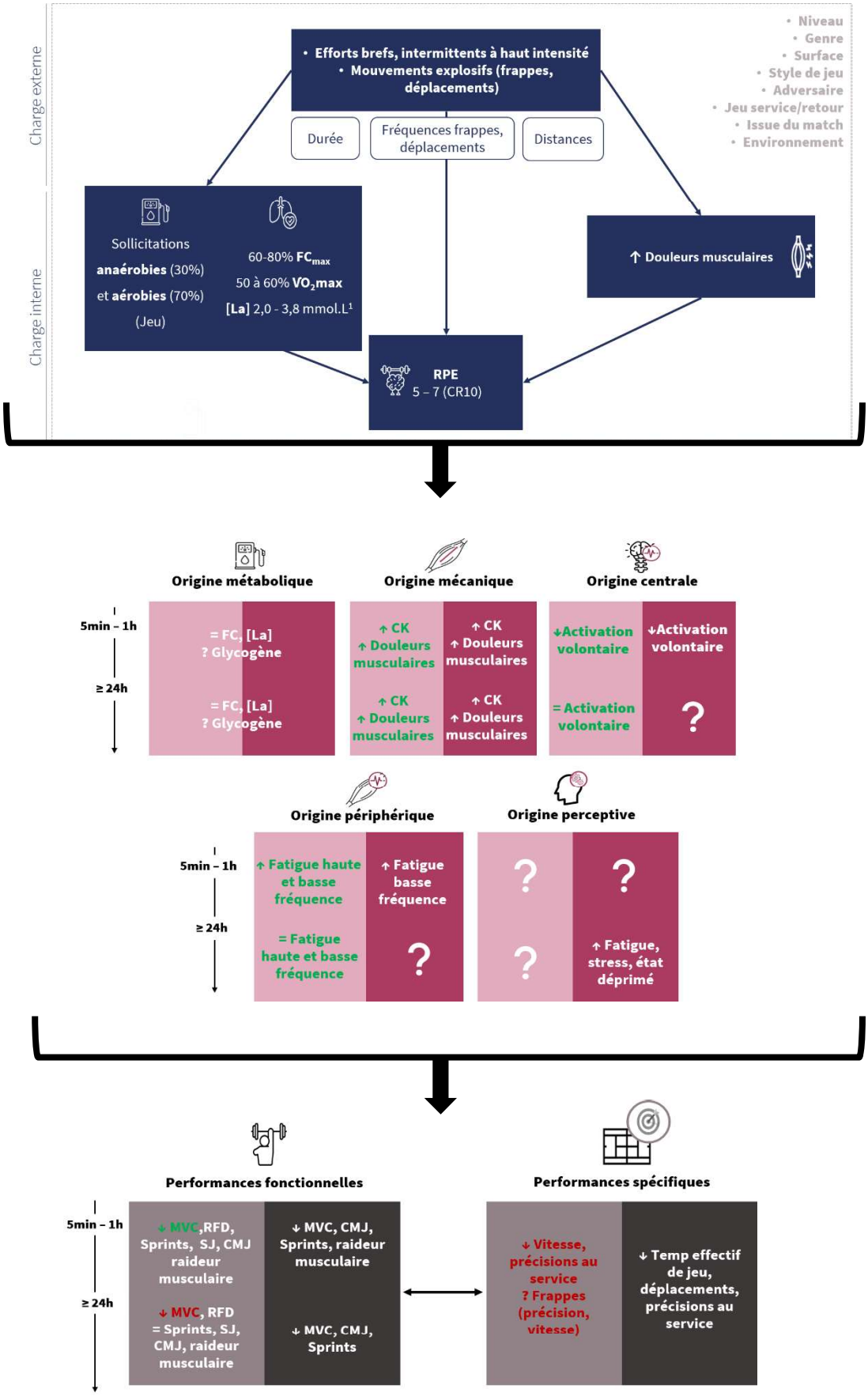


Figure 39. Apport de la littérature et des résultats de ces travaux de thèse sur la relation entre la charge, la fatigue et les performances (vert : effet démontré ; rouge : effet non démontré)

6. Applications pratiques dans le contexte spécifique du tennis de haut niveau

Cette thèse de doctorat a été réalisée en collaboration entre l'INSEP et le Centre National d'Entraînement de la FFT, deux instituts visant à développer des connaissances scientifiques à même de faire évoluer les pratiques voire de contribuer à optimiser la performance sportive. Aussi, il apparaît naturel d'extraire des messages clés pour l'accompagnement scientifique des projets de performance des joueurs de tennis professionnels. L'efficacité des stratégies par le froid pour limiter la fatigue et la récupération des performances est soumise à controverses depuis quelques années (Cheng 2018; Ihsan et al. 2020; Peake 2017). L'objectif de performance dans un contexte élite est primordial et il semblait important de pouvoir apporter des éléments de preuves scientifiques contextualisés à la pratique du tennis de haut niveau. Une veille scientifique complémentée des résultats issus de ces travaux de thèse ont permis d'orienter les joueurs de tennis professionnels dans leur processus de récupération, particulièrement sur l'utilisation des techniques par le froid (Etude 1, Etude 2, Figure 37)

Figure 40. Exemple de transfert de connaissances dans le cadre de l'accompagnement scientifique effectué au cours de ces travaux de thèse auprès des entraîneurs, préparateurs physiques, joueurs de tennis, kinésithérapeutes et médecins.

- **Période d'entraînement**

En période foncière et pré-compétitive, l'étude 1 démontre l'efficacité de l'immersion en eau froide et de la cryothérapie corps entier pour diminuer les douleurs musculaires. Toutefois, des études ont démontré des effets délétères de l'immersion en eau froide sur les adaptations cellulaires et morphologiques à la suite d'entraînement à but hypertrophique (Roberts et al. 2015; Figueiredo et al. 2016; Fyfe et al. 2019). Dans une perspective de transfert des connaissances, il apparaît adapté de prendre en compte de tels résultats scientifiques (Figure 40). Ainsi, dans l'état actuel des connaissances, l'utilisation de l'immersion en eau froide et de la cryothérapie corps entier pourrait être déconseillée à la suite d'entraînements physiques dont l'objectif est d'augmenter la masse musculaire. Des études ont rapporté un bénéfice potentiel de l'immersion en eau froide utilisée de manière aiguë sur les adaptations aérobies (Ihsan et al. 2014). En dehors de ces travaux de thèse, nous avons également montré que la cryothérapie corps entier n'avait pas d'effet néfaste sur les adaptations aérobies au cours de trois semaines d'entraînements intermittents à haute intensité (Broatch et al. 2019). Au cours de périodes d'entraînements fonciers, il est désormais conseillé de limiter le recours systématique à des stratégies de récupération, en particulier les techniques de récupération par le froid, dans les heures suivant la session d'entraînement (Mujika et al. 2018). Afin de limiter l'accumulation de fatigue, il est cependant possible d'utiliser l'immersion en eau froide et la cryothérapie corps entier mais celles-ci devront être placées à des moments clefs de la semaine (e.g. à la suite d'un entraînement physique aérobie, entraînement de tennis).

- **Période de compétition**

L'étude 2 ne témoigne pas d'une accumulation de fatigue importante lors que les joueurs de tennis enchaînent des matchs d'une durée d'1h30. Cependant, l'utilisation de l'immersion en eau froide et de la cryothérapie corps entier permet d'atténuer les douleurs musculaires ressenties par les joueurs au cours des 4 jours de protocole. Dans un contexte compétitif où la durée, la charge et la fatigue des matchs qui vont suivre sont imprévisibles, il est largement conseillé d'inclure une de ces techniques dans une routine globale de récupération après un match (Figure 41). Toutefois, l'efficacité d'une

stratégie de récupération semblant en partie associée à des aspects perceptifs, il conviendra d'individualiser l'emploi de ces techniques au regard des perceptions propres à chaque joueur. Lors de l'enchaînement de matchs de durée prolongée, la fatigue accumulée a été rapportée supérieure à celle observé dans l'Etude 2, notamment sur les sensations de douleurs musculaires. Dans un tel contexte, aucun effet néfaste n'est rapporté à ce jour et l'utilisation de l'immersion en eau froide et de la cryothérapie corps entier semble appropriée et conseillée.

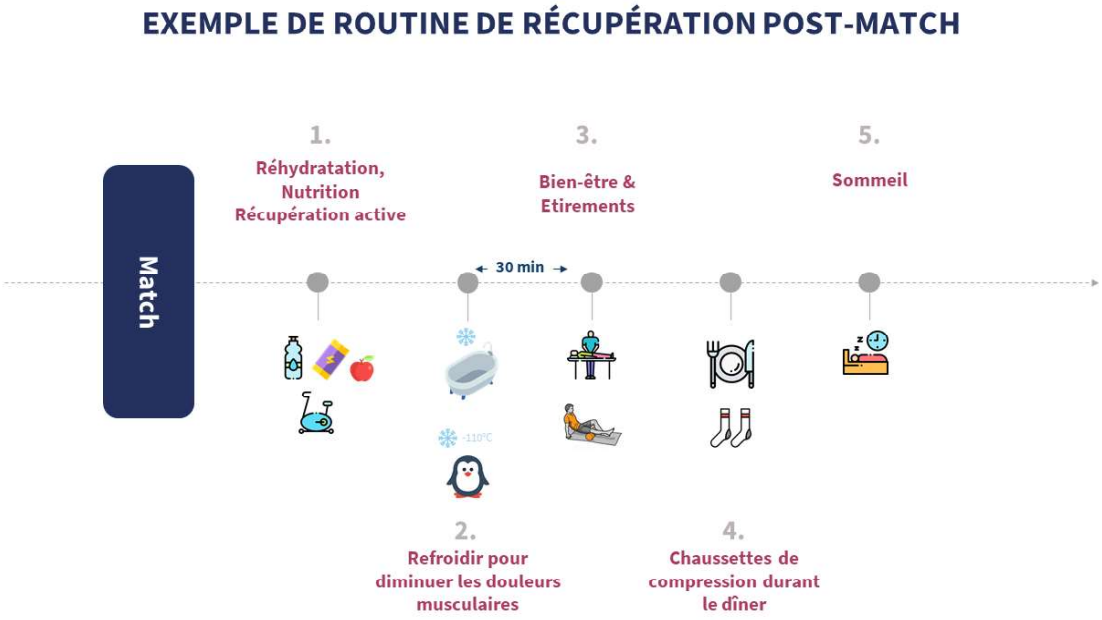


Figure 41. Exemple de transfert de connaissances dans le cadre des missions d'expertises effectuées au cours des éditions 2016-2019 des Internationaux de France de tennis (Roland Garros)

- **Perspectives d'accompagnement de la performance**

Il a été montré que la croyance en l'effet bénéfique d'une technique de récupération peut influencer la réponse associée à cette stratégie. Ainsi, Cook & Beaven (Cook and Beaven 2013) ont montré que la récupération de sportifs était supérieure lorsqu'ils percevaient cette stratégie comme efficace. Aussi, mieux éduquer et informer objectivement les joueurs de tennis et les entraîneurs aux risques et bénéfices de chaque technique augmenterait les bénéfices mêmes minimes des techniques qui seraient alors opportunément bien sélectionnées. Concrètement, cela se traduit par la réalisation de documents présentant les bénéfices associés à chaque stratégie (posters,

infographies…) et par la réalisation de rapports présentant les effets des méthodes de récupération sur les variables perceptives (douleurs musculaires, fatigue perçue, stress…). Pour aller plus loin, il pourrait s'avérer pertinent d'impliquer les joueurs de tennis et les entraîneurs dès la conception de leur plan de récupération afin de garantir une adoption durable de ces stratégies (Halson and Lastella 2017; Kellmann and Beckmann 2017).

Références

Aagaard P, Simonsen EB, Andersen JL, Magnusson P, Dyhre-Poulsen P (2002) Neural adaptation to resistance training: changes in evoked V-wave and H-reflex responses. J Appl Physiol (1985) 92 (6):2309-2318. doi:10.1152/japplphysiol.01185.2001

Abaidia AE, Lamblin J, Delecroix B, Leduc C, McCall A, Nedelec M, Dawson B, Baquet G, Dupont G (2017) Recovery From Exercise-Induced Muscle Damage: Cold-Water Immersion Versus Whole-Body Cryotherapy. Int J Sports Physiol Perform 12 (3):402-409. doi:10.1123/ijspp.2016-0186

Al Haddad H, Parouty J, Buchheit M (2012) Effect of daily cold water immersion on heart rate variability and subjective ratings of well-being in highly trained swimmers. Int J Sports Physiol Perform 7 (1):33-38. doi:10.1123/ijspp.7.1.33

Allen DG, Lamb GD, Westerblad H (2008) Skeletal muscle fatigue: cellular mechanisms. Physiol Rev 88 (1):287-332. doi:10.1152/physrev.00015.2007

Ament W, Verkerke GJ (2009) Exercise and fatigue. Sports Med 39 (5):389-422. doi:10.2165/00007256-200939050-00005

Armstrong RB (1986) Muscle damage and endurance events. Sports Med 3 (5):370-381. doi:10.2165/00007256-198603050-00006

Ascensao A, Leite M, Rebelo AN, Magalhaes S, Magalhaes J (2011) Effects of cold water immersion on the recovery of physical performance and muscle damage following a one-off soccer match. J Sports Sci 29 (3):217-225. doi:10.1080/02640414.2010.526132

Bahnert A, Norton K, Lock P (2013) Association between post-game recovery protocols, physical and perceived recovery, and performance in elite Australian Football League players. J Sci Med Sport 16 (2):151-156. doi:10.1016/j.jsams.2012.05.008

Baiget E, Fernandez-Fernandez J, Iglesias X, Rodriguez FA (2015) Tennis Play Intensity Distribution and Relation with Aerobic Fitness in Competitive Players. PLoS One 10 (6):e0131304. doi:10.1371/journal.pone.0131304

Baiget E, Fernandez-Fernandez J, Iglesias X, Vallejo L, Rodriguez FA (2014) On-court endurance and performance testing in competitive male tennis players. J Strength Cond Res 28 (1):256-264. doi:10.1519/JSC.0b013e3182955dad

Banfi G, Melegati G, Barassi A, Dogliotti G, Melzi d'Eril G, Dugué B, Corsi MM (2009) Effects of whole-body cryotherapy on serum mediators of inflammation and serum muscle enzymes in athletes. Journal of Thermal Biology 34 (2):55-59. doi:10.1016/j.jtherbio.2008.10.003

Bangsbo J, Mohr M, Krustrup P (2006) Physical and metabolic demands of training and match-play in the elite football player. J Sports Sci 24 (7):665-674. doi:10.1080/02640410500482529

Bannister EW (1991) Modeling elite athletic performance. In: MacDougall J, Wenger H, Green H (eds) Physiological Testing of the High–Performance Athlete.

