

**UNIVERSITE DE LILLE 2 : DROIT ET SANTE**

Faculté des Sciences du Sport et de l'Education Physique

**ECOLE DOCTORALE BIOLOGIE SANTE (ED n°446)**

**EA 7369- URePSS**

Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LILLE 2**

Discipline : Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives

ABAÏDIA Abd-Elbasset

**Récupération et Exercice Inducteur de Dommages Musculaires**

Dirigée par : Dr Georges BAQUET, HDR, Université de Lille 2

Dr Grégory DUPONT, HDR, Université d'Artois

**Présentée et soutenue publiquement le 24 octobre 2016**

Devant le jury composé de :

Professeur Saïd AHMAIDI, Université de Picardie Jules Verne, Examineur

Docteur Georges BAQUET, Université de Lille, Co-directeur

Professeur Laurent BOSQUET, Université de Poitiers, Rapporteur

Docteur Grégory DUPONT, Université d'Artois, Co-directeur

Docteur Nicola MAFFIULETTI, Schulthess Clinic de Zurich, Examineur

Professeur Tim MEYER, Universität des Saarlandes, Examineur

Professeur Hassane ZOUHAL, Université de Rennes 2, Rapporteur

*« Une main seule ne peut pas applaudir »*

Proverbe arabe

*« C'est à cause de sa fainéantise si la poule ne peut pas s'envoler »*

Proverbe berbère

## Remerciements

Réaliser une thèse de doctorat est une entreprise longue et difficile. Ce travail n'aurait pu être réalisé par ma seule implication. De nombreuses personnes ont participé de près ou de loin à cette thèse. A ce titre, je souhaite les remercier du plus profond de mon cœur pour leur contribution.

**Grégory**, je tenais à vous dire à quel point je suis reconnaissant pour tout ce que vous avez fait pour moi. Je n'oublierai jamais la chance que j'aie eue d'intégrer une structure professionnelle grâce à vous et de m'avoir formé à la rigueur de la recherche scientifique. Je n'oublierai jamais votre ouverture d'esprit, votre gentillesse et votre humilité. Vous faites partie de ces personnes qui ont marqué, qui marquent et qui marqueront mon parcours professionnel. Je vous souhaite toutes les réussites possibles qu'elles soient professionnelles ou personnelles et j'espère avoir l'occasion, ou plutôt la chance, de continuer à travailler avec vous à l'avenir.

**Georges**, merci d'avoir accepté d'être mon directeur de mémoire en master 2 et de m'avoir accompagné en thèse. Je vous remercie également de m'avoir accompagné après mon master pour que je puisse trouver et passer une thèse de doctorat. Je ne vous souhaite que des bonnes choses pour la suite.

Merci à **Messieurs Zouhal, Bosquet, Meyer, Ahmaïdi et Maffioletti** d'avoir accepté de faire partie du jury et d'avoir pris le temps d'analyser mes travaux. Votre évaluation et vos remarques me seront, à coup sûr, d'une grande utilité pour mes travaux futurs

Je remercie également tous mes collègues du Département Performance (par ordre alphabétique) : **Alan McCall, Barthélémy Delecroix, Benoit Delaval, Cédric Leduc, Florence Mullie, Julien Lamblin, Mathieu Nédélec et Sébastien Cosyns**. Votre aide lors des différents protocoles m'a été indispensable tout comme les nombreux échanges que nous avons pu avoir lors des différentes réunions. En une phrase : vous avez assuré ! Je vous souhaite une bonne continuation dans vos projets futurs.

Un grand merci à **toutes les personnes ayant participé aux expérimentations**. Vous avez pris de votre temps pour que les différents protocoles soient une réussite et pour cela je vous suis très reconnaissant. Bonne continuation à vous et je vous souhaite les meilleurs succès sportifs pour l'avenir.

Je souhaite remercier également **M. Patrick Mucci** pour avoir été mon directeur de mémoire en 1<sup>ère</sup> année de master. Si j'en suis là aujourd'hui c'est aussi un peu grâce à vous.

Je remercie le club du LOSC Lille Métropole pour m'avoir donné l'opportunité de travailler au sein du club en parallèle de mes travaux de recherche. Au sein du club je souhaite également remercier **Rachid Chihab, France Delafosse, Benoit Bernard, Cyril Semezak Stéphane Dumont et Stéphane Adam** pour votre ouverture d'esprit et votre disponibilité. Je vous souhaite la plus grande réussite sportive.

Merci également à **Amine Bouzid, Semah Tagougui et Adrien Combes** pour les échanges que nous avons pu avoir à la faculté...ou ailleurs. J'espère que vous aurez une belle carrière comme vous le méritez.

Du côté de ma famille je souhaite remercier particulièrement, **mes sœurs, et mon frère**. Votre soutien de tout instant a été une force pour moi. Chacun à sa manière vous êtes des exemples à suivre pour le petit frère que je suis. Merci d'être là tout simplement...