Barnett A (2006) Using recovery modalities between training sessions in elite athletes: does it help? Sports Med 36 (9):781-796. doi:10.2165/00007256-200636090-00005

Bekraoui N, Fargeas-Gluck MA, Leger L (2012) Oxygen uptake and heart rate response of 6 standardized tennis drills. Appl Physiol Nutr Metab 37 (5):982-989. doi:10.1139/h2012-082

Berdi M, Koteles F, Hevesi K, Bardos G, Szabo A (2015) Elite athletes' attitudes towards the use of placebo-induced performance enhancement in sports. Eur J Sport Sci 15 (4):315-321. doi:10.1080/17461391.2014.955126

Bergeron MF, Maresh CM, Kraemer WJ, Abraham A, Conroy B, Gabaree C (1991) Tennis: a physiological profile during match play. Int J Sports Med 12 (5):474-479. doi:10.1055/s-2007-1024716

Bieuzen F, Bleakley CM, Costello JT (2013) Contrast water therapy and exercise induced muscle damage: a systematic review and meta-analysis. PLoS One 8 (4):e62356. doi:10.1371/journal.pone.0062356

Bieuzen F, Brisswalter J, Easthope C, Vercruyssen F, Bernard T, Hausswirth C (2014) Effect of wearing compression stockings on recovery after mild exercise-induced muscle damage. Int J Sports Physiol Perform 9 (2):256-264. doi:10.1123/ijspp.2013-0126

Billaut F (2011) Electromyography assessment of muscle recruitment strategies during high-intensity exercise. Advances in Applied Electromyography:25-40

Bishop PA, Jones E, Woods AK (2008) Recovery from training: a brief review: brief review. J Strength Cond Res 22 (3):1015-1024. doi:10.1519/JSC.0b013e31816eb518

Bleakley C, McDonough S, Gardner E, Baxter GD, Hopkins JT, Davison GW (2012) Cold-water immersion (cryotherapy) for preventing and treating muscle soreness after exercise. Cochrane Database Syst Rev (2):CD008262. doi:10.1002/14651858.CD008262.pub2

Bleakley CM, Bieuzen F, Davison GW, Costello JT (2014) Whole-body cryotherapy: empirical evidence and theoretical perspectives. Open Access J Sports Med 5:25-36. doi:10.2147/OAJSM.S41655

Bogdanis GC, Nevill ME, Lakomy HK, Boobis LH (1998) Power output and muscle metabolism during and following recovery from 10 and 20 s of maximal sprint exercise in humans. Acta Physiol Scand 163 (3):261-272. doi:10.1046/j.1365-201x.1998.00378.x

Bompa TO, Haff G (2009) Periodization: Theory and Methodology of Training. Human Kinetics,

Borg G (1998) Borg's perceived exertion and pain scales. Human kinetics,

Borg GA (1982) Psychophysical bases of perceived exertion. Med Sci Sports Exerc 14 (5):377-381

Borne R, Hausswirth C, Bieuzen F (2017) Relationship Between Blood Flow and Performance Recovery: A Randomized, Placebo-Controlled Study. Int J Sports Physiol Perform 12 (2):152-160. doi:10.1123/ijspp.2015-0779

Borne R, Hausswirth C, Costello JT, Bieuzen F (2015) Low-frequency electrical stimulation combined with a cooling vest improves recovery of elite kayakers following a simulated 1000-m race in a hot environment. Scand J Med Sci Sports 25 Suppl 1:219-228. doi:10.1111/sms.12392

Borresen J, Lambert MI (2008) Quantifying training load: a comparison of subjective and objective methods. Int J Sports Physiol Perform 3 (1):16-30. doi:10.1123/ijspp.3.1.16

Botton F, Hautier C, Eclache JP (2011) Energy expenditure during tennis play: a preliminary video analysis and metabolic model approach. J Strength Cond Res 25 (11):3022-3028. doi:10.1519/JSC.0b013e318234e613

Bourdon PC, Cardinale M, Murray A, Gastin P, Kellmann M, Varley MC, Gabbett TJ, Coutts AJ, Burgess DJ, Gregson W, Cable NT (2017) Monitoring Athlete Training Loads: Consensus Statement. Int J Sports Physiol Perform 12 (Suppl 2):S2161-S2170. doi:10.1123/IJSPP.2017-0208

Bouzid MA, Ghattassi K, Daab W, Zarzissi S, Bouchiba M, Masmoudi L, Chtourou H (2018) Faster physical performance recovery with cold water immersion is not related to lower muscle damage level in professional soccer players. J Therm Biol 78:184-191. doi:10.1016/j.jtherbio.2018.10.001

Bouzigon R, Grappe F, Ravier G, Dugue B (2016) Whole- and partial-body cryostimulation/cryotherapy: Current technologies and practical applications. J Therm Biol 61:67-81. doi:10.1016/j.jtherbio.2016.08.009

Bouzigon R, Ravier G, Dugue B, Grappe F (2014) The Use of Whole-Body Cryostimulation to Improve the Quality of Sleep in Athletes during High Level Standard Competitions. British Journal of Sports Medicine 48 (7):572.571-572. doi:10.1136/bjsports-2014-093494.33

Brancaccio P, Lippi G, Maffulli N (2010) Biochemical markers of muscular damage. Clin Chem Lab Med 48 (6):757-767. doi:10.1515/CCLM.2010.179

Brechbuhl C, Girard O, Millet GP, Schmitt L (2016) On the Use of a Test to Exhaustion Specific to Tennis (TEST) with Ball Hitting by Elite Players. PLoS One 11 (4):e0152389. doi:10.1371/journal.pone.0152389

Brechbuhl C, Girard O, Millet GP, Schmitt L (2017) Technical Alterations during an Incremental Field Test in Elite Male Tennis Players. Med Sci Sports Exerc 49 (9):1917-1926. doi:10.1249/MSS.0000000000001303

Broatch JR, Petersen A, Bishop DJ (2014) Postexercise cold water immersion benefits are not greater than the placebo effect. Med Sci Sports Exerc 46 (11):2139-2147. doi:10.1249/MSS.0000000000000348

Broatch JR, Petersen AC, Bishop DJ (2011) Post exercise cold water immersion activates acute PHF20 and p53 signalling in human skeletal muscle. Paper presented at the Proceedings of the Australian Physiological Society,

Broatch JR, Poignard M, Hausswirth C, Bishop DJ, Bieuzen F (2019) Whole-body cryotherapy does not augment adaptations to high-intensity interval training. Sci Rep 9 (1):12013. doi:10.1038/s41598-019-48518-1

Brooke JD, Cheng J, Collins DF, McIlroy WE, Misiaszek JE, Staines WR (1997) Sensori-sensory afferent conditioning with leg movement: gain control in spinal reflex and ascending paths. Progress in neurobiology 51 (4):393-421. doi:10.1016/s0301-0082(96)00061-5

Brown F, Gissane C, Howatson G, van Someren K, Pedlar C, Hill J (2017) Compression Garments and Recovery from Exercise: A Meta-Analysis. Sports Med 47 (11):2245-2267. doi:10.1007/s40279-017-0728-9

Cafarelli E, Flint F (1992) The role of massage in preparation for and recovery from exercise. An overview. Sports Med 14 (1):1-9. doi:10.2165/00007256-199214010-00001

Calder A (2009) Coaching Perspectives of Tennis Recovery. In. pp 1-65

Cheng AJ (2018) Cooling down the use of cryotherapy for post-exercise skeletal muscle recovery. Temperature (Austin) 5 (2):103-105. doi:10.1080/23328940.2017.1413284

Chiu LZF, Barnes JL (2003) The Fitness-Fatigue Model Revisited: Implications for Planning Short- and Long-Term Training. Strength & Conditioning Journal 25 (6):42-51

Choi D, Cole KJ, Goodpaster BH, Fink WJ, Costill DL (1994) Effect of passive and active recovery on the resynthesis of muscle glycogen. Med Sci Sports Exerc 26 (8):992-996

Christmass MA, Richmond SE, Cable NT, Arthur PG, Hartmann PE (1998) Exercise intensity and metabolic response in singles tennis. J Sports Sci 16 (8):739-747. doi:10.1080/026404198366371

Clarkson PM, Nosaka K, Braun B (1992) Muscle function after exercise-induced muscle damage and rapid adaptation. Med Sci Sports Exerc 24 (5):512-520

Collette R, Kellmann M, Ferrauti A, Meyer T, Pfeiffer M (2018) Relation Between Training Load and Recovery-Stress State in High-Performance Swimming. Front Physiol 9:845. doi:10.3389/fphys.2018.00845

Convertino VA, Armstrong LE, Coyle EF, Mack GW, Sawka MN, Senay LC, Jr., Sherman WM (1996) American College of Sports Medicine position stand. Exercise and fluid replacement. Med Sci Sports Exerc 28 (1):i-vii. doi:10.1097/00005768-199610000-00045

Cook CJ, Beaven CM (2013) Individual perception of recovery is related to subsequent sprint performance. Br J Sports Med 47 (11):705-709. doi:10.1136/bjsports-2012-091647

Cortis C, Tessitore A, D'Artibale E, Meeusen R, Capranica L (2010) Effects of post-exercise recovery interventions on physiological, psychological, and performance parameters. Int J Sports Med 31 (5):327-335. doi:10.1055/s-0030-1248242

Costello JT, Algar LA, Donnelly AE (2012a) Effects of whole-body cryotherapy (-110 degrees C) on proprioception and indices of muscle damage. Scand J Med Sci Sports 22 (2):190-198. doi:10.1111/j.1600-0838.2011.01292.x

Costello JT, Culligan K, Selfe J, Donnelly AE (2012b) Muscle, skin and core temperature after -110 degrees c cold air and 8 degrees c water treatment. PLoS One 7 (11):e48190. doi:10.1371/journal.pone.0048190

Coudreuse JM, Dupont P, Nicol C (2004) [Delayed post effort muscle soreness]. Ann Readapt Med Phys 47 (6):290-298. doi:10.1016/j.annrmp.2004.05.012

Coutts A (2009) Monitoring training loads in elite tennis. Ponto de vista

Coutts A, Kempton T, Crowcroft S (2018) Developing athlete monitoring systems: Theoretical basis and practical applications. . In: Sport, Recovery and Performance: Interdisciplinary Insights. Abingdon: Routledge edn. M. Kellmann & J. Beckmann (Eds.), pp 19-32

Coyle EF (2000) Physical activity as a metabolic stressor. Am J Clin Nutr 72 (2 Suppl):512S-520S. doi:10.1093/ajcn/72.2.512S

Crowther F, Sealey R, Crowe M, Edwards A, Halson S (2017) Team sport athletes' perceptions and use of recovery strategies: a mixed-methods survey study. BMC Sports Sci Med Rehabil 9:6. doi:10.1186/s13102-017-0071-3

Dansou P, Oddou MF, Delaire M, Therminarias A (2001) Dépense énergétique aérobie au cours d'un match de tennis, du laboratoire au terrain. Science & Sports 16 (1):16-22. doi:10.1016/s0765-1597(00)00040-x

Davey PR, Thorpe RD, Williams C (2002) Fatigue decreases skilled tennis performance. J Sports Sci 20 (4):311-318. doi:10.1080/026404102753576080

Davis H, Orzeck T, Keelan P (2007) Psychometric item evaluations of the Recovery-Stress Questionnaire for athletes. Psychology of Sport and Exercise 8 (6):917-938. doi:10.1016/j.psychsport.2006.10.003

de Freitas VH, Ramos SP, Bara-Filho MG, Freitas DGS, Coimbra DR, Cecchini R, Guarnier FA, Nakamura FY (2019) Effect of Cold Water Immersion Performed on Successive Days on Physical Performance, Muscle Damage, and Inflammatory, Hormonal, and Oxidative Stress Markers in Volleyball Players. J Strength Cond Res 33 (2):502-513. doi:10.1519/JSC.0000000000001884

Del Balso C, Cafarelli E (2007) Adaptations in the activation of human skeletal muscle induced by short-term isometric resistance training. J Appl Physiol (1985) 103 (1):402-411. doi:10.1152/japplphysiol.00477.2006

Delextrat A, Calleja-Gonzalez J, Hippocrate A, Clarke ND (2013) Effects of sports massage and intermittent cold-water immersion on recovery from matches by basketball players. J Sports Sci 31 (1):11-19. doi:10.1080/02640414.2012.719241

Docherty D (1982) A comparison of heart rate responses in racquet games. Br J Sports Med 16 (2):96-100. doi:10.1136/bjsm.16.2.96

Doguet V (2016) Caractéristiques mécaniques et nerveuses des contractions excentriques maximales chez l'homme : influence sur les dommages musculaires.

Drew MK, Finch CF (2016) The Relationship Between Training Load and Injury, Illness and Soreness: A Systematic and Literature Review. Sports Med 46 (6):861-883. doi:10.1007/s40279-015-0459-8

Duchateau J, Enoka RM (2011) Human motor unit recordings: origins and insight into the integrated motor system. Brain Res 1409:42-61. doi:10.1016/j.brainres.2011.06.011

Duffield R, Edge J, Merrells R, Hawke E, Barnes M, Simcock D, Gill N (2008) The effects of compression garments on intermittent exercise performance and recovery on consecutive days. Int J Sports Physiol Perform 3 (4):454-468. doi:10.1123/ijspp.3.4.454

Duffield R, Murphy A, Kellett A, Reid M (2014) Recovery from repeated on-court tennis sessions: combining cold-water immersion, compression, and sleep recovery interventions. Int J Sports Physiol Perform 9 (2):273-282. doi:10.1123/ijspp.2012-0359

Duffield R, Reid M, Baker J, Spratford W (2010) Accuracy and reliability of GPS devices for measurement of movement patterns in confined spaces for court-based sports. J Sci Med Sport 13 (5):523-525. doi:10.1016/j.jsams.2009.07.003

Dupuy O, Douzi W, Theurot D, Bosquet L, Dugue 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

Ebbeling CB, Clarkson PM (1989) Exercise-induced muscle damage and adaptation. Sports Med 7 (4):207-234. doi:10.2165/00007256-198907040-00001

Edwards AM, Noakes TD (2009) Dehydration: cause of fatigue or sign of pacing in elite soccer? Sports Med 39 (1):1-13. doi:10.2165/00007256-200939010-00001

Edwards RH (1981) Human muscle function and fatigue. Ciba Foundation symposium 82:1-18. doi:10.1002/9780470715420.ch1
Edwards S (1993) The Heart Rate Monitor Book. Polar CIC,
Elias GP, Varley MC, Wyckelsma VL, McKenna MJ, Minahan CL, Aughey RJ (2012) Effects of water immersion on posttraining recovery in Australian footballers. Int J Sports Physiol Perform 7 (4):357-366. doi:10.1123/ijspp.7.4.357
Elias GP, Wyckelsma VL, Varley MC, McKenna MJ, Aughey RJ (2013) Effectiveness of water immersion on postmatch recovery in elite professional footballers. Int J Sports Physiol Perform 8 (3):243-253. doi:10.1123/ijspp.8.3.243
Elliott B (2006) Biomechanics and tennis. Br J Sports Med 40 (5):392-396. doi:10.1136/bjsm.2005.023150
Engel F, Sperlich B (2016) Compression Garments in Sports: Athletic Performance and Recovery. Springer International Publishing,
Enoka RM, Stuart DG (1992) Neurobiology of muscle fatigue. J Appl Physiol (1985) 72 (5):1631-1648. doi:10.1152/jappl.1992.72.5.1631
Fabre JB, Martin V, Gondin J, Cottin F, Grelot L (2012) Effect of playing surface properties on neuromuscular fatigue in tennis. Med Sci Sports Exerc 44 (11):2182-2189. doi:10.1249/MSS.0b013e3182618cf9
Farrell PA, Joyner M, Caiozzo V (2011) ACSM's advanced exercise physiology: Second edition.
Fernandez-Fernandez J, Fernandez Garcia B, Mendez-Villanueva A, Terrados N (2005) Exercise intensity in tennis: Simulated match play versus training drills. Med Sci Tennis 10:6-7
Fernandez-Fernandez J, Kinner V, Ferrauti A (2010) The physiological demands of hitting and running in tennis on different surfaces. J Strength Cond Res 24 (12):3255-3264. doi:10.1519/JSC.0b013e3181e8745f
Fernandez-Fernandez J, Saez de Villarreal E, Sanz-Rivas D, Moya M (2016) The Effects of 8-Week Plyometric Training on Physical Performance in Young Tennis Players. Pediatr Exerc Sci 28 (1):77-86. doi:10.1123/pes.2015-0019
Fernandez-Fernandez J, Sanz-Rivas D, Fernandez-Garcia B, Mendez-Villanueva A (2008) Match activity and physiological load during a clay-court tennis tournament in elite female players. J Sports Sci 26 (14):1589-1595. doi:10.1080/02640410802287089
Fernandez-Fernandez J, Sanz-Rivas D, Kovacs MS, Moya M (2015a) In-season effect of a combined repeated sprint and explosive strength training program on elite junior tennis players. J Strength Cond Res 29 (2):351-357. doi:10.1519/JSC.0000000000000759
Fernandez-Fernandez J, Sanz-Rivas D, Sanchez-Munoz C, Pluim BM, Tiemessen I, Mendez-Villanueva A (2009) A comparison of the activity profile and physiological demands between advanced and recreational veteran tennis players. J Strength Cond Res 23 (2):604-610. doi:10.1519/JSC.0b013e318194208a
Fernandez-Fernandez J, Sanz-Rivas D, Sarabia JM, Moya M (2015b) Preseason Training: The Effects of a 17-Day High-Intensity Shock Microcycle in Elite Tennis Players. J Sports Sci Med 14 (4):783-791
Fernandez J, Mendez-Villanueva A, Pluim BM (2006) Intensity of tennis match play. Br J Sports Med 40 (5):387-391; discussion 391. doi:10.1136/bjsm.2005.023168

Ferrauti A, Bergeron MF, Pluim BM, Weber K (2001a) Physiological responses in tennis and running with similar oxygen uptake. Eur J Appl Physiol 85 (1-2):27-33. doi:10.1007/s004210100425

Ferrauti A, Pluim BM, Busch T, Weber K (2003) Blood glucose responses and incidence of hypoglycaemia in elite tennis under practice and tournament conditions. J Sci Med Sport 6 (1):28-39. doi:10.1016/s1440-2440(03)80006-3

Ferrauti A, Pluim BM, Weber K (2001b) The effect of recovery duration on running speed and stroke quality during intermittent training drills in elite tennis players. J Sports Sci 19 (4):235-242. doi:10.1080/026404101750158277

Ferreira-Junior JB, Bottaro M, Vieira A, Siqueira AF, Vieira CA, Durigan JL, Cadore EL, Coelho LG, Simoes HG, Bemben MG (2015) One session of partial-body cryotherapy (-110 degrees C) improves muscle damage recovery. Scand J Med Sci Sports 25 (5):e524-530. doi:10.1111/sms.12353

Figueiredo VC, Roberts LA, Markworth JF, Barnett MP, Coombes JS, Raastad T, Peake JM, Cameron-Smith D (2016) Impact of resistance exercise on ribosome biogenesis is acutely regulated by post-exercise recovery strategies. Physiol Rep 4 (2). doi:10.14814/phy2.12670

Fitts RH (1994) Cellular mechanisms of muscle fatigue. Physiol Rev 74 (1):49-94. doi:10.1152/physrev.1994.74.1.49

Fleming JA, Naughton RJ, Harper LD (2018) Investigating the Nutritional and Recovery Habits of Tennis Players. Nutrients 10 (4). doi:10.3390/nu10040443

Fonda B, Sarabon N (2013) Effects of whole-body cryotherapy on recovery after hamstring damaging exercise: a crossover study. Scand J Med Sci Sports 23 (5):e270-278. doi:10.1111/sms.12074

Foster C, Florhaug JA, Franklin J, Gottschall L, Hrovatin LA, Parker S, Doleshal P, Dodge C (2001) A new approach to monitoring exercise training. J Strength Cond Res 15 (1):109-115. doi:10.1519/00124278-200102000-00019

Fowles JR, Green HJ, Tupling R, O'Brien S, Roy BD (2002) Human neuromuscular fatigue is associated with altered Na+-K+-ATPase activity following isometric exercise. J Appl Physiol (1985) 92 (4):1585-1593. doi:10.1152/japplphysiol.00668.2001

Friden J, Lieber RL (2001) Eccentric exercise-induced injuries to contractile and cytoskeletal muscle fibre components. Acta Physiol Scand 171 (3):321-326. doi:10.1046/j.1365-201x.2001.00834.x

Friden J, Sjostrom M, Ekblom B (1981) A morphological study of delayed muscle soreness. Experientia 37 (5):506-507. doi:10.1007/BF01986165

Fyfe JJ, Broatch JR, Trewin AJ, Hanson ED, Argus CK, Garnham AP, Halson SL, Polman RC, Bishop DJ, Petersen AC (2019) Cold water immersion attenuates anabolic signaling and skeletal muscle fiber hypertrophy, but not strength gain, following whole-body resistance training. J Appl Physiol (1985) 127 (5):1403-1418. doi:10.1152/japplphysiol.00127.2019

Gandevia SC (2001) Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. Physiol Rev 81 (4):1725-1789. doi:10.1152/physrev.2001.81.4.1725

Garcia CA, da Mota GR, Marocolo M (2016) Cold Water Immersion is Acutely Detrimental but Increases Performance Post-12 h in Rugby Players. Int J Sports Med 37 (8):619-624. doi:10.1055/s-0035-1565200

Garland SJ (1991) Role of small diameter afferents in reflex inhibition during human muscle fatigue. J Physiol 435:547-558. doi:10.1113/jphysiol.1991.sp018524

Gescheit DT, Cormack SJ, Reid M, Duffield R (2015) Consecutive days of prolonged tennis match play: performance, physical, and perceptual responses in trained players. Int J Sports Physiol Perform 10 (7):913-920. doi:10.1123/ijspp.2014-0329

Gescheit DT, Duffield R, Skein M, Brydon N, Cormack SJ, Reid M (2017) Effects of consecutive days of match play on technical performance in tennis. J Sports Sci 35 (20):1988-1994. doi:10.1080/02640414.2016.1244352

Girard O, Christian RJ, Racinais S, Periard JD (2014) Heat stress does not exacerbate tennis-induced alterations in physical performance. Br J Sports Med 48 Suppl 1:i39-i44. doi:10.1136/bjsports-2013-093165

Girard O, Lattier G, Maffiuletti NA, Micallef JP, Millet GP (2008) Neuromuscular fatigue during a prolonged intermittent exercise: Application to tennis. J Electromyogr Kinesiol 18 (6):1038-1046. doi:10.1016/j.jelekin.2007.05.005

Girard O, Lattier G, Micallef JP, Millet GP (2006) Changes in exercise characteristics, maximal voluntary contraction, and explosive strength during prolonged tennis playing. Br J Sports Med 40 (6):521-526. doi:10.1136/bjsm.2005.023754

Girard O, Millet GP (2009) Neuromuscular fatigue in racquet sports. Phys Med Rehabil Clin N Am 20 (1):161-173, ix. doi:10.1016/j.pmr.2008.10.008

Girard O, Racinais S, Micallef JP, Millet GP (2011) Spinal modulations accompany peripheral fatigue during prolonged tennis playing. Scand J Med Sci Sports 21 (3):455-464. doi:10.1111/j.1600-0838.2009.01032.x

Glaister M (2005) Multiple sprint work : physiological responses, mechanisms of fatigue and the influence of aerobic fitness. Sports Med 35 (9):757-777. doi:10.2165/00007256-200535090-00003

Glasgow PD, Ferris R, Bleakley CM (2014) Cold water immersion in the management of delayed-onset muscle soreness: is dose important? A randomised controlled trial. Phys Ther Sport 15 (4):228-233. doi:10.1016/j.ptsp.2014.01.002

Gomes RV, Coutts AJ, Viveiros L, Aoki MS (2011) Physiological demands of match-play in elite tennis: A case study. European Journal of Sport Science 11 (2):105-109. doi:10.1080/17461391.2010.487118

Gomes RV, Moreira A, Lodo L, Capitani CD, Aoki MS (2015) Ecological Validity of Session RPE Method for Quantifying Internal Training Load in Tennis. International Journal of Sports Science & Coaching 10 (4):729-737. doi:10.1260/1747-9541.10.4.729

Gomes RV, Moreira A, Lodo L, Nosaka K, Coutts AJ, Aoki MS (2013) Monitoring training loads, stress, immune-endocrine responses and performance in tennis players. Biol Sport 30 (3):173-180. doi:10.5604/20831862.1059169

Gomes RV, Santos RC, Nosaka K, Moreira A, Miyabara EH, Aoki MS (2014) Muscle damage after a tennis match in young players. Biol Sport 31 (1):27-32. doi:10.5604/20831862.1083276

Goto K, Oda H, Kondo H, Igaki M, Suzuki A, Tsuchiya S, Murase T, Hase T, Fujiya H, Matsumoto I, Naito H, Sugiura T, Ohira Y, Yoshioka T (2011) Responses of muscle mass, strength and gene transcripts to long-term heat stress in healthy human subjects. Eur J Appl Physiol 111 (1):17-27. doi:10.1007/s00421-010-1617-1

Govus AD, Coutts A, Duffield R, Murray A, Fullagar H (2018) Relationship Between Pretraining Subjective Wellness Measures, Player Load, and Rating-of-Perceived-Exertion Training Load in American College Football. Int J Sports Physiol Perform 13 (1):95-101. doi:10.1123/ijspp.2016-0714

Grainger A, Comfort P, Heffernan S (2019) No Effect of Partial-Body Cryotherapy on Restoration of Countermovement-Jump or Well-Being Performance in Elite Rugby Union Players During the Competitive Phase of the Season. Int J Sports Physiol Perform:1-23. doi:10.1123/ijspp.2018-0911

Gregson W, Black MA, Jones H, Milson J, Morton J, Dawson B, Atkinson G, Green DJ (2011) Influence of cold water immersion on limb and cutaneous blood flow at rest. Am J Sports Med 39 (6):1316-1323. doi:10.1177/0363546510395497

Guo J, Li L, Gong Y, Zhu R, Xu J, Zou J, Chen X (2017) Massage Alleviates Delayed Onset Muscle Soreness after Strenuous Exercise: A Systematic Review and Meta-Analysis. Front Physiol 8:747. doi:10.3389/fphys.2017.00747

Haddad M, Chaouachi A, Castagna C, Hue O, Wong DP, Tabben M, Behm DG, Chamari K (2013) Validity and psychometric evaluation of the French version of RPE scale in young fit males when monitoring training loads. Science & Sports 28 (2):e29-e35. doi:10.1016/j.scispo.2012.07.008

Haddad M, Padulo J, Chamari K (2014) The usefulness of session rating of perceived exertion for monitoring training load despite several influences on perceived exertion. Int J Sports Physiol Perform 9 (5):882-883. doi:10.1123/ijspp.2014-0010

Haddad M, Stylianides G, Djaoui L, Dellal A, Chamari K (2017) Session-RPE Method for Training Load Monitoring: Validity, Ecological Usefulness, and Influencing Factors. Front Neurosci 11:612. doi:10.3389/fnins.2017.00612

Halson SL (2008) Nutrition, sleep and recovery. European Journal of Sport Science 8 (2):119-126. doi:10.1080/17461390801954794

Halson SL (2011) Does the time frame between exercise influence the effectiveness of hydrotherapy for recovery? Int J Sports Physiol Perform 6 (2):147-159. doi:10.1123/ijspp.6.2.147

Halson SL (2014) Monitoring training load to understand fatigue in athletes. Sports Med 44 Suppl 2:S139-147. doi:10.1007/s40279-014-0253-z

Halson SL, Lastella M (2017) Amazing Athletes With Ordinary Habits: Why Is Changing Behavior So Difficult? Int J Sports Physiol Perform 12 (10):1273-1274. doi:10.1123/ijspp.2017-0632

Hartmann H, Wirth K, Keiner M, Mickel C, Sander A, Szilvas E (2015) Short-term Periodization Models: Effects on Strength and Speed-strength Performance. Sports Med 45 (10):1373-1386. doi:10.1007/s40279-015-0355-2

Haun CT, Roberts MD, Romero MA, Osburn SC, Mobley CB, Anderson RG, Goodlett MD, Pascoe DD, Martin JS (2017) Does external pneumatic compression treatment between bouts of overreaching resistance training sessions exert differential effects on molecular signaling and performance-related variables compared to passive recovery? An exploratory study. PLoS One 12 (6):e0180429. doi:10.1371/journal.pone.0180429

Hausswirth C (2013) Améliorer sa récupération en sport. NSEP-Éditions edn., en ligne. doi:10.4000/books.insep.1320

Hausswirth C, Louis J, Bieuzen F, Pournot H, Fournier J, Filliard JR, Brisswalter J (2011) Effects of whole-body cryotherapy vs. far-infrared vs. passive modalities on recovery from exercise-induced muscle damage in highly-trained runners. PLoS One 6 (12):e27749. doi:10.1371/journal.pone.0027749

Hausswirth C, Schaal K, Le Meur Y, Bieuzen F, Filliard JR, Volondat M, Louis J (2013) Parasympathetic activity and blood catecholamine responses following a single partial-body cryostimulation and a whole-body cryostimulation. PLoS One 8 (8):e72658. doi:10.1371/journal.pone.0072658

Heidari J, Beckmann J, Bertollo M, Brink M, Kallus W, Robazza C, Kellmann M (2018) Multidimensional Monitoring of Recovery Status and Implications for Performance. Int J Sports Physiol Perform:1-24. doi:10.1123/ijspp.2017-0669

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 (2):109-114; discussion 115. doi:10.1136/bjsm.34.2.109

Herbert RD, de Noronha M, Kamper SJ (2011) Stretching to prevent or reduce muscle soreness after exercise. Cochrane Database Syst Rev (7):CD004577. doi:10.1002/14651858.CD004577.pub3

Hermens HJ, Freriks B, Disselhorst-Klug C, Rau G (2000) Development of recommendations for SEMG sensors and sensor placement procedures. J Electromyogr Kinesiol 10 (5):361-374. doi:10.1016/s1050-6411(00)00027-4

Higgins TR, Greene DA, Baker MK (2017) Effects of Cold Water Immersion and Contrast Water Therapy for Recovery From Team Sport: A Systematic Review and Meta-analysis. J Strength Cond Res 31 (5):1443-1460. doi:10.1519/JSC.0000000000001559

Hill J, Howatson G, van Someren K, Leeder J, Pedlar C (2014) Compression garments and recovery from exercise-induced muscle damage: a meta-analysis. Br J Sports Med 48 (18):1340-1346. doi:10.1136/bjsports-2013-092456

Hohenauer E, Costello JT, Deliens T, Clarys P, Stoop R, Clijsen R (2020) Partial-body cryotherapy (-135 degrees C) and cold-water immersion (10 degrees C) after muscle damage in females. Scand J Med Sci Sports 30 (3):485-495. doi:10.1111/sms.13593