Je remercie **mes parents** qui sont les meilleurs du monde. Votre soutien indéfectible m'a permis d'atteindre cette étape de ma vie. Dans tous les moments vous avez su trouver les mots pour me permettre d'avancer et d'être fort. Je serai incapable de vous dire ce que je ressens en quelques lignes et serais sûrement incapable de vous rendre ne serait-ce que le centième de ce que vous avez fait pour moi. J'espère juste être un homme à la hauteur de l'éducation que vous m'avez donnée.

Merci à **mes enfants**, qui m'apportent du bonheur et de la joie de vivre au quotidien. Je vous souhaite une longue, belle et heureuse vie. Enfin, merci à **ma merveilleuse épouse** qui a été présente à mes côtés et ce quelle que soit mon humeur. Tu as dû me supporter pendant ces trois longues années et pour cela j'admire ta patience ! Comme d'habitude tu m'as été indispensable et tu as été le meilleur adjoint dont je pouvais rêver. Si j'avance c'est en grande partie grâce à toi. Ne change rien, reste sincère et vraie comme tu l'es depuis le début, c'est parfait !

## LISTE DES PUBLICATIONS

### Publications en relation avec l'objet de la thèse.

1. **Abaidia AE**, Delecroix B, Leduc C, Lamblin J, McCall A, Baquet G, Dupont G. Effects of a strength training session after an exercise inducing muscle damage on recovery kinetics. *Journal of Strength and Conditioning Research*. Published online First 23 May 2016 (**Publication acceptée**).
2. **Abaidia AE**, Lamblin J, Delecroix B, Leduc C, McCall A, Nédélec M, Dawson B, Baquet G, Dupont G. Recovery from exercise-induced muscle damage: cold water immersion *versus* whole body cryotherapy. *International Journal of Sports Physiology and Performance*. Published online First 11 July 2016 (**Publication acceptée**).
3. **Abaidia AE**, Cosyns S, Delecroix B, Dawson B, Baquet G, Dupont G. Placebo effect on recovery from exercise-induced muscle damage. (**Publication soumise à Psychological Science**).

### Autres publications.

1. Nédélec M, Halson S, Delecroix B, **Abaidia AE**, Ahmaidi S, Dupont G. Sleep Hygiene and Recovery Strategies in Elite Soccer Players. *Sports Med*. 2015; 45(11): 1547-59.
2. Nédélec M, Halson S, **Abaidia AE**, Ahmaidi S, Dupont G. Stress, Sleep and Recovery in Elite Soccer: a Critical Review of the Literature. *Sports Med*. 2015; 45(10):1387-400.
3. Oussaidene K, Prieur F, Tagougui S, **Abaidia A**, Matran R, Mucci P. Aerobic fitness influences cerebral oxygenation response to maximal exercise in healthy subjects. *Respir Physiol Neurobiol*. 2015; 1;205:53-60.

### Présentations en relation avec l'objet de la thèse.

**Abaidia A**, Lamblin J, Delecroix B, Leduc C, McCall A, Nédélec M, Dawson B, Baquet G, Dupont G. Effect of two recovery strategies on performance recovery: cold-water immersion vs whole-body cryotherapy. Congrès de l'European College of Sport Science, Vienne 2016 (**Présentation orale**).

**Abaidia A**, Delecroix B, Leduc C, Lamblin J, Baquet G, Dupont G. Effects of a strength training session on recovery after an exercise-induced muscle damage: a randomised cross-over study. Congrès de l'European College of Sport Science, Malmö 2015 (**Communication affichée**).

**Abaidia A**, Delecroix B, Leduc C, Lamblin J, Baquet G, Dupont G. Effects of a strength training session on recovery after an exercise-induced muscle damage: a randomised cross-over study. Journée André Verbert, 14 septembre 2015, Lille (**Communication affichée**).

**Abaidia A**. Optimiser les stratégies de récupération pour prévenir les blessures. Séminaire EMSP, Mai 2014, Domaine de Luchin, Camphin-en-Pévèle (**Présentation orale**).

## RESUME

### RECUPERATION ET EXERCICE INDUCTEUR DE DOMMAGES MUSCULAIRES

Après une compétition, certains sportifs utilisent des stratégies pour accélérer la récupération des dommages musculaires. Le but général de cette thèse était d'étudier les effets de différentes stratégies sur les cinétiques de récupération après un exercice inducteur de dommages musculaires. Les objectifs des études réalisées étaient : 1) de comparer les effets du bain froid (10 minutes à 10°C) et de la cryothérapie corps entier (3 minutes à -110°C) sur la récupération ; 2) d'évaluer les effets d'une séance de musculation des membres supérieurs réalisée le lendemain d'un exercice des membres inférieurs sur leur récupération, 3) d'étudier les effets de la consommation d'un placebo en comparaison avec une condition contrôle sur les cinétiques de récupération. Le modèle expérimental utilisé pour induire des dommages musculaires dans ces trois études était un exercice constitué de 5 séries de 15 contractions excentriques maximales des fléchisseurs du genou. Cet exercice était caractérisé par une baisse de la fonction musculaire, une augmentation des concentrations sanguines en créatine kinase et une augmentation des douleurs musculaires. La fonction musculaire, des marqueurs perceptifs et sanguins des dommages musculaires étaient également évalués au cours des 72h suivant cet exercice. Dans la première étude, le bain froid permettait d'accélérer la récupération de la performance lors d'un saut en contre-mouvement sur une jambe et sur deux jambes 72h après l'exercice en comparaison avec la cryothérapie corps entier. Dans la deuxième étude, la musculation du haut du corps n'avait pas d'effet délétère sur la récupération et avait un effet bénéfique modéré sur la récupération de la force concentrique 48h après l'exercice. Dans la troisième étude, la consommation d'un placebo présentait une très forte probabilité d'avoir un effet bénéfique sur la performance en saut et les douleurs musculaires 72h après exercice. La perception de la récupération était également modérément améliorée 72h après exercice. En conclusion, les trois stratégies de récupération utilisées lors de ces études à savoir le bain froid, la séance de musculation et la consommation d'un placebo peuvent être efficaces après des exercices induisant des dommages musculaires.