Hohenauer E, Costello JT, Stoop R, Kung UM, Clarys P, Deliens T, Clijsen R (2018) Cold-water or partial-body cryotherapy? Comparison of physiological responses and recovery following muscle damage. Scand J Med Sci Sports 28 (3):1252-1262. doi:10.1111/sms.13014

Hohenauer E, Taeymans J, Baeyens JP, Clarys P, Clijsen R (2015) The Effect of Post-Exercise Cryotherapy on Recovery Characteristics: A Systematic Review and Meta-Analysis. PLoS One 10 (9):e0139028. doi:10.1371/journal.pone.0139028

Hooper SL, Mackinnon LT (1995) Monitoring overtraining in athletes. Recommendations. Sports Med 20 (5):321-327. doi:10.2165/00007256-199520050-00003

Hooper SL, Mackinnon LT, Howard A, Gordon RD, Bachmann AW (1995) Markers for monitoring overtraining and recovery. Med Sci Sports Exerc 27 (1):106-112

Hoppe MW, Baumgart C, Bornefeld J, Sperlich B, Freiwald J, Holmberg HC (2014) Running activity profile of adolescent tennis players during match play. Pediatr Exerc Sci 26 (3):281-290. doi:10.1123/pes.2013-0195

Hoppe MW, Baumgart C, Freiwald J (2016) Do Running Activities of Adolescent and Adult Tennis Players Differ During Play? Int J Sports Physiol Perform 11 (6):793-801. doi:10.1123/ijspp.2015-0141

Hornery DJ, Farrow D, Mujika I, Young W (2007) An integrated physiological and performance profile of professional tennis. Br J Sports Med 41 (8):531-536; discussion 536. doi:10.1136/bjsm.2006.031351

Hough PA, Ross EZ, Howatson G (2009) Effects of dynamic and static stretching on vertical jump performance and electromyographic activity. J Strength Cond Res 23 (2):507-512. doi:10.1519/JSC.0b013e31818cc65d

Hughes M, Maynard I, Lees A, Reilly T (2002) Science and Racket Sports II. Taylor & Francis,

Ihsan M, Abbiss CR, Gregson W, Allan R (2020) Warming to the ice bath: Don't go cool on cold water immersion just yet! Temperature:1-3. doi:10.1080/23328940.2020.1727085

Ihsan M, Watson G, Abbiss CR (2016) What are the Physiological Mechanisms for Post-Exercise Cold Water Immersion in the Recovery from Prolonged Endurance and Intermittent Exercise? Sports Med 46 (8):1095-1109. doi:10.1007/s40279-016-0483-3

Ihsan M, Watson G, Choo HC, Lewandowski P, Papazzo A, Cameron-Smith D, Abbiss CR (2014) Postexercise muscle cooling enhances gene expression of PGC-1alpha. Med Sci Sports Exerc 46 (10):1900-1907. doi:10.1249/MSS.0000000000000308

Impellizzeri FM, Marcora SM, Coutts AJ (2019) Internal and External Training Load: 15 Years On. Int J Sports Physiol Perform 14 (2):270-273. doi:10.1123/ijspp.2018-0935

Impellizzeri FM, Rampinini E, Coutts AJ, Sassi A, Marcora SM (2004) Use of RPE-based training load in soccer. Med Sci Sports Exerc 36 (6):1042-1047. doi:10.1249/01.mss.0000128199.23901.2f

Impellizzeri FM, Rampinini E, Marcora SM (2005) Physiological assessment of aerobic training in soccer. J Sports Sci 23 (6):583-592. doi:10.1080/02640410400021278

Ingram J, Dawson B, Goodman C, Wallman K, Beilby J (2009) Effect of water immersion methods on post-exercise recovery from simulated team sport exercise. J Sci Med Sport 12 (3):417-421. doi:10.1016/j.jsams.2007.12.011

Issurin VB (2010) New horizons for the methodology and physiology of training periodization. Sports Med 40 (3):189-206. doi:10.2165/11319770-000000000-00000

Johnson CD, McHugh MP, Wood T, Kibler B (2006) Performance demands of professional male tennis players. Br J Sports Med 40 (8):696-699; discussion 699. doi:10.1136/bjsm.2005.021253

Jones DA (1996) High-and low-frequency fatigue revisited. Acta Physiol Scand 156 (3):265-270. doi:10.1046/j.1365-201X.1996.192000.x

Kallus W, Kellmann M (2016) The Recovery-Stress Questionnaires: User Manual.

Kellmann M, Beckmann J (2003) Research and intervention in sport psychology: New perspectives on an inherent conflict. International Journal of Sport and Exercise Psychology 1 (1):13-26. doi:10.1080/1612197x.2003.9671701

Kellmann M, Beckmann J (2017) Sport, Recovery, and Performance: Interdisciplinary Insights. Taylor & Francis,

Kellmann M, Bertollo M, Bosquet L, Brink M, Coutts AJ, Duffield R, Erlacher D, Halson SL, Hecksteden A, Heidari J, Kallus KW, Meeusen R, Mujika I, Robazza C, Skorski S, Venter R, Beckmann J (2018) Recovery and Performance in Sport: Consensus Statement. Int J Sports Physiol Perform 13 (2):240-245. doi:10.1123/ijspp.2017-0759

Kentta G, Hassmen P (1998) Overtraining and recovery. A conceptual model. Sports Med 26 (1):1-16. doi:10.2165/00007256-199826010-00001

King M, Duffield R (2009) The effects of recovery interventions on consecutive days of intermittent sprint exercise. J Strength Cond Res 23 (6):1795-1802. doi:10.1519/JSC.0b013e3181b3f81f

Konig D, Huonker M, Schmid A, Halle M, Berg A, Keul J (2001) Cardiovascular, metabolic, and hormonal parameters in professional tennis players. Med Sci Sports Exerc 33 (4):654-658. doi:10.1097/00005768-200104000-00022

Kovacs M (2018) The Role of Scheduling and Periodization in Competitive Tennis Players. In: Di Giacomo G, Ellenbecker TS, Kibler WB (eds) Tennis Medicine. Springer International Publishing, Cham, pp 679-686. doi:10.1007/978-3-319-71498-1_40

Kovacs M, Chandler WB, Chandler TJ (2007) Tennis Training: Enhancing On-court Performance. Racquet Tech Publishing,

Kovacs MS (2006) Applied physiology of tennis performance. Br J Sports Med 40 (5):381-385; discussion 386. doi:10.1136/bjsm.2005.023309

Kovacs MS (2007) Tennis physiology: training the competitive athlete. Sports Med 37 (3):189-198. doi:10.2165/00007256-200737030-00001

Kraemer WJ, Flanagan SD, Comstock BA, Fragala MS, Earp JE, Dunn-Lewis C, Ho JY, Thomas GA, Solomon-Hill G, Penwell ZR, Powell MD, Wolf MR, Volek JS, Denegar CR, Maresh CM (2010) Effects of a whole body compression garment on markers of recovery after a heavy resistance workout in men and women. J Strength Cond Res 24 (3):804-814. doi:10.1519/JSC.0b013e3181d33025

Kraemer WJ, Hakkinen K, Triplett-Mcbride NT, Fry AC, Koziris LP, Ratamess NA, Bauer JE, Volek JS, McConnell T, Newton RU, Gordon SE, Cummings D, Hauth J, Pullo F, Lynch JM, Fleck SJ, Mazzetti SA, Knuttgen HG (2003) Physiological changes with periodized resistance training in women tennis players. Med Sci Sports Exerc 35 (1):157-168. doi:10.1097/00005768-200301000-00024

Krueger M, Costello JT, Stenzel M, Mester J, Wahl P (2020) The physiological effects of daily cold-water immersion on 5-day tournament performance in international standard youth field-hockey players. Eur J Appl Physiol 120 (1):295-305. doi:10.1007/s00421-019-04274-8

Krustrup P, Mohr M, Amstrup T, Rysgaard T, Johansen J, Steensberg A, Pedersen PK, Bangsbo J (2003) The yo-yo intermittent recovery test: physiological response, reliability, and validity. Med Sci Sports Exerc 35 (4):697-705. doi:10.1249/01.MSS.0000058441.94520.32

Lambert M, Borresen J (2016) A Theoretical Basis of Monitoring Fatigue: A Practical Approach for Coaches. International Journal of Sports Science & Coaching 1 (4):371-388. doi:10.1260/174795406779367684

Laukkanen JA, Laukkanen T, Kunutsor SK (2018) Cardiovascular and Other Health Benefits of Sauna Bathing: A Review of the Evidence. Mayo Clin Proc 93 (8):1111-1121. doi:10.1016/j.mayocp.2018.04.008

Le Meur Y, Louis J, Schaal K, Bieuzen F, Filliard J-R, Brisswalter J, Hausswirth C (2017) Whole-body cryotherapy multi exposures speed up performance supercompensation during the taper in functionally overreached endurance athletes. Sport Perf Sci Rep 6

Leeder J, Gissane C, van Someren K, Gregson W, Howatson G (2012) Cold water immersion and recovery from strenuous exercise: a meta-analysis. Br J Sports Med 46 (4):233-240. doi:10.1136/bjsports-2011-090061

Leeder JDC, Godfrey M, Gibbon D, Gaze D, Davison GW, Van Someren KA, Howatson G (2019) Cold water immersion improves recovery of sprint speed following a simulated tournament. Eur J Sport Sci 19 (9):1166-1174. doi:10.1080/17461391.2019.1585478

Lieber RL, Woodburn TM, Friden J (1991) Muscle damage induced by eccentric contractions of 25% strain. J Appl Physiol (1985) 70 (6):2498-2507. doi:10.1152/jappl.1991.70.6.2498

Louis J, Schaal K, Bieuzen F, Le Meur Y, Filliard JR, Volondat M, Brisswalter J, Hausswirth C (2015) Head Exposure to Cold during Whole-Body Cryostimulation: Influence on Thermal Response and Autonomic Modulation. PLoS One 10 (4):e0124776. doi:10.1371/journal.pone.0124776

Lum D, Landers G, Peeling P (2010) Effects of a recovery swim on subsequent running performance. Int J Sports Med 31 (1):26-30. doi:10.1055/s-0029-1239498

Lyons M, Al-Nakeeb Y, Hankey J, Nevill A (2013) The effect of moderate and high-intensity fatigue on groundstroke accuracy in expert and non-expert tennis players. J Sports Sci Med 12 (2):298-308

Macdonald GZ, Button DC, Drinkwater EJ, Behm DG (2014) Foam rolling as a recovery tool after an intense bout of physical activity. Med Sci Sports Exerc 46 (1):131-142. doi:10.1249/MSS.0b013e3182a123db

Machado AF, Ferreira PH, Micheletti JK, de Almeida AC, Lemes IR, Vanderlei FM, Netto Junior J, Pastre CM (2016) Can Water Temperature and Immersion Time Influence the Effect of Cold Water Immersion on Muscle Soreness? A Systematic Review and Meta-Analysis. Sports Med 46 (4):503-514. doi:10.1007/s40279-015-0431-7

MacRae BA, Cotter JD, Laing RM (2011) Compression garments and exercise: garment considerations, physiology and performance. Sports Med 41 (10):815-843. doi:10.2165/11591420-000000000-00000

Main LC, Warmington SA, Korn E, Gastin PB (2016) Utility of the multi-component training distress scale to monitor swimmers during periods of training overload. Res Sports Med 24 (3):269-280. doi:10.1080/15438627.2016.1202828

Malone JJ, Di Michele R, Morgans R, Burgess D, Morton JP, Drust B (2015) Seasonal training-load quantification in elite English premier league soccer players. Int J Sports Physiol Perform 10 (4):489-497. doi:10.1123/ijspp.2014-0352

Mann TN, Lamberts RP, Lambert MI (2014) High responders and low responders: factors associated with individual variation in response to standardized training. Sports Med 44 (8):1113-1124. doi:10.1007/s40279-014-0197-3

Marcora S (2009) Perception of effort during exercise is independent of afferent feedback from skeletal muscles, heart, and lungs. J Appl Physiol (1985) 106 (6):2060-2062. doi:10.1152/japplphysiol.90378.2008

Marques-Jimenez D, Calleja-Gonzalez J, Arratibel I, Delextrat A, Terrados N (2016) Are compression garments effective for the recovery of exercise-induced muscle damage? A systematic review with meta-analysis. Physiol Behav 153:133-148. doi:10.1016/j.physbeh.2015.10.027

Martin C (2018) Tennis: Optimisation de la performance. De Boeck supérieur,

Martin C, Prioux J (2011) Physiological aspects of competitive tennis : review of the recent literature. J Med Sci Tennis 16 (3)

Martin JS, Friedenreich ZD, Borges AR, Roberts MD (2015) Acute Effects of Peristaltic Pneumatic Compression on Repeated Anaerobic Exercise Performance and Blood Lactate Clearance. J Strength Cond Res 29 (10):2900-2906. doi:10.1519/JSC.0000000000000928

Martínez-Gallego R, Guzmán J, James N, Pers J, Ramón-Llin J, Vučković G (2013) Movement Characteristics of Elite Tennis Players on Hard Courts with Respect to the Direction of Ground Strokes. Journal of sports science & medicine 12:275-281

Mawhinney C, Low DA, Jones H, Green DJ, Costello JT, Gregson W (2017) Cold Water Mediates Greater Reductions in Limb Blood Flow than Whole Body Cryotherapy. Med Sci Sports Exerc 49 (6):1252-1260. doi:10.1249/MSS.0000000000001223

Meeusen R, Duclos M, Foster C, Fry A, Gleeson M, Nieman D, Raglin J, Rietjens G, Steinacker J, Urhausen A, European College of Sport S, American College of Sports M (2013) Prevention, diagnosis, and treatment of the overtraining syndrome: joint consensus statement of the European College of Sport Science and the American College of Sports Medicine. Med Sci Sports Exerc 45 (1):186-205. doi:10.1249/MSS.0b013e318279a10a

Meeusen R, Roelands B (2010) Central fatigue and neurotransmitters, can thermoregulation be manipulated? Scand J Med Sci Sports 20 Suppl 3:19-28. doi:10.1111/j.1600-0838.2010.01205.x

Mendez-Villanueva A, Fernandez-Fernandez J, Bishop D (2007a) Exercise-induced homeostatic perturbations provoked by singles tennis match play with reference to development of fatigue. Br J Sports Med 41 (11):717-722; discussion 722. doi:10.1136/bjsm.2007.037259

Mendez-Villanueva A, Fernandez-Fernandez J, Bishop D, Fernandez-Garcia B (2010) Ratings of perceived exertion-lactate association during actual singles tennis match play. J Strength Cond Res 24 (1):165-170. doi:10.1519/JSC.0b013e3181a5bc6d

Mendez-Villanueva A, Fernandez-Fernandez J, Bishop D, Fernandez-Garcia B, Terrados N (2007b) Activity patterns, blood lactate concentrations and ratings of perceived exertion during a professional singles tennis tournament. Br J Sports Med 41 (5):296-300; discussion 300. doi:10.1136/bjsm.2006.030536

Menetrier A, Mourot L, Degano B, Bouhaddi M, Walther G, Regnard J, Tordi N (2015) Effects of three postexercice recovery treatments on femoral artery blood flow kinetics. The Journal of sports medicine and physical fitness 55 (4):258-266

Merton PA (1954) Voluntary strength and fatigue. J Physiol 123 (3):553-564. doi:10.1113/jphysiol.1954.sp005070

Millet GY, Lepers R (2004) Alterations of neuromuscular function after prolonged running, cycling and skiing exercises. Sports Med 34 (2):105-116. doi:10.2165/00007256-200434020-00004

Minett GM, Duffield R (2014) Is recovery driven by central or peripheral factors? A role for the brain in recovery following intermittent-sprint exercise. Front Physiol 5:24. doi:10.3389/fphys.2014.00024

Mitchell JB, Cole KJ, Grandjean PW, Sobczak RJ (1992) The Effect of a Carbohydrate Beverage on Tennis Performance and Fluid Balance During Prolonged Tennis Play. The Journal of Strength & Conditioning Research 6 (3):174-180

Montgomery PG, Pyne DB, Cox AJ, Hopkins WG, Minahan CL, Hunt PH (2008a) Muscle damage, inflammation, and recovery interventions during a 3-day basketball tournament. European Journal of Sport Science 8 (5):241-250. doi:10.1080/17461390802251844

Montgomery PG, Pyne DB, Hopkins WG, Dorman JC, Cook K, Minahan CL (2008b) The effect of recovery strategies on physical performance and cumulative fatigue in competitive basketball. J Sports Sci 26 (11):1135-1145. doi:10.1080/02640410802104912

Morante SM, Brotherhood, John R., Brotherhood, J. Match Characteristics of Professional Singles Tennis

In, 2005.

Morton RH (1997) Modeling training and overtraining. J Sports Sci 15 (3):335-340. doi:10.1080/026404197367344

Morton RH, Fitz-Clarke JR, Banister EW (1990) Modeling human performance in running. J Appl Physiol (1985) 69 (3):1171-1177. doi:10.1152/jappl.1990.69.3.1171

Mujika I, Halson S, Burke LM, Balague G, Farrow D (2018) An Integrated, Multifactorial Approach to Periodization for Optimal Performance in Individual and Team Sports. Int J Sports Physiol Perform 13 (5):538-561. doi:10.1123/ijspp.2018-0093

Murias JM, Lanatta D, Arcuri CR, Laino FA (2007) Metabolic and functional responses playing tennis on different surfaces. J Strength Cond Res 21 (1):112-117. doi:10.1519/00124278-200702000-00021

Murphy A (2015) Load monitoring in high performance youth tennis players: Preparation for competition readiness.

Murphy AP, Duffield R, Kellett A, Gescheit D, Reid M (2015a) The Effect of Predeparture Training Loads on Posttour Physical Capacities in High-Performance Junior Tennis Players. Int J Sports Physiol Perform 10 (8):986-993. doi:10.1123/ijspp.2014-0374

Murphy AP, Duffield R, Kellett A, Reid M (2014a) Comparison of Athlete–Coach Perceptions of Internal and External Load Markers for Elite Junior Tennis Training. International Journal of Sports Physiology and Performance 9 (5):751-756. doi:10.1123/ijspp.2013-0364

Murphy AP, Duffield R, Kellett A, Reid M (2014b) A descriptive analysis of internal and external loads for elite-level tennis drills. Int J Sports Physiol Perform 9 (5):863-870. doi:10.1123/ijspp.2013-0452

Murphy AP, Duffield R, Kellett A, Reid M (2015b) The relationship of training load to physical-capacity changes during international tours in high-performance junior tennis players. Int J Sports Physiol Perform 10 (2):253-260. doi:10.1123/ijspp.2014-0038

Murphy AP, Duffield R, Kellett A, Reid M (2016) A Comparison of the Perceptual and Technical Demands of Tennis Training, Simulated Match Play, and Competitive Tournaments. Int J Sports Physiol Perform 11 (1):40-47. doi:10.1123/ijspp.2014-0464

Nässi A, Ferrauti A, Meyer T, Pfeiffer M, Kellmann M (2017) Psychological tools used for monitoring training responses of athletes. Performance Enhancement & Health 5 (4):125-133. doi:10.1016/j.peh.2017.05.001

Nedelec M, Halson S, Delecroix B, Abaidia AE, Ahmaidi S, Dupont G (2015) Sleep Hygiene and Recovery Strategies in Elite Soccer Players. Sports Med 45 (11):1547-1559. doi:10.1007/s40279-015-0377-9

Nedelec M, McCall A, Carling C, Legall F, Berthoin S, Dupont G (2012) Recovery in soccer: part I - post-match fatigue and time course of recovery. Sports Med 42 (12):997-1015. doi:10.2165/11635270-000000000-00000

Nedelec M, McCall A, Carling C, Legall F, Berthoin S, Dupont G (2013) Recovery in soccer : part ii-recovery strategies. Sports Med 43 (1):9-22. doi:10.1007/s40279-012-0002-0

Newham DJ, Mills KR, Quigley BM, Edwards RH (1983) Pain and fatigue after concentric and eccentric muscle contractions. Clin Sci (Lond) 64 (1):55-62. doi:10.1042/cs0640055

Noakes TD (2012) Fatigue is a Brain-Derived Emotion that Regulates the Exercise Behavior to Ensure the Protection of Whole Body Homeostasis. Front Physiol 3:82. doi:10.3389/fphys.2012.00082

Novas AM, Rowbottom DG, Jenkins DG (2003) A practical method of estimating energy expenditure during tennis play. J Sci Med Sport 6 (1):40-50. doi:10.1016/s1440-2440(03)80007-5

Nybo L (2008) Hyperthermia and fatigue. J Appl Physiol (1985) 104 (3):871-878. doi:10.1152/japplphysiol.00910.2007

Nybo L, Nielsen B (2001) Perceived exertion is associated with an altered brain activity during exercise with progressive hyperthermia. J Appl Physiol (1985) 91 (5):2017-2023. doi:10.1152/jappl.2001.91.5.2017

Ogai R, Yamane M, Matsumoto T, Kosaka M (2008) Effects of petrissage massage on fatigue and exercise performance following intensive cycle pedalling. Br J Sports Med 42 (10):834-838. doi:10.1136/bjsm.2007.044396

Ojala T, Hakkinen K (2013) Effects of the tennis tournament on players' physical performance, hormonal responses, muscle damage and recovery. J Sports Sci Med 12 (2):240-248

Opplert J, Babault N (2018) Acute Effects of Dynamic Stretching on Muscle Flexibility and Performance: An Analysis of the Current Literature. Sports Med 48 (2):299-325. doi:10.1007/s40279-017-0797-9

P OD, Ingram B (2001) A notational analysis of elite tennis strategy. J Sports Sci 19 (2):107-115. doi:10.1080/026404101300036299

Partridge EM, Cooke J, McKune A, Pyne DB (2019) Whole-Body Cryotherapy: Potential to Enhance Athlete Preparation for Competition? Front Physiol 10:1007. doi:10.3389/fphys.2019.01007

Paulsen G, Mikkelsen UR, Raastad T, Peake JM (2012) Leucocytes, cytokines and satellite cells: what role do they play in muscle damage and regeneration following eccentric exercise? Exerc Immunol Rev 18:42-97

Peacock CA, Krein DD, Silver TA, Sanders GJ, KA VONC (2014) An Acute Bout of Self-Myofascial Release in the Form of Foam Rolling Improves Performance Testing. International journal of exercise science 7 (3):202-211

Peake JM (2017) Cryotherapy: Are we freezing the benefits of exercise? Temperature (Austin) 4 (3):211-213. doi:10.1080/23328940.2017.1304194

Peake JM, Roberts LA, Figueiredo VC, Egner I, Krog S, Aas SN, Suzuki K, Markworth JF, Coombes JS, Cameron-Smith D, Raastad T (2017) The effects of cold water immersion and active recovery on inflammation and cell stress responses in human skeletal muscle after resistance exercise. J Physiol 595 (3):695-711. doi:10.1113/JP272881

Pereira TJ, Nakamura FY, de Jesus MT, Vieira CL, Misuta MS, de Barros RM, Moura FA (2017) Analysis of the distances covered and technical actions performed by professional tennis players during official matches. J Sports Sci 35 (4):361-368. doi:10.1080/02640414.2016.1165858

Periard JD, Girard O, Racinais S (2014a) Neuromuscular adjustments of the knee extensors and plantar flexors following match-play tennis in the heat. Br J Sports Med 48 Suppl 1:i45-i51. doi:10.1136/bjsports-2013-093160

Periard JD, Racinais S, Knez WL, Herrera CP, Christian RJ, Girard O (2014b) Coping with heat stress during match-play tennis: does an individualised hydration regimen enhance performance and recovery? Br J Sports Med 48 Suppl 1:i64-70. doi:10.1136/bjsports-2013-093242

Petrofsky J, Berk L, Bains G, Khowailed IA, Hui T, Granado M, Laymon M, Lee H (2013) Moist heat or dry heat for delayed onset muscle soreness. J Clin Med Res 5 (6):416-425. doi:10.4021/jocmr1521w

Place N, Maffiuletti NA, Martin A, Lepers R (2007) Assessment of the reliability of central and peripheral fatigue after sustained maximal voluntary contraction of the quadriceps muscle. Muscle Nerve 35 (4):486-495. doi:10.1002/mus.20714

Plisk SS, Stone MH (2003) Periodization Strategies. Strength and Conditioning Journal 25 (6). doi:10.1519/00126548-200312000-00005

Pointon M, Duffield R (2012) Cold water immersion recovery after simulated collision sport exercise. Med Sci Sports Exerc 44 (2):206-216. doi:10.1249/MSS.0b013e31822b0977

Ponzano M, Gollin M (2017) Movement analysis and metabolic profile of tennis match play: comparison between hard courts and clay courts. International Journal of Performance Analysis in Sport 17 (3):220-231. doi:10.1080/24748668.2017.1331572

Pooley S, Spendiff O, Allen M, Moir HJ (2019) Comparative efficacy of active recovery and cold water immersion as post-match recovery interventions in elite youth soccer. J Sports Sci:1-9. doi:10.1080/02640414.2019.1660448

Poppendieck W, Faude O, Wegmann M, Meyer T (2013) Cooling and performance recovery of trained athletes: a meta-analytical review. Int J Sports Physiol Perform 8 (3):227-242. doi:10.1123/ijspp.8.3.227

Poppendieck W, Wegmann M, Ferrauti A, Kellmann M, Pfeiffer M, Meyer T (2016) Massage and Performance Recovery: A Meta-Analytical Review. Sports Med 46 (2):183-204. doi:10.1007/s40279-015-0420-x

Pournot H, Bieuzen F, Duffield R, Lepretre PM, Cozzolino C, Hausswirth C (2011a) Short term effects of various water immersions on recovery from exhaustive intermittent exercise. Eur J Appl Physiol 111 (7):1287-1295. doi:10.1007/s00421-010-1754-6

Pournot H, Bieuzen F, Louis J, Mounier R, Fillard JR, Barbiche E, Hausswirth C (2011b) Time-course of changes in inflammatory response after whole-body cryotherapy multi exposures following severe exercise. PLoS One 6 (7):e22748. doi:10.1371/journal.pone.0022748

Pugh SF, Kovaleski JE, Heitman RJ, Gilley WF (2003) Upper and lower body strength in relation to ball speed during a serve by male collegiate tennis players. Percept Mot Skills 97 (3 Pt 1):867-872. doi:10.2466/pms.2003.97.3.867

Pyne DB, Lee H, Swanwick KM (2001) Monitoring the lactate threshold in world-ranked swimmers. Med Sci Sports Exerc 33 (2):291-297. doi:10.1097/00005768-200102000-00019

Rampinini E, Alberti G, Fiorenza M, Riggio M, Sassi R, Borges TO, Coutts AJ (2015) Accuracy of GPS devices for measuring high-intensity running in field-based team sports. Int J Sports Med 36 (1):49-53. doi:10.1055/s-0034-1385866

Rampinini E, Bosio A, Ferraresi I, Petruolo A, Morelli A, Sassi A (2011) Match-related fatigue in soccer players. Med Sci Sports Exerc 43 (11):2161-2170. doi:10.1249/MSS.0b013e31821e9c5c

Reid M, Duffield R (2014) The development of fatigue during match-play tennis. Br J Sports Med 48 Suppl 1:i7-11. doi:10.1136/bjsports-2013-093196

Reid M, Duffield R, Dawson B, Baker J, Crespo M (2008) Quantification of the physiological and performance characteristics of on-court tennis drills. Br J Sports Med 42 (2):146-151; discussion 151. doi:10.1136/bjsm.2007.036426

Reid M, Morgan S, Whiteside D (2016) Matchplay characteristics of Grand Slam tennis: implications for training and conditioning. J Sports Sci 34 (19):1791-1798. doi:10.1080/02640414.2016.1139161

Reid M, Quinlan G, Kearney S, Jones D (2009) Planning and Periodization for the Elite Junior Tennis Player. Strength and Conditioning Journal 31 (4):69-76. doi:10.1519/SSC.0b013e3181afc98d

Reid MM, Duffield R, Minett GM, Sibte N, Murphy AP, Baker J (2013) Physiological, perceptual, and technical responses to on-court tennis training on hard and clay courts. J Strength Cond Res 27 (6):1487-1495. doi:10.1519/JSC.0b013e31826caedf

Roberts LA, Raastad T, Markworth JF, Figueiredo VC, Egner IM, Shield A, Cameron-Smith D, Coombes JS, Peake JM (2015) Post-exercise cold water immersion attenuates acute anabolic signalling and long-term adaptations in muscle to strength training. J Physiol 593 (18):4285-4301. doi:10.1113/JP270570

Roetert EP, Kovacs M (2019) Tennis Anatomy. Human Kinetics, Incorporated,

Roetert EP, Kovacs M, Knudson D, Groppel JL (2009) Biomechanics of the Tennis Groundstrokes: Implications for Strength Training. Strength and Conditioning Journal 31 (4):41-49. doi:10.1519/SSC.0b013e3181aff0c3

Romero SA, Minson CT, Halliwill JR (2017) The cardiovascular system after exercise. J Appl Physiol (1985) 122 (4):925-932. doi:10.1152/japplphysiol.00802.2016

Rose C, Edwards KM, Siegler J, Graham K, Caillaud C (2017) Whole-body Cryotherapy as a Recovery Technique after Exercise: A Review of the Literature. Int J Sports Med 38 (14):1049-1060. doi:10.1055/s-0043-114861

Rowell LB (1974) Human cardiovascular adjustments to exercise and thermal stress. Physiol Rev 54 (1):75-159. doi:10.1152/physrev.1974.54.1.75

Rowsell GJ, Coutts AJ, Reaburn P, Hill-Haas S (2009) Effects of cold-water immersion on physical performance between successive matches in high-performance junior male soccer players. J Sports Sci 27 (6):565-573. doi:10.1080/02640410802603855

Rowsell GJ, Coutts AJ, Reaburn P, Hill-Haas S (2011) Effect of post-match cold-water immersion on subsequent match running performance in junior soccer players during tournament play. J Sports Sci 29 (1):1-6. doi:10.1080/02640414.2010.512640