**Mots clés : bain froid, cryothérapie, placebo, musculation.**

## ABSTRACT

### RECOVERY AND EXERCISE-INDUCED MUSCLE DAMAGE

Following competition, athletes commonly use strategies to accelerate their recovery from muscle damage. The overall objective of this thesis was to study the effects of different recovery strategies on recovery kinetics following exercise-induced muscle damage. The aims of the studies were as follows: 1) to compare the effects of cold-water immersion (10 minutes at 10°C) and whole-body cryotherapy (3 minutes at -110°C), 2) to assess the effects of an upper-limb strength training session, performed the day after a lower-limb exercise,, 3) to study the effects of a placebo ingestion in comparison with a passive recovery. The experimental model used to induce muscle damage in these three studies consisted of 5 sets x 15 repetitions of maximal eccentric contractions of the knee flexors muscles. This exercise resulted in a decrease of muscle function, increases in blood creatine kinase concentration as well as increases in perceived muscle soreness. Muscle function blood markers and subjective recovery from muscle damage were assessed throughout a 72h period post exercise. In the first study, cold-water immersion was more effective than whole-body cryotherapy evidenced through an accelerated recovery of both single and double leg countermovement jump 72h following exercise. In the second study, the upper-limb strength training session had a moderate beneficial effect on concentric force recovery 48h after the exercise and both interestingly and importantly, did not have any detrimental effect on recovery. Finally for the third study, placebo ingestion was 'very likely' to have a beneficial effect on jump performance and muscle soreness 72h post-exercise. Additionally, perceived recovery was moderately better 72h following exercise. In conclusion, the studies conducted in this thesis showed that the recovery strategies of cold-water immersion, strength training and ingestion of a placebo, may be effective after exercise-induced muscle damage.

**Key words: Cold-water immersion, cryotherapy, placebo, strength training.**



Cette thèse a été réalisée dans le cadre d'une Convention Industrielle de Formation par la Recherche (CIFRE) en collaboration avec :

1. l'équipe d'accueil 7369 'Unité de Recherche Pluridisciplinaire Sport Santé Société' de l'Université de Lille 2.

Faculté des Sciences du Sport et de l'Education Physique

9, rue de l'Université

59790 Ronchin

2. le club de football professionnel LOSC LILLE METROPOLE SASP

Domaine de Luchin

Grand Rue

BP 79

59780 Camphin-en-Pévèle

# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>12</b>
<b>1. REVUE DE LITTÉRATURE.....</b>	<b>15</b>
1.1. FATIGUE INDUITE PAR UN MATCH DE FOOTBALL ET UN EXERCICE INDUCTEUR DE DOMMAGES MUSCULAIRES.....	16
1.1.1. <i>La fatigue induite par un match de football.....</i>	18
1.1.2. <i>La fatigue induite par un exercice inducteur de dommages musculaires.....</i>	20
1.2. LES CINÉTIQUES DE RECUPERATION APRES UN MATCH DE FOOTBALL.....	22
1.2.1. <i>Description.....</i>	22
1.2.2. <i>Le niveau de force.....</i>	23
1.2.3. <i>Puissance musculaire et performance en sprint.....</i>	23
1.2.4. <i>Les marqueurs sanguins des dommages musculaires.....</i>	26
1.2.5. <i>Les marqueurs de l'inflammation.....</i>	27
1.2.6. <i>Les marqueurs du stress oxydatif.....</i>	28
1.2.7. <i>Les marqueurs subjectifs.....</i>	28
1.3. VARIABILITE DES CINÉTIQUES DE RECUPERATION.....	29
1.4. FACTEURS POUVANT INFLUENCER LES CINÉTIQUES DE RECUPERATION.....	33
1.4.1. <i>Le niveau initial de force.....</i>	33
1.4.2. <i>Le niveau d'entraînement.....</i>	35
1.4.3. <i>L'expérience du joueur.....</i>	37
1.4.4. <i>Age.....</i>	38
1.4.5. <i>Aspects hormonaux.....</i>	40
1.4.6. <i>Activité réalisée pendant le match.....</i>	42
1.4.7. <i>Poste de jeu.....</i>	43
1.4.8. <i>Contexte du match.....</i>	45
1.4.9. <i>Aspects psychologiques.....</i>	46
1.4.10. <i>Interaction entre perception de l'effort et douleurs.....</i>	48
1.5. STRATEGIES DE RECUPERATION.....	50
1.5.1. <i>Le froid.....</i>	50
1.5.2. <i>Entraînement en force.....</i>	54
1.5.3. <i>Effet placebo.....</i>	55
<b>2. CONTRIBUTION PERSONNELLE.....</b>	<b>58</b>
2.1. MATERIEL ET METHODES.....	59
2.1.1. <i>Participants.....</i>	59
2.1.2. <i>Description des protocoles.....</i>	59
2.1.2.1. <i>Modèle expérimental pour l'exercice inducteur de dommages musculaires.....</i>	59
2.1.2.2. <i>Procédures.....</i>	61
2.2. RESULTATS.....	67
2.2.1. <i>Reproductibilité.....</i>	67
2.2.2. <i>Effet du temps.....</i>	69
2.2.3. <i>Variabilité de la fatigue induite par l'exercice inducteur de dommages musculaires.....</i>	71
2.2.4. <i>Effet de l'ordre de passage en fonction de la dominance de la jambe.....</i>	71
2.2.5. <i>Effet de la condition.....</i>	72