Rupp KA, Selkow NM, Parente WR, Ingersoll CD, Weltman AL, Saliba SA (2012) The effect of cold water immersion on 48-hour performance testing in collegiate soccer players. J Strength Cond Res 26 (8):2043-2050. doi:10.1519/JSC.0b013e318239c3a1

Russell M, Birch J, Love T, Cook CJ, Bracken RM, Taylor T, Swift E, Cockburn E, Finn C, Cunningham D, Wilson L, Kilduff LP (2017) The Effects of a Single Whole-Body Cryotherapy Exposure on Physiological, Performance, and Perceptual Responses of Professional Academy Soccer Players After Repeated Sprint Exercise. J Strength Cond Res 31 (2):415-421. doi:10.1519/JSC.0000000000001505

Rutkove SB (2001) Effects of temperature on neuromuscular electrophysiology. Muscle Nerve 24 (7):867-882. doi:10.1002/mus.1084

Sahlin K (1992) Metabolic factors in fatigue. Sports Med 13 (2):99-107. doi:10.2165/00007256-199213020-00005

Sands WA, McNeal JR, Murray SR, Ramsey MW, Sato K, Mizuguchi S, Stone MH (2013) Stretching and Its Effects on Recovery. Strength and Conditioning Journal 35 (5):30-36. doi:10.1519/ssc.0000000000000004

Saw AE, Main LC, Gastin PB (2016) Monitoring the athlete training response: subjective self-reported measures trump commonly used objective measures: a systematic review. Br J Sports Med 50 (5):281-291. doi:10.1136/bjsports-2015-094758

Schaal K, Y LEM, Louis J, Filliard JR, Hellard P, Casazza G, Hausswirth C (2015) Whole-Body Cryostimulation Limits Overreaching in Elite Synchronized Swimmers. Med Sci Sports Exerc 47 (7):1416-1425. doi:10.1249/MSS.0000000000000546

Sellwood KL, Brukner P, Williams D, Nicol A, Hinman R (2007) Ice-water immersion and delayed-onset muscle soreness: a randomised controlled trial. Br J Sports Med 41 (6):392-397. doi:10.1136/bjsm.2006.033985

Selye H (1984) The stress of life. McGraw-Hill,

Sheldon RD, Roseguini BT, Thyfault JP, Crist BD, Laughlin MH, Newcomer SC (2012) Acute impact of intermittent pneumatic leg compression frequency on limb hemodynamics, vascular function, and skeletal muscle gene expression in humans. J Appl Physiol (1985) 112 (12):2099-2109. doi:10.1152/japplphysiol.00042.2012

Simjanovic M, Hooper S, Leveritt M, Kellmann M, Rynne S (2009) The use and perceived effectiveness of recovery modalities and monitoring techniques in elite sport. Journal of Science and Medicine in Sport 12. doi:10.1016/j.jsams.2008.12.057

Skorski S, Mujika I, Bosquet L, Meeusen R, Coutts AJ, Meyer T (2019a) The Temporal Relationship Between Exercise, Recovery Processes, and Changes in Performance. Int J Sports Physiol Perform 14 (8):1015-1021. doi:10.1123/ijspp.2018-0668

Skorski S, Schimpchen J, Pfeiffer M, Ferrauti A, Kellmann M, Meyer T (2019b) Effects of Postexercise Sauna Bathing on Recovery of Swim Performance. Int J Sports Physiol Perform:1-7. doi:10.1123/ijspp.2019-0333

Smekal G, von Duvillard SP, Rihacek C, Pokan R, Hofmann P, Baron R, Tschan H, Bachl N (2001) A physiological profile of tennis match play. Med Sci Sports Exerc 33 (6):999-1005. doi:10.1097/00005768-200106000-00020

Smith DJ (2003) A framework for understanding the training process leading to elite performance. Sports Med 33 (15):1103-1126. doi:10.2165/00007256-200333150-00003

St Clair Gibson A, Baden DA, Lambert MI, Lambert EV, Harley YX, Hampson D, Russell VA, Noakes TD (2003) The conscious perception of the sensation of fatigue. Sports Med 33 (3):167-176. doi:10.2165/00007256-200333030-00001

St Clair Gibson A, Noakes TD (2004) Evidence for complex system integration and dynamic neural regulation of skeletal muscle recruitment during exercise in humans. Br J Sports Med 38 (6):797-806. doi:10.1136/bjsm.2003.009852

Stanley J, Buchheit M, Peake JM (2012) The effect of post-exercise hydrotherapy on subsequent exercise performance and heart rate variability. Eur J Appl Physiol 112 (3):951-961. doi:10.1007/s00421-011-2052-7

Stanley J, Peake JM, Coombes JS, Buchheit M (2014) Central and peripheral adjustments during high-intensity exercise following cold water immersion. Eur J Appl Physiol 114 (1):147-163. doi:10.1007/s00421-013-2755-z

Stephens JM, Halson S, Miller J, Slater GJ, Askew CD (2017) Cold-Water Immersion for Athletic Recovery: One Size Does Not Fit All. Int J Sports Physiol Perform 12 (1):2-9. doi:10.1123/ijspp.2016-0095

Stephens JM, Halson SL, Miller J, Slater GJ, Chapman DW, Askew CD (2018) Effect of Body Composition on Physiological Responses to Cold-Water Immersion and the Recovery of Exercise Performance. Int J Sports Physiol Perform 13 (3):382-389. doi:10.1123/ijspp.2017-0083

Struder HK, Ferrauti A, Gotzmann A, Weber K, Hollmann W (1998) Effect of Carbohydrates and Caffeine on Plasma Amino Acids, Neuroendocrine Responses and Performance in Tennis. Nutr Neurosci 1 (6):419-426. doi:10.1080/1028415X.1998.11747252

Swart J, Lindsay TR, Lambert MI, Brown JC, Noakes TD (2012) Perceptual cues in the regulation of exercise performance - physical sensations of exercise and

awareness of effort interact as separate cues. Br J Sports Med 46 (1):42-48. doi:10.1136/bjsports-2011-090337
Tavares F, Beaven M, Teles J, Baker D, Healey P, Smith TB, Driller M (2019) Effects of Chronic Cold-Water Immersion in Elite Rugby Players. Int J Sports Physiol Perform 14 (2):156-162. doi:10.1123/ijspp.2018-0313
Tavares F, Healey P, Smith TB, Driller M (2017) The usage and perceived effectiveness of different recovery modalities in amateur and elite Rugby athletes. Performance Enhancement & Health 5 (4):142-146. doi:10.1016/j.peh.2017.04.002
Tennis FFd Entrainement physique du joueur de tennis.
Tessitore A, Meeusen R, Cortis C, Capranica L (2007) Effects of different recovery interventions on anaerobic performances following preseason soccer training. J Strength Cond Res 21 (3):745-750. doi:10.1519/R-20386.1
Tessitore A, Meeusen R, Pagano R, Benvenuti C, Tiberi M, Capranica L (2008) Effectiveness of active versus passive recovery strategies after futsal games. J Strength Cond Res 22 (5):1402-1412. doi:10.1519/JSC.0b013e31817396ac
Thorpe RT, Strudwick AJ, Buchheit M, Atkinson G, Drust B, Gregson W (2015) Monitoring Fatigue During the In-Season Competitive Phase in Elite Soccer Players. Int J Sports Physiol Perform 10 (8):958-964. doi:10.1123/ijspp.2015-0004
Thorpe RT, Strudwick AJ, Buchheit M, Atkinson G, Drust B, Gregson W (2016) Tracking Morning Fatigue Status Across In-Season Training Weeks in Elite Soccer Players. Int J Sports Physiol Perform 11 (7):947-952. doi:10.1123/ijspp.2015-0490
Tomazin K, Morin JB, Strojnik V, Podpecan A, Millet GY (2012) Fatigue after short (100-m), medium (200-m) and long (400-m) treadmill sprints. Eur J Appl Physiol 112 (3):1027-1036. doi:10.1007/s00421-011-2058-1
Twist C, Eston R (2005) The effects of exercise-induced muscle damage on maximal intensity intermittent exercise performance. Eur J Appl Physiol 94 (5-6):652-658. doi:10.1007/s00421-005-1357-9
Twist C, Highton J (2013) Monitoring fatigue and recovery in rugby league players. Int J Sports Physiol Perform 8 (5):467-474. doi:10.1123/ijspp.8.5.467
Vaile J, Halson S, Gill N, Dawson B (2008) Effect of hydrotherapy on recovery from fatigue. Int J Sports Med 29 (7):539-544. doi:10.1055/s-2007-989267
Van Hooren B, Peake JM (2018) Do We Need a Cool-Down After Exercise? A Narrative Review of the Psychophysiological Effects and the Effects on Performance, Injuries and the Long-Term Adaptive Response. Sports Med 48 (7):1575-1595. doi:10.1007/s40279-018-0916-2
Van Wyk DV, Lambert M (2009) Recovery strategies implemented by sport support staff of elite rugby players in South Africa, vol 65. doi:10.4102/sajp.v65i1.78
Venter R, Potgieter JR, Barnard G (2010) The use of recovery modalities by elite South african team athletes. South African Journal for Research in Sport 32(1)
Venter RE (2014) Perceptions of team athletes on the importance of recovery modalities. Eur J Sport Sci 14 Suppl 1:S69-76. doi:10.1080/17461391.2011.643924
Vergauwen L, Brouns F, Hespel P (1998) Carbohydrate supplementation improves stroke performance in tennis. Med Sci Sports Exerc 30 (8):1289-1295. doi:10.1097/00005768-199808000-00017
Vescovi JD (2017) Acute:chronic training loads in tennis: which metrics should we monitor? Br J Sports Med 51 (18):1321-1322. doi:10.1136/bjsports-2017-097596

Vickery WM, Dascombe BJ, Baker JD, Higham DG, Spratford WA, Duffield R (2014) Accuracy and reliability of GPS devices for measurement of sports-specific movement patterns related to cricket, tennis, and field-based team sports. J Strength Cond Res 28 (6):1697-1705. doi:10.1519/JSC.0000000000000285

Viru A, Viru M (2000) Nature of training effects. In. pp 67-95

Vollestad NK (1997) Measurement of human muscle fatigue. J Neurosci Methods 74 (2):219-227. doi:10.1016/s0165-0270(97)02251-6

Warren CD, Brown LE, Landers MR, Stahura KA (2011) Effect of three different between-inning recovery methods on baseball pitching performance. J Strength Cond Res 25 (3):683-688. doi:10.1519/JSC.0b013e318208adfe

Warren GL, Lowe DA, Armstrong RB (1999) Measurement tools used in the study of eccentric contraction-induced injury. Sports Med 27 (1):43-59. doi:10.2165/00007256-199927010-00004

Webb NP, Harris NK, Cronin JB, Walker C (2013) The relative efficacy of three recovery modalities after professional rugby league matches. J Strength Cond Res 27 (9):2449-2455. doi:10.1519/JSC.0b013e31827f5253

Weber K, Pieper, S., Exler, T. (2007) Characteristics and significance of running speed at the Australian Open 2006 for training and injury prevention. Journal of medicine and science in tennis 12 (1):15-18

Weerapong P, Hume PA, Kolt GS (2005) The mechanisms of massage and effects on performance, muscle recovery and injury prevention. Sports Med 35 (3):235-256. doi:10.2165/00007256-200535030-00004

Westerblad H, Lee JA, Lannergren J, Allen DG (1991) Cellular mechanisms of fatigue in skeletal muscle. The American journal of physiology 261 (2 Pt 1):C195-209. doi:10.1152/ajpcell.1991.261.2.C195

Whiteside D, Cant O, Connolly M, Reid M (2017) Monitoring Hitting Load in Tennis Using Inertial Sensors and Machine Learning. Int J Sports Physiol Perform 12 (9):1212-1217. doi:10.1123/ijspp.2016-0683

Whiteside D, Reid M (2017) External Match Workloads During the First Week of Australian Open Tennis Competition. Int J Sports Physiol Perform 12 (6):756-763. doi:10.1123/ijspp.2016-0259

Wiewelhove T, Doweling 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. doi:10.3389/fphys.2019.00376

Wilcock IM, Cronin JB, Hing WA (2006) Physiological response to water immersion: a method for sport recovery? Sports Med 36 (9):747-765. doi:10.2165/00007256-200636090-00003

Williamson A, Hoggart B (2005) Pain: a review of three commonly used pain rating scales. J Clin Nurs 14 (7):798-804. doi:10.1111/j.1365-2702.2005.01121.x

Wilson LJ, Cockburn E, Paice K, Sinclair S, Faki T, Hills FA, Gondek MB, Wood A, Dimitriou L (2018) Recovery following a marathon: a comparison of cold water immersion, whole body cryotherapy and a placebo control. Eur J Appl Physiol 118 (1):153-163. doi:10.1007/s00421-017-3757-z

Wilson LJ, Dimitriou L, Hills FA, Gondek MB, Cockburn E (2019) Whole body cryotherapy, cold water immersion, or a placebo following resistance exercise: a case of mind over matter? Eur J Appl Physiol 119 (1):135-147. doi:10.1007/s00421-018-4008-7

Wu CL, Shih MC, Yang CC, Huang MH, Chang CK (2010) Sodium bicarbonate supplementation prevents skilled tennis performance decline after a simulated match. J Int Soc Sports Nutr 7:33. doi:10.1186/1550-2783-7-33

Ziemann E, Olek RA, Kujach S, Grzywacz T, Antosiewicz J, Garsztka T, Laskowski R (2012) Five-day whole-body cryostimulation, blood inflammatory markers, and performance in high-ranking professional tennis players. J Athl Train 47 (6):664-672. doi:10.4085/1062-6050-47.6.13

Zuj KA, Prince CN, Hughson RL, Peterson SD (2018) Enhanced muscle blood flow with intermittent pneumatic compression of the lower leg during plantar flexion exercise and recovery. J Appl Physiol (1985) 124 (2):302-311. doi:10.1152/japplphysiol.00784.2017

Annexes

Figure 1a. Capture d'écran de la version préliminaire de l'application utilisée dans l'étude 1 et l'étude 2 : Questionnaire récupération. Après la journée d'entraînement et avant sa récupération, le joueur détaillait l'ensemble des techniques de récupération qu'il allait utiliser.

Figure 1b. Capture d'écran de la version préliminaire de l'application utilisée dans l'étude 1 et l'étude 2 : Questionnaire subjectif. Après la journée d'entraînement (étude 1) ou le match simulé (étude 2) et avant sa récupération, le joueur renseignait dans un ordre aléatoire ses sensations de douleurs musculaires, fatigue générale et de stress (Hooper and Mackinnon 1995).