2.2.6. <i>Perception de l'effort</i> .....	87
2.3. DISCUSSION GENERALE.....	89
3. <b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	<b>98</b>
4. <b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	<b>101</b>
<b>DOCUMENTS ANNEXES</b> .....	<b>126</b>

## INTRODUCTION

La gestion de la récupération est un enjeu pour de nombreux sportifs, notamment lorsque plusieurs compétitions sont proches. En football, de nombreuses études montrent que, lorsque plusieurs matches sont joués en une semaine, la période séparant deux matches peut être insuffisante pour complètement récupérer (Ascensão et al., 2008 ; Ispirlidis et al., 2008 ; Fatouros et al., 2010 ; Magalhães et al., 2010 ; Draganidis et al., 2015). Du fait du nombre important de compétitions (championnat, coupes nationales, coupes d'Europe), il est fréquent de voir des semaines au cours desquelles les joueurs doivent jouer deux ou trois matches. Dans ce contexte, le nombre de jours de récupération entre deux matches est de deux à quatre, et la conséquence est une augmentation du risque de blessures. Dupont et al. (2010) ont montré, chez des footballeurs de haut niveau, une incidence des blessures 6,2 fois plus élevée ( $p < 0,001$ ) lorsque les joueurs participaient à deux matches par semaine en comparaison avec un match par semaine. Ekstrand et al. (2004) ont étudié la relation entre le nombre de matches joués lors des dix semaines précédant la coupe du monde 2002, le nombre de blessures et la performance réalisée au cours de la coupe du monde. Les résultats ont montré que 60% des joueurs ayant joué plus d'un match par semaine avant la coupe du monde se sont blessés ou ont été moins performants lors de la coupe du monde. A partir de ce constat, on peut émettre l'hypothèse que la récupération entre les matches soit incomplète. Plusieurs facteurs vont favoriser, ou au contraire, ralentir le processus de cicatrisation. La connaissance de ces facteurs est nécessaire pour optimiser le processus de récupération.

Pendant un match le joueur est amené à réaliser des sprints sur des distances courtes, des accélérations, des changements de direction et des sauts (Osgnach et al., 2010 ; Rahnama et al., 2002). Avec le ballon, le joueur est amené à réaliser des tacles, des frappes, des passes et à être en contact avec l'adversaire (Rahnama et al., 2002). Ces actions réalisées à haute intensité intègrent des contractions excentriques. Le stress mécanique occasionné par ce régime de contraction est le facteur le plus important menant à l'apparition de dommages musculaires (Clarkson and Hubal, 2002 ; Byrne et al., 2004 ; Tee et al., 2007). Ces dommages musculaires entraînent une baisse de la performance dont le retour à un niveau initial sera dépendant de l'amplitude des dommages musculaires (Clarkson et al., 1992 ; Clarkson and Hubal, 2002 ; Paulsen et al., 2012). Autrement dit, plus le niveau de dommages musculaires sera important, plus longue sera la période nécessaire pour récupérer. L'amplitude des dommages musculaires et les cinétiques de récupération peuvent être influencées par de

nombreux facteurs parmi lesquels le niveau initial de force (Sayers et al., 2003), le niveau d'entraînement (McHugh et al., 1999 ; Newton et al., 2008 ; Johnston et al., 2015), l'expérience (Hunkin et al., 2014), l'âge (Easthope et al., 2010 ; Brisswalter and Nosaka, 2013), les aspects hormonaux (Schoenfeld, 2013), l'activité réalisée pendant le match (Howatson et al., 2007 ; Nosaka et Sakamoto, 2001), le poste (Di Salvo et al., 2007 ; Bradley et al., 2009 ; Andrzejewski et al., 2013), le contexte du match (Samuels, 2012), certains états psychologiques (Stults-Kolehmainen et al., 2014) et l'interaction entre perception de l'effort et douleurs musculaires (Knicker et al., 2011).

Les entraîneurs et les sportifs peuvent utiliser des stratégies permettant d'accélérer la récupération (Nédélec et al., 2013a). Trente-deux praticiens, responsables des stratégies de récupération dans des clubs de football professionnels, ont été interrogés (Nédélec et al., 2013a). Le but de cette enquête était d'identifier les stratégies utilisées dans les clubs. Parmi les résultats obtenus, 88% des équipes ont déclaré utiliser l'immersion en bain froid comme stratégie de récupération. D'autres stratégies de récupération étaient également très utilisées comme la récupération active (81%), les massages (78%), les étirements (50%). Bahnert et al. (2013) se sont intéressés aux stratégies de récupération utilisées par des joueurs de football australien au cours d'une saison. Ils ont observé une variabilité des combinaisons de stratégies chez les joueurs, mais dans plus de 75% des cas les joueurs choisissaient le bain froid comme stratégie de récupération. Le froid est utilisé également sous d'autres formes notamment la cryothérapie corps entier. Cette technique consiste à exposer le corps à un air très froid afin d'accélérer la récupération (Bleakley et al., 2014).

L'utilisation du froid, que ce soit sous forme d'immersion en bain froid ou de cryothérapie corps entier, est fréquente dans le sport de haut niveau (Nédélec et al., 2013a ; Bleakley et al., 2014). Des méta-analyses récentes ont montré l'effet bénéfique du bain froid (Leeder et al., 2012 ; Bleakley et al., 2012 ; Poppendieck et al., 2013) et certaines études l'efficacité de la cryothérapie corps entier pour accélérer la récupération après un exercice (Hauswirth et al., 2011 ; Ferreira-Junior et al., 2015). Bien que ces deux stratégies soient utilisées, à notre connaissance, aucune étude n'a comparé les effets de ces deux modalités sur les cinétiques de récupération après un exercice inducteur de dommages musculaires.

Dans le cas de la mise en place d'une séance le lendemain d'une compétition, il semble plus approprié d'utiliser un exercice permettant de stimuler le processus de cicatrisation musculaire. Certains facteurs hormonaux intervenant dans ce processus, la réalisation de

certaines séances de musculation pourrait influencer la récupération par l'intermédiaire d'une augmentation des concentrations hormonales (Kraemer et al., 1990 ; Simão et al., 2012 ; Schoenfeld, 2013). Cette approche innovante n'a pas été abordée dans la littérature scientifique. A notre connaissance, aucune étude n'a analysé les effets d'une séance de musculation sur les cinétiques de récupération.

Bien que certaines stratégies de récupération présentent un effet bénéfique sur la performance, celui-ci est de l'ordre d'environ 2 à 3% (Poppendieck et al., 2013). Dans certains cas, cet effet peut ne pas être supérieur à un effet placebo (Broatch et al., 2014), et certains sportifs ne voient pas leur récupération améliorée avec ces stratégies (Stephens et al., 2016). Il est possible que l'efficacité d'une stratégie de récupération soit également liée à un effet placebo. A notre connaissance, aucune étude ne s'est intéressée aux effets d'un placebo sur la récupération.

Un des enjeux dans le sport de haut niveau est d'identifier les stratégies de récupération qui peuvent être efficaces pour accélérer les cinétiques de récupération après un exercice inducteur de dommages musculaires. L'objectif général de cette thèse est d'étudier les effets de différentes stratégies sur les cinétiques de récupération après un exercice inducteur de dommages musculaires. Pour répondre à cette problématique, trois études ont été menées avec pour objectifs :

- 1) comparer les effets du bain froid (10 minutes à 10°C) et de la cryothérapie corps entier (3 minutes à -110°C) sur la récupération ;
- 2) analyser les effets d'une séance de musculation des membres supérieurs réalisée le lendemain d'un exercice des membres inférieurs sur leur récupération ;
- 3) étudier les effets de la consommation d'un placebo en comparaison avec une condition contrôle sur les cinétiques de récupération.

Avant de présenter les protocoles et les résultats, une revue de littérature a permis de sélectionner les marqueurs selon leur variabilité et de présenter les cinétiques de récupération. La revue de littérature a, ensuite, étudié les facteurs potentiels pouvant influencer les cinétiques de récupération, puis les effets des différentes stratégies de récupération précédemment citées sur la récupération de la performance.

# **1. REVUE DE LITTERATURE**

### **1.1. Fatigue induite par un match de football et un exercice inducteur de dommages musculaires**

De nombreuses définitions de la fatigue ont été proposées. La fatigue est un phénomène qui peut être causé par la réalisation d'une activité physique et qui peut être défini comme une réduction de la capacité du système neuromusculaire à générer une force qui apparaît lors d'une activité soutenue (Bigland-Ritchie et al., 1983). La fatigue peut être une réduction de la capacité à générer une force induite par l'exercice, le repos peut la réduire (Gandevia, 2001). La fatigue est également définie comme l'incapacité à maintenir une force et une puissance requises ou espérées (Edwards, 1983). Cela implique que le niveau de fatigue engendré par la participation à un match va se dissiper après une période de récupération. Lors d'un match de football, la fatigue peut se manifester à court terme, c'est-à-dire après un effort réalisé en match comme un sprint (Mohr et al., 2003). La fatigue peut également se manifester à long terme, c'est-à-dire après un match et dans les jours qui suivent le match (Mohr et al., 2003).