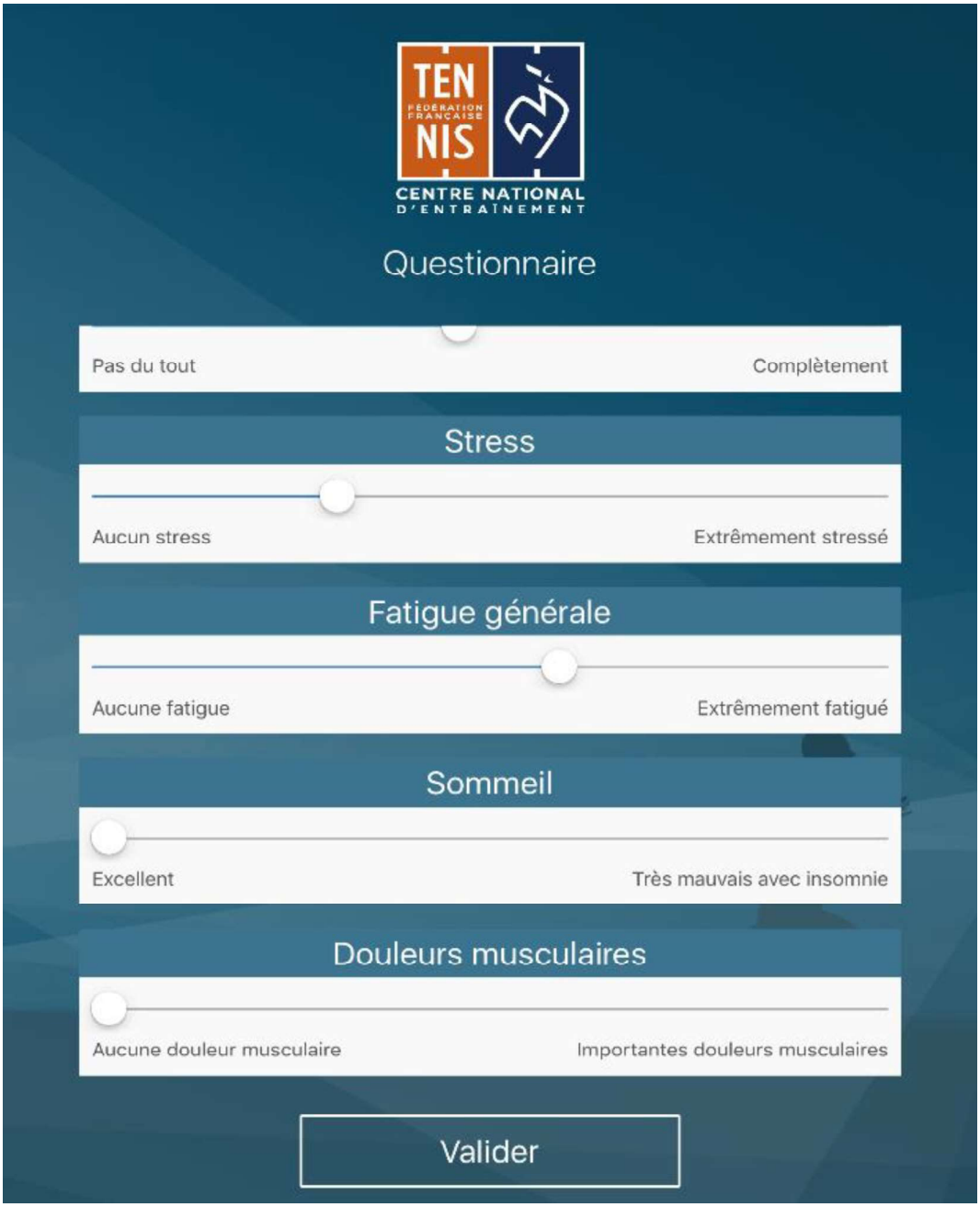


Figure 1c. Capture d'écran de la version préliminaire de l'application utilisée dans l'étude 1 et l'étude 2 : Questionnaire subjectif. Après le début du premier entraînement (étude 1) ou avant la première mesure « PRE » (étude 2), le joueur renseignait à nouveau, dans un ordre aléatoire, ses sensations de douleurs musculaires, fatigue générale et stress (Hooper and Mackinnon 1995) ainsi que sa sensation de récupération (non visible sur cette figure) (Bleakley et al. 2014; Abaidia et al. 2017)

Oral presentations

OP-PM36 Temperature modulation

THE EFFECTS OF WHOLE-BODY CRYOTHERAPY ON ADAPTATIONS TO HIGH-INTENSITY INTERVAL TRAINING

POIGNARD, M.

FRENCH INSTITUTE OF SPORT

INTRODUCTION: Post-exercise WBC has been reported to improve measures of athletic performance (Kruger, de Marees et al. 2015) and has become an emerging recovery modality among elite athletes. Some recent studies (Ihsan, Watson et al. 2014) indicate that an acute post-exercise cooling intervention may serve as a stimulus to augment training-induced aerobic adaptations, as measured by an improvement in endurance exercise performance. The aim of this study was to investigate the effects of regular post-exercise whole-body cryotherapy (WBC) on physiological and performance adaptations to high-intensity interval training (HIT).
METHODS: Twenty two males (mean ± SD; age ± y; T˙O2peak ± mL·kg-1·min-1) performed four weeks of HIT, with each session immediately followed by one of two 3-min recovery conditions; WBC or a passive control (CON). Physiological (m˙O2peak) parameters, performance (20-km time trial, TT20) and blood analyses were performed before and after the training HIT period.
RESULTS: R˙O2peak increased significantly as a result of training by 5.0 ± 5.6 % in the CON group and 8.0 ± 7.9% in the WBC group. [The 7˙O2peak was likely higher after the 4-week training period in the CON group [87/13/0, ES = 0.34 (0.13-0.55)] and very likely higher in the WBC group [97/3/0, ES = 0.56 (0.26-0.86)]]. The time required to finish the TT20 decreased after training by 3.4 ± 1.5% and 2.1 ± 2.5% in the CON and WBC groups, respectively. When WBC was compared with CON, the change in peak power, k˙O2peak and in duration and power in TT20 after four weeks of high-intensity interval training was not substantial (<75%)
CONCLUSION: Our findings suggest that regular post-exercise WBC does not potentiate adaptations to aerobic training. However, performing WBC seems not to be detrimental as our results showed significant improvement in endurance parameters in both experimental group.

EFFECT OF COMPETITION-COMPATIBLE PRECOOLING ON DISTANCE RUNNING IN HUMID HEAT

TROESCH, S., GROSSMANN, F., RUEEGG, F., SCHMID, L., HEYER, L., KREBS, R., PIRRELLO, T.1, STEINER, T., WEHRLIN, J.P.

1SECTION FOR ELITE SPORTS, SWISS FEDERAL INSTITUTE OF SPORTS, MAGGLINGEN, SZ 2INSTITUTE OF MOVEMENT SCIENCES, SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY, ZURICH, SZ 3SWISS ATHLETICS FEDERATION, ITTIGEN, SZ

INTRODUCTION: At the Olympic Games 2020 in Tokyo, extreme heat and humidity are expected. Such environmental conditions cause a fast increase of body core temperature (CT) during prolonged exercise and therefore impair endurance performance (Nybo et al., 2014).
Precooling has been shown to enhance endurance performance in the heat by lowering CT before exercise-onset and by postponing the point where critically high CT is reached (Ross et al., 2013). However, most studies on precooling have executed precooling directly before exercise-onset which is not compatible with the regulatory restrictions before major athletics competitions (e.g. runners are obliged to arrive in the "call-room", where no personal cooling equipment is allowed, ~30 min before the start of their race).
We aimed to find the effects of precooling that is compatible with the schedule before major athletics competitions on A) CT and B) distance running performance in humid heat.
METHODS: Ten trained men completed two 20 min running time trials in randomized order: One with preceding precooling (COOL) and a control trial without precooling (CONT). Both trials were conducted on a treadmill in a heat chamber. The precooling protocol before COOL was designed such, that it could be directly implemented into major athletics competitions: 30 min of whole-body cold-water immersion (22°C) starting ~2.5 h before the performance trial followed by 30 min in a cooling vest, a 30 min warm-up and another 30 min during which a bottle of ice slurry was consumed.
RESULTS: A) CT at the start of the performance trial was lower in COOL compared to CONT (37.0 ± 0.4°C in COOL and 37.3 ± 0.5°C in CONT, 95% confidence interval (CI) of difference = [-0.5°C, -0.1°C], p = 0.02).
B) Distance covered in the 20 min time trial did not differ between COOL and CONT (5362 ± 533 m in COOL and 5363 ± 544 m in CONT, 95% CI of difference = [-39 m, 35 m], p > 0.9).
CONCLUSION: Athletes competing in track events lasting no longer than ~20 min (i.e. 5'000 m or shorter) cannot expect a performance-improvement by the investigated precooling intervention. The observed physiological effects (lower CT) are likely too small to trigger a relevant benefit in a 5'000 m race. However, as the performance-enhancing effect of precooling is thought to depend on exercise duration (Quod et al., 2006), longer races (e.g. 10'000 m) could still benefit from competition-compatible precooling.
Nybo, L., Rasmussen, P., & Sawka, M. N. (2014). Performance in the Heat—Physiological Factors of Importance for Hyperthermia-Induced Fatigue. Comprehensive Physiology, 4, 657–689.
Quod, M. J., Martin, D. T., & Laursen, P. B. (2006). Cooling athletes before competition in the heat. Sports Medicine, 36(8), 671-682.
Ross, M., Abbiss, C., Laursen, P., Martin, D., & Burke, L. (2013). Precooling methods and their effects on athletic performance. Sports Medicine, 43(3), 207-225.

EFFECTS OF COLD WATER IMMERSION AFTER DAMAGING EXERCISE ON EXOGENOUS GLUCOSE OXIDATION

MARUYAMA, T., KOJIMA, C., GOTO, K.

RITSUMEUKAN UNIVERSITY

INTRODUCTION: Cold water immersion (CWI) is a prevalent post-exercise treatment for reducing muscle damage. Although effects of CWI on recovery of muscle function and exercise-induced muscle damage markers have been well reported, influence of CWI on glucose oxidation remains unclear. The attenuated blood flow due to CWI may attenuate glucose oxidation during post-exercise. The purpose of the present study was to compare the effect of CWI or active rest (ACT) after damaging exercise on exogenous glucose oxidation.
METHODS: Five males (21.8 ± 0.7 years, 165.2 ± 4.1 cm, 61.3 ± 5.2 kg) performed two trials (CWI, ACT) in a random order. Subjects performed 100 bouts (10 × 10 sets) of drop jumps from 60 cm box to induce exercise-induced muscle damage for quadriceps femoris muscle. In the CWI trial, the subjects were immersed under cold water (10•C) for 10 min, whereas ACT trial conducted 10 min of low-intensity pedaling exercise after the same exercise. During post-exercise, we evaluated exogenous glucose oxidation using labeled (13C) glucose. The subjects consumed labeled 13C glucose at 20 min following completion of the exercise, expired gas samples were collected every 10 min until 3 h after the exercise to determine kinetics of 13CO2/12CO2 ratio. Time course changes in blood volume (total hemoglobin) for

international guidelines, an exercise stress test is recommended (Price et al, 2016), allowing for an individual and optimised patient-oriented exercise training. That is of major importance especially when starting CR. During a 4-week inpatient CR, exercise testing is usually performed twice in the form of an entrance and exit exercise stress test. To evaluate the effectiveness of exercise training within the 4-week CR, we analysed data from both entrance and exit exercise stress tests.
METHODS: We used data from a cohort of 2462 cardiac patients (18-89 yrs; 913 women). Our inpatient subjects were suffering from HFpEF, HFrEF, LVEF, CMP, hypertension, NSTEMI or STEMI, or participated in CR after bypass or stent surgery. Assessed were resting and maximum heart rate, blood pressure and maximal load and load per kilogram body weight (load/kg) and duration of tests.
RESULTS: ANOVA [Time(2)xAge(3)xSex(2)] showed statistically significant and meaningfully improvements in load and load/kg (p<.01; partial eta squared (ES)>.25) over the four weeks. Improvements did not correlate with entrance test performance (r=-.257), but varied between age groups: being larger in the younger patients (<50yrs; +16%; ES>.55), reduced in the 50-70 yr-olds (+11%; ES>.30) and again larger in the elderly (>70yrs; +14%; ES>.50) with the increase being stronger in female elderly (+15%) than in elderly males (+12%). The gain in load is supported by the longer exit exercise test time. We also found a slight reduction for resting heart rate and maximum heart rate (-2%; p<.01; ES>.01). For maximal blood pressure values, we obtained small positive effects of exercise on the systolic blood pressure in females (ES>.01; p<.01).
CONCLUSION: Our data confirm that exercise training during a 4-week inpatient CR helps expedite the development of an improved exercise tolerance and, thus, every-day living. This is an essential contribution to the scientific based evidence for CR, particularly as our rehabilitation program was found to be effective across age groups and improvements did not diminish with higher initial performance level. In due consideration of the comorbidities being higher in the elderly, it is of importance that even older age groups where rehabilitation is often underappreciated and underutilized benefit from CR. Particularly for the working population, the demonstrated physical improvements may be an excellent strategy for reducing hospital readmissions and to return to work.
Piepoli et al, EJPC, 2012
Powell et al, BMJ Open, 2018
Price et al, EJPC, 2016
Sue et al, J Exerc Rehabil, 2017
contact: info@sportrix.at

Oral presentations

OP-PM24 Recovery from sports and exercise

RECOVERY EFFECT OF A LOWER LIMB COMPRESSIVE GARMENT AFTER A TRAIL RUNNING COMPETITION ON BIOCHEMICAL MARKERS: A PRELIMINARY STUDY.

APARICIO, I.1,2, PRIEGO-QUESADA, J.I.1,3, MARTÍNEZ-NAVARRO, I.1, HERNANDO-DOMINGO, C.4, LLOPIS, J.2, PÉREZ-SORIANO, P.1

1. UNIVERSITY OF VALENCIA; 2. TEXTILE RESEARCH INSTITUTE; 3. UNIVERSITY OF VALENCIA; 4. UNIVERSITY JAIME I CASTELLÓN.

INTRODUCTION: Trail running is a discipline increasing in number of runners. This modality was associated with muscle damage due to some characteristics, such as this duration and succession of prolonged eccentric actions during downhill stretches (1,2). However, it is necessary more investigations about how can affect other physiological aspects such as renal or cardiovascular system. Compression garments could be an effective strategy to reduce muscle damage after competition (3). The objective of the study was to analyse the influence of wearing lower limb compressive garments (LLCG) during 24 h after trail running competition on biochemical markers.
METHODS: 10 runners participated in the study (age: 40±7 years; body mass index: 23±2 kg/m2; training volume: 60 ±23 km/week). Participants were randomized in two different recovery groups: 1) wearing LLCG during 24 hours after competition, and 2) control (without compressive garment). Competition was the 2018 Costa Blanca Trail (Alicante, Spain) with a distance of 65 km and 4200 meters of positive slope. The LLCG and control groups performed the competition in 668±95 min and 696±124 min, respectively. Composition of LLCG was 88% polyamide and 12% elastane, its weight was 200g, and it had graduated compression of 15-10 mmHg, according to manufacturer's specifications. Biochemical markers such as creatinine, creatine Kinase, troponin, and C reactive protein were measured using a blood analytical. Measurements were taken 24h before and 24h after the trail competition. Differences between groups were considered when Cohen's effect sizes (ES) was moderate (>0.5) or large (>0.8).
RESULTS: Similar values were found in all variables in both groups 24h before the competition (ES<0.5). 24h after competition, LLCG group presented lower values of creatinine than control group (0.95±0.17 vs 1.06±0.18 mg/dL; ES=0.6), creatine kinase (1157.25±470.06 vs 4468.2±7049.31 U/L; ES=0.9) and C reactive protein (1.23±0.52 vs 1.83±0.97 mg/dL; ES=0.8). Troponin variable was similar in both groups 24 h after competition (10.73±5.83 vs 11.3±2.89 ng/L; ES=0.1)
CONCLUSION: In this preliminary study, it was observed that runners who used LLCG during first 24 hours post-race showed lower values on muscle damage (creatine kinase), inflammation (C reactive protein) and renal function (creatinine). With these preliminary results, the use of LLCG could be suggested as an effective strategy to improve recovery. Result obtained on lower renal effort is interesting since there is a lack evidence on competition. On the other hand, no differences were observed on cardiac damage (troponin), and it could indicate that characteristics of trail competition produce higher muscle damage than cardiovascular damage.
Due to low sample, it is intended to carry out future studies with greater number of participants that confirm the results obtained.
1.Hoffman, et al.,Wilderness Environ Med, 23(1), 56-60(2012)
2.Millet et al.,PLoS One, 6(2), e1705(2011)
3.Engel et al.,Sports Med, 46(12) (2016)

CRYOTHERAPY AS A RECOVERY TECHNIQUE DURING CONSECUTIVE DAYS OF SIMULATED TENNIS MATCHES: COMPARISON OF WBC, CWI, PASSIVE RECOVERY

POIGNARD, M.