Le football est un sport au cours duquel les joueurs réalisent des actions à haute intensité en alternance avec des actions à faible intensité (Mohr et al., 2003 ; Bradley et al., 2009). Lors d'un match, la valeur relative du temps passé à de faibles intensités représente 90% du temps total et la valeur relative du temps passé à de hautes intensités représente 10% du temps total (Mohr et al., 2003 ; Bradley et al., 2009). Pendant un match, le joueur est amené à réaliser des accélérations, des changements de direction et des sauts (Osgnach et al., 2010 ; Rahnama et al., 2002). Avec le ballon, le joueur est amené à réaliser des tacles, des frappes, des passes et à être en contact avec l'adversaire (Rahnama et al., 2002). Les actions réalisées à haute intensité intègrent des contractions excentriques. Le stress mécanique occasionné par ce régime de contraction est le facteur le plus important menant à l'apparition de dommages musculaires (Clarckson and Hubal, 2002 ; Byrne et al., 2004 ; Tee et al., 2007).

Ces dommages musculaires se caractérisent essentiellement par une baisse temporaire de la fonction neuromusculaire. Ils peuvent s'accompagner d'une augmentation des protéines intramusculaires dans le sang et, parfois, d'une augmentation des douleurs musculaires (Howatson and Van Someren, 2008). Le stress mécanique occasionné par la participation à un match engendre une baisse de la performance (Rampinini et al., 2011). Par exemple, Rampinini et al. (2011) ont montré une baisse significative ( $p < 0,001$ ) de 11% environ de la



force maximale volontaire des extenseurs du genou immédiatement après la participation à un match. Dans la même étude, l'activation volontaire de ces mêmes muscles était diminuée de 12% ( $p = 0,003$ ). Les auteurs en ont conclu que la fatigue induite par le match est une combinaison de facteurs centraux et périphériques. Ces résultats sont confirmés par l'étude Magalhães et al. (2010) qui ont noté une baisse de 8% ( $p < 0,05$ ) de la force concentrique à  $90^{\circ}.s^{-1}$  des extenseurs du genou et une baisse de 15% ( $p < 0,05$ ) de la force concentrique à  $90^{\circ}.s^{-1}$  des fléchisseurs du genou 30 minutes après la participation à un match.

D'un match à l'autre, il existe une variabilité de l'effort fourni qui est liée au contexte, à l'adversaire ou encore à la condition physique (Drust et al., 2007 ; Castellano et al., 2011). La variabilité des efforts à haute intensité se situe entre 16% et 30% au cours d'une saison (Gregson et al., 2010 ; Carling et al., 2013). Du fait de l'influence du nombre d'actions réalisées sur le niveau de fatigue post-match (Nédélec et al., 2015a), ces résultats suggèrent également une variabilité du niveau de fatigue entre différents matches (Russell et al., 2015).

La récupération est définie comme étant la capacité à revenir ou à excéder sa performance lors d'une activité particulière (Bishop et al., 2008). Cela implique que la réalisation d'une activité entraîne une baisse de performance sur une période donnée. La récupération sera complète lorsque la performance réalisée sera équivalente à celle réalisée avant exercice (Bishop et al., 2008). Bishop et al. (2008) définissent trois niveaux de récupération :

- la récupération immédiate qui correspond à la récupération qui a lieu entre des efforts rapides et très rapprochés dans le temps, par exemple entre deux foulées lors d'une course ;
- la récupération à court terme qui correspond à la récupération entre deux efforts dans un exercice donné, par exemple la récupération entre deux sprints lors d'un exercice de répétition de sprints ;
- la récupération à long terme qui correspond à la récupération entre deux séances d'entraînement ou deux compétitions.

C'est sur ce dernier type de récupération que portera cette revue de littérature. Dans le contexte du football de haut niveau, avec des semaines à plus de deux matches, la gestion de la période de récupération entre les matches est un enjeu important. Il est judicieux de déterminer la durée nécessaire pour retrouver les valeurs initiales des marqueurs de la récupération. Dans cette perspective, nous nous intéresserons à l'évolution de la performance au cours des jours qui suivent un match.

Du fait de la variabilité des actions réalisées en match et de la variabilité du niveau de fatigue entre différents matches, la comparaison des réponses en terme de récupération est complexe puisque l'exercice n'est pas standardisé. Afin de limiter l'influence de la variabilité des événements d'un match, certains auteurs ont utilisé des simulations de match pour comparer les réponses physiques des sujets dans des conditions standards (Magalhães et al., 2010 ; Stone et al., 2011 ; Nédélec et al., 2013b). Cependant, les niveaux de fatigue induits par ce genre d'exercice sont en général plus faibles que les niveaux de fatigue engendrés par des matches réels (Bailey et al., 2007 ; Nédélec et al., 2013c).

En comparaison avec les simulations de match, les exercices inducteurs de dommages musculaires présentent une baisse de force plus importante après exercice. Howatson et al. (2009) ont évalué le niveau de force isométrique des extenseurs du genou suite à un exercice inducteur de dommages musculaires. L'exercice était composé de 100 sauts en contrebas (drop jump) et le niveau de force était évalué immédiatement après exercice puis toutes les 24h au cours des 4 jours suivants. Les résultats de cette étude ont montré une baisse de force de 21%, 24h après l'exercice. Afin d'évaluer la récupération musculaire, ce type de modèle a l'avantage d'engendrer un niveau de fatigue plus important et ainsi de mieux appréhender l'influence des stratégies de récupération.

#### 1.1.1. La fatigue induite par un match de football

Les efforts réalisés lors d'un match de football engendrent une baisse de la capacité de performance. Lors d'un match, une étude a montré une baisse significative ( $p < 0,05$ ) de la distance parcourue à haute intensité dans les 5 minutes qui suivent une période très intense (Mohr et al., 2003). De plus, la distance parcourue en sprint dans le dernier quart d'heure était significativement diminuée en comparaison avec les autres quarts d'heure du match. Ces résultats confirment l'existence d'une fatigue ne permettant pas de maintenir la capacité à réaliser des efforts à haute intensité que ce soit à court terme ou à moyen terme au cours du match.

Le tableau 1 présente différentes études qui se sont intéressées à l'évolution du niveau de force immédiatement après un match. Les résultats ont montré une baisse de force des extenseurs du genou comprise entre 7,1% et 11% et une baisse de force des fléchisseurs du genou comprise entre 7% et 15,4%. Une analyse de la taille de l'effet montre un effet de la participation au match sur la performance allant de petit à large.

Les différentes études portant sur la fatigue d'après match, ont montré l'existence d'une fatigue musculaire immédiatement après le match (Magalhães et al., 2010 ; Rampinini et al., 2011). En plus d'avoir évalué la force des extenseurs du genou, comme précisé précédemment, Magalhães et al. (2010) ont également évalué le niveau de force concentrique à  $90^\circ \cdot s^{-1}$  des fléchisseurs du genou et ont trouvé une baisse de force de 15,4% trente minutes après le match. Ascensão et al. (2008) ont montré une baisse de la force concentrique à  $90^\circ \cdot s^{-1}$  des extenseurs du genou (10%) et des fléchisseurs du genou (15%).

Rampinini et al. (2011) ont également noté une diminution de l'activation volontaire après un match de football. La baisse du niveau d'activation volontaire était de 7,7% ( $p < 0,001$ ) immédiatement après le match et de 3,3% ( $p = 0,019$ ) 24h après le match. Comme la mesure de ce paramètre permet d'évaluer la fatigue centrale (Gandevia, 2001), ces résultats suggèrent que la fatigue engendrée par un match de football est liée aux aspects centraux et périphériques. La diminution de l'activation volontaire peut persister jusqu'à 24h après un match et revenir aux valeurs de référence après 48h (Rampinini et al., 2011).

**Tableau 1** : Evolution du niveau de force immédiatement après un match de football

Etudes	Sujets	Paramètre mesuré	Temps (heures après le match)	
				0h
Andersson et al. (2008)	9 ♀ haut niveau	EXT CONC ( $60^\circ \cdot s^{-1}$ )	-7,1%	ES = -0,60 (-1,51 à 0,37)
		FL CONC ( $60^\circ \cdot s^{-1}$ )	-9,4%	ES = -0,87 (-1,79 à 0,14)
Ascensão et al. (2008)	16 ♂ div. inf.	EXT CONC ( $90^\circ \cdot s^{-1}$ )	-10%	ES = -0,39 (-1,08 à 0,32)
		FL CONC ( $90^\circ \cdot s^{-1}$ )	-15%	ES = -1,1 (-1,81 à -0,33)
Magalhães et al. (2010)	16 ♂ div. inf.	EXT CONC ( $90^\circ \cdot s^{-1}$ )	-8%	ES = -0,46 (-1,15 à 0,25)
		FL CONC ( $90^\circ \cdot s^{-1}$ )	-15,4%	ES = -0,86 (-1,56 à -0,11)
Rampinini et al. (2011)	20 ♂ haut niveau	EXT ISO ( $90^\circ$ )	-11%	ES = -0,54 (-1,16 à 0,10)
Thorlund et al. (2009)	9 ♂ jeunes	EXT ISO ( $70^\circ$ )	-11%	ES = -1,76 (-2,75 à -0,60)
		FL ISO ( $70^\circ$ )	-7%	ES = -0,73 (-1,64 à 0,26)

♂ = homme. ♀ = femme. ISO = force isométrique. CONC = force concentrique. EXC = force excentrique. EXT = muscles extenseurs du genou. FL = muscles fléchisseurs du genou. DJ = drop jump. NS = non significatif. Les pourcentages représentent une différence significative. ES = taille de l'effet (Intervalle de Confiance à 95%).  $0 \leq ES \leq 0,2$  = trivial ;  $0,2 \leq ES \leq 0,6$  = petit ;  $0,6 \leq ES \leq 1,2$  = modéré ;  $1,2 \leq ES \leq 2$  = large ;  $2 \leq ES \leq 4$  = très large ;  $ES > 4$  = presque parfait (Hopkins, 2002a).