FRENCH INSTITUTE OF SPORT

INTRODUCTION: Professional tennis players are subject to large amounts of physiological and psychological stress during competition and inadequate recovery can result in accrued fatigue throughout the course of an ATP/WTA tour (1). One emerging recovery modality is

Cryotherapy, which increases in popularity despite the lack of evidence to show its benefits depending on the context. Literature supporting the use of such methods to improve recovery have focused on improvements in peripheral fatigue and neglect to investigate the effects of various recovery methods on central fatigue (2). The aim of this study was to investigate the effect of different recovery modalities (whole-body cryotherapy, WBC, cold-water immersion, CWI, passive recovery, PAS) on specific peripheral and central markers of the tennis recovery during consecutive days of simulated tennis matches.
METHODS: In a crossover design, thirteen competitive male tennis players completed 3 simulated tennis matches, on 3 consecutive days, each followed by a different recovery modality (WBC, CWI, PAS) in 3 different weeks. Perceptual measures (muscle soreness, general fatigue), blood parameters (Creatine kinase, CK), peripheral (Maximal voluntary contraction, MVC; M-wave characteristics) and central indicators (Maximal voluntary activation; EMG activity) have been recorded after every match and 24 hours following the 3rd match. Tennis specific indicators have also been measured (ball velocity, ball accuracy, and technical performance).
RESULTS: Regardless of recovery condition and days, MVC (Day 1: -16.4 ±23,4 N.M-1; Day 2: -10.3 ± 20,9 N.M-1; Day 3: -6.6 ±19 N.M-1) and CK (Day 1: 67.6 ±90.6 U.L-1; Day 2: 111.43 ±183.1 U.L-1; Day 3: 99.4±136.2 U.L-1) intraday variations have respectively decreased and increased significantly, consecutively after each of the three simulated matches ($p<.01$). There were no significant differences between days and recovery conditions, in the MVC and CK intraday variations, following simulated tennis matches. When we compared recovery conditions, we observed no differences on MVC, CK and perceptual scores before matches. Likewise, Tennis specific measures also showed no significant difference between days and conditions.
CONCLUSION: Our simulated tennis matches have induced, every day, a significant and reproducible fatigue similar to a real tennis match. Our preliminary results suggest that cryotherapy is not detrimental for tennis performance, however, it seems not efficient to accelerate recovery during consecutive days of simulated tennis matches.
REFERENCES
(1) Reid, M. and R. Duffield (2014). "The development of fatigue during match-play tennis." Br J Sports Med 48 Suppl 1: i7-11.
(2) Minett, G. M. and R. Duffield (2014). "Is recovery driven by central or peripheral factors? A role for the brain in recovery following intermittent-sprint exercise." Front Physiol 5: 24.

INTRA-INDIVIDUAL VARIABILITY IN SLEEP AND NOCTURNAL HEART RATE VARIABILITY OF ELITE FEMALE SOCCER PLAYERS DURING AN INTERNATIONAL TOURNAMENT

COSTA, J.A.1, FIGUEIREDO, P.2,3, NAKAMURA, F.Y.4, RAGO, V.1,2, REBELO, A.1, BRITO, J.2

1UNIVERSITY OF PORTO, FACULTY OF SPORTS; 2PORTUGUESE FOOTBALL FEDERATION; 3UNIVERSITY INSTITUTE OF MAIA; 4PHYSICAL EDUCATION UPE/UFPB, JOÃO PESSOA;

INTRODUCTION: Research examining sleep and nocturnal heart rate variability (HRV) in athletes has typically averaged data across several nights, providing a mean estimate of usual sleep and HRV(1,2). While such approach is useful to provide basic insight into the recovery process, it lacks details of how individual sleep and HRV may vary across multiple nights. Moreover, individual variability can reflect differences within individuals over time. In fact, high intra-individual variability in sleep and HRV might indicate the potential value of individualising diagnostic approaches to promote appropriate recovery. Therefore, this study aimed to describe individual sleep and nocturnal HRV in elite female soccer players during an international tournament.
METHODS: Twenty elite female soccer players (aged 25.2±3.1 years) wore wrist actigraph units and heart rate monitors during night-sleep throughout 9 consecutive days (6 day-time trainings [DT; start ranged between 11:00AM–17:30 PM], 2 day-time matches [DM; both started at 3:00 PM] and 1 night-time match [NM; started at 6:00 PM) of an international tournament.
RESULTS: As a group, players presented appropriate total sleep time (TST) during the tournament (ranged between 7:41±0:44 and 8:26±0:41 h). However, a lower duration of TST was observed after NM compared to most of the other days of the tournament, including DM1 and DM2 (-1:32±0:19 hours and -1:37±0:11 hours, respectively; $p<0.001$). In addition, a lower sleep efficiency (SE) was found after NM compared with DM1 and DM2 (-7±3 % and -5±2 %, respectively; $p<0.001$). At the individual level, eight players slept less than 7 h at least for 2 out of the 9 days of the tournament. These players presented the higher coefficient of variation (CV) for TST than the remaining players (range between 11.1 to 18.7% and 3.0 to 9.2%, respectively). From the eight players that slept less than 7 h, five extended TST for ≥7 h on the days following matches. All players presented good SE (≥75%; individual range between 75-98%) across all days of the tournament. As a group, nocturnal HRV was not affected across the 9 days of the tournament ($p>0.05$) and ranged between 4.19±0.88 and 4.54±0.42 ln(ms). However, at the individual level, two players presented CV >10% (range between 11.4 and 11.5%) for nocturnal HRV, while most of the players had CV ranging between 3.0 and 9.0%.
CONCLUSION: The main finding of this study was that players generally accumulated adequate sleep quantity (TST ≥7h) and quality (SE ≥75%) throughout the tournament, during which no general disturbances in nocturnal HRV were observed. However, at the individual level, high intra-individual variability in TST and nocturnal HRV was observed, indicating the need for individualized sleep education strategies that could promote appropriate sleep and recovery of elite female soccer players, especially during periods of high congested fixtures.
1Costa JA, et al.,Chronobiol Int,18,1-14 (2018)
2Costa JA, et al.,Int J Sports Physiol Perform,20,1-26 (2018)

THE STUDY OF DYNAMIC CHANGES IN FUNCTIONAL STATE OF RUSSIAN NATIONAL TEAM ATHLETES AFTER TRANSFER TO EAST REGION

ZHOLINSKY, A., PRISTANSKOV, A., FESCHENKO, V., FOMIN, A., KOMAREVTSEV, V., MITIN, I., OGANNISYAN, M., PIRUSHKIN, V., LITVINENKO, A.

FEDERAL MEDICAL BIOLOGICAL AGENCY

INTRODUCTION: Athletes of national teams are subject to constant stress associated with debilitating physical exertion and psychological stress during preparation and participation in competitions. This is multiplied by frequent travel across the world/ Flights with the intersection of three or more time zones lead to a displacement of the daily rhythms of the athletes body, which in turn leads to the appearance of pathological syndrome called circadian desynchronosis, also known as Jetlag. The purpose of this study was to assess the functional status of water polo athletes after the flight to the Eastern region.
METHODS: The study was conducted during the XXIX World Summer Universiade 2017 (August 16 – 26) in the Taiwanese city of Taipei. The study involved 8 athletes of the mens water polo team. The study was carrying in the morning, before breakfast, before training and competition loads. For the rapid diagnosis of the functional state of the body of athletes, heart rate variability analysis (HRV) was used. To

The impact of recovery practices adopted by elite tennis players on fatigue markers according to training type clusters

Mathilde Poignard[a,c], Gaël Guilhem[a], Quentin de Larochelambert[d], Bernard Montalvan[c], François Bieuzen[b*]

[a] French Institute of Sport (INSEP), Laboratory Sport, Expertise and Performance (EA 7370), Paris, France

[b] Institut National du Sport du Québec, Montréal (Qc), Canada

[c] French Tennis Federation, Paris, France

[d] IRMES (Institut de Recherche bioMedicale et d'Epidemiologie du Sport), INSEP, 11 avenue du Tremblay, 75012 Paris, France

*** Correspondence:**
François Bieuzen
fbieuzen@insquebec.org

Keywords: Elite tennis players, cluster analysis, training load, recovery, recovery interventions

Abstract

Introduction: Modern tennis players face congested schedules that force the adoption of various recovery strategies. Because recovery must be fine-tuned, the accurate quantification of the impacts of recovery is essential, especially with regards to training-induced fatigue. The present study aimed to examine the training type clusters and recovery practices adopted by elite tennis players under ecological training conditions. The respective impacts of training type clusters and recovery techniques on subjective variables, which reflect the players' recovery perceptions, were subsequently determined.

Methods: During 15 consecutive months, 35 elite tennis players filled out questionnaires to report their daily training load, training session content, adopted recovery modalities after training, and perceived recovery.

Results: The hierarchical analysis identified 3 training type clusters. *Muscle soreness* and *perceived fatigue* were not significantly different among these three clusters (p=0.07 to 0.65). Across the 146 recorded training and recovery sessions, players primarily employed a combination of 2 or 3 modalities, with cooling strategies being the most widely used technique (87.6%). Mixed linear models revealed that independent of training clusters, cooling strategies significantly reduced muscle soreness

Efficacité des techniques de récupération en réponse à la charge induite par le tennis de haut niveau

Résumé : L'organisation du circuit professionnel impose actuellement au joueur de tennis de haut niveau une planification annuelle des entraînements et des compétitions très dense. Ainsi, une gestion appropriée et équilibrée de la fatigue et de la récupération apparait primordiale afin de permettre au joueur de tennis élite d'être performant lors des compétitions mais aussi d'éviter la survenue d'épisodes de fatigue sévère, de surmenage, de blessures ou de maladies. Les connaissances issues de la littérature scientifique incitent à adapter et planifier spécifiquement la récupération en fonction du contexte (discipline, période d'entraînement, type de fatigue, statut de l'athlète). Pourtant, les joueurs ont actuellement recours de façon relativement empirique à des stratégies de récupération diverses, incluant l'application de froid. Cependant, peu d'études se sont intéressées aux effets de ces méthodes de récupération sur les réponses à la charge induite par le tennis pratiqué à haut niveau. Il semble nécessaire de déterminer l'efficacité de chaque technique de récupération dans ce contexte afin d'identifier quelles stratégies répondent le mieux à la nécessité de récupérer. La première partie de ces travaux de thèse a donc eu pour objectif de décrire, sur une période de 15 mois et dans un cadre écologique, les contenus et la charge de travail induite par l'entraînement, les pratiques de récupération et leurs impact sur la fatigue subjective des joueurs de tennis élites. À court terme, il apparait que les contenus d'entraînement, regroupés et leur charge associée n'impactent pas différemment la fatigue perceptive rapportée. Au sein des stratégies de récupération utilisées par les joueurs, les techniques par le froid (cryothérapie corps entier, immersion en eau froide, bain contrasté) sont les plus représentées. Les modèles statistiques utilisés montrent que ces techniques de récupération par le froid sont les seules associées à une diminution significative des sensations de douleurs musculaires 12-16h post-entraînement. Notre seconde étude a comparé l'efficacité de ces différentes techniques de récupération par le froid dans des conditions de fatigue accumulée, simulant celles induites lors de compétitions professionnelles de tennis. Ces travaux montrent que l'enchaînement de trois jours de matchs de tennis d'1h30, induit une fatigue significative mais modérée. En effet, les paramètres de fatigue neuromusculaire (centrale et périphérique), physiologique diminuent significativement lors du premier jour, mais ne sont pas modifiés en réponse aux matchs de tennis des jours suivants. Au cours des quatre jours de protocole, l'immersion en eau froide et de la cryothérapie corps entier permettent de limiter l'augmentation des sensations de douleurs musculaires. Ces résultats valident l'intérêt d'utiliser les techniques de récupération par le froid pour diminuer les sensations de douleurs musculaires de joueurs de tennis élites en période d'entraînement. Dans le cadre précis de compétitions réalisées sur surface dure (hors Grands Chelems), l'utilisation quotidienne des techniques de récupération par le froid seront alors conseillées pour limiter l'accumulation des sensations de douleurs musculaires.

Mots clefs : Récupération ; Cryothérapie ; charge d'entraînement ; tennis ; performance haut niveau

Abstract Professional tennis generates a high-level of fatigue due to an important training load but also by the schedule of the professional circuit (ATP, WTA). In addition to the nomadic nature of the tennis tour, players are often required to complete competitive matches and training sessions with an inadequate timeframe to recover well. The adequate management of induced fatigue and recovery allows tennis players to perform during competition but also plays a key role in the avoidance of under-recovery, illness, and injury during preparatory and pre-competitive phases. Recovery must be fine-tuned, especially regards to training-induced fatigue which depend on the context (sport, training period, type of fatigue, athlete 'status). Cryotherapy is now a popular recovery method among tennis players. However, these cold recovery methods are applied empirically while little research have been done on the efficiency of cryotherapy depending on the context. However, no studies have demonstrated the potential effect of whole-cryotherapy (WBC) and cold-water immersion (CWI) on induced elite tennis fatigue and recovery. Therefore, it is necessary to demonstrate the effectiveness of each recovery technique to determine how it can effectively improve the athlete 'recovery. The first study aims to examine, during 15 consecutive months, the training type clusters, and recovery practices adopted by elite tennis players under ecological training conditions. The respective impacts of training type clusters and recovery techniques on subjective variables, which reflect the players' recovery perceptions, were subsequently determined. Results showed that perceived recovery was not sensitive to training clusters or the associated acute training load. However, cooling strategies were relevant for the alleviation of tennis training-induced soreness (12h-16h post-training). The second study compared the effect of WBC and CWI of the accumulated fatigue induced by three consecutive days of simulated tennis matches. Results shows that a 1.5 hour simulated tennis match leads to modest structural impairments, neuromuscular function alterations without decline in specific and non-specific performance. These impairments were completely recovered within 24 h and were not exacerbated by consecutive matches. However, three consecutive tennis matches induce a moderate increase in muscle soreness which was attenuated by CWI and WBC recovery techniques. In a practical view, when a player competing tournaments (on fast surfaces), the daily use of CWI and WBC could be helpful to attenuate muscle soreness.

Key-words: recovery; cryotherapy; training load; tennis; elite level