La fatigue d'après-match peut être expliquée par différents facteurs parmi lesquels les diminutions des réserves en glycogène. Krstrup et al. (2006) ont examiné l'effet de la participation à un match de football sur les concentrations musculaires en glycogène. Leurs résultats ont montré que les valeurs mesurées après le match (moyenne ± erreur standard ;  $255 \pm 22$  mmol.kg<sup>-1</sup> de muscle frais) étaient significativement plus basses ( $p < 0,05$ ) que celles mesurées avant le match (moyenne ± erreur standard ;  $449 \pm 23$  mmol.kg<sup>-1</sup> de muscle frais). Il

semble que la fatigue observée après un match puisse être liée à une baisse des réserves en glycogène (Krustrup et al., 2006).

En résumé, la fatigue induite par un match de football est liée à des facteurs centraux et périphériques. Les aspects métaboliques semblent également jouer un rôle dans l'induction de la fatigue comme le montre la diminution des réserves en glycogène après un match.

1.1.2. La fatigue induite par un exercice inducteur de dommages musculaires  
La réalisation d'un exercice inducteur de dommages musculaires entraîne un niveau de fatigue important qui peut persister plusieurs jours. Le tableau 2 présente l'évolution du niveau de force après un exercice inducteur de dommages musculaires. Les résultats des différentes études ont montré une baisse de force des extenseurs du genou, immédiatement après exercice, pouvant aller de 10% à 68%. Dans les jours qui suivent l'exercice, dans la plupart des études présentées dans le tableau 2, quatre jours de récupération ne sont pas suffisants pour revenir aux valeurs initiales. Paulsen et al. (2010) ont étudié les effets d'un exercice composé de 300 contractions excentriques à  $30^{\circ}.s^{-1}$  sur les cinétiques de récupération de la force concentrique à  $60^{\circ}.s^{-1}$ . L'intérêt de leurs résultats réside dans le fait que, 96h après exercice, le niveau de force était diminué significativement de  $15\pm 8\%$ , ce qui dénote une efficacité de l'exercice à induire des dommages musculaires. Dans cette même étude, les auteurs ont distingué les réponses des sujets modérément répondeurs et des sujets très répondeurs. Les sujets modérément répondeurs à l'exercice étaient ceux qui avaient une baisse de force allant jusqu'à 55% après l'exercice inducteur de dommages musculaires. Les sujets très répondeurs à l'exercice étaient ceux qui avaient une baisse de force supérieure à 55% après l'exercice inducteur de dommages musculaires. En moyenne, le niveau de force, chez les sujets modérément répondeurs, a diminué de  $39\pm 11,6\%$ . En moyenne, le niveau de force, chez les sujets modérément répondeurs, a diminué de  $68\pm 4,7\%$ .

La réalisation d'un exercice inducteur de dommages musculaires peut également influencer le niveau d'activation volontaire (Endoh et al., 2005 ; Prasartwuth et al., 2005). Endoh et al. (2005) ont analysé l'évolution de l'activation volontaire des fléchisseurs du coude après un exercice inducteur de dommages musculaires. L'exercice était constitué de 30 contractions excentriques à une vitesse de  $30^{\circ}.s^{-1}$ . Les auteurs ont mesuré le niveau d'activation volontaire sur un test de fatigue de 60 secondes, 2 et 4 jours après exercice. Leurs résultats ont montré une diminution significative de l'activation volontaire 2 jours ( $-4,6\%$  ;  $p<0,001$ ) et 4 jours ( $-11,1\%$  ;  $p<0,001$ ) après l'exercice inducteur de dommages musculaires.

**Tableau 2** : Evolution du niveau de force après un exercice inducteur de dommages musculaires

Études	Sujets	Exercice	Paramètre mesuré	Temps (heures après l'exercice)				
				0h	24h	48h	72h	96h
Child et al. (1999)	4 ♂ + 4 ♀ non entraînés	70 contractions excentriques 100°.s <sup>-1</sup>	EXT ISO (110°)	-51% ES=-2,31 (-3,42 à -0,94)				
Crameri et al. (2007)	8 ♂ non entraînés	210 contractions excentriques 100 à 30°.s <sup>-1</sup> 110 à 180°.s <sup>-1</sup>	EXT ISO (90°)	-16% ES = -1,32 (-2,32 à 0,18)	-24% ES = -2,5 (-3,64 à -1,09)			
Howatson et al. (2009)	16 ♂ sportifs amateurs	100 DJ à 60 cm	EXT ISO (70°)	-22% ES = -4,44 (-5,6 à 3,07)	-21% ES = -3,30 (-4,27 à 2,17)	-13% ES = -2,30 (-3,12 à -1,36)	-7% ES = -1,41 (-2,15 à -0,61)	-5% ES = -1,41 (-2,15 à -0,61)
MacIntyre et al. (2000)	12 ♂ sportifs amateurs	300 contractions excentriques 30°.s <sup>-1</sup>	EXT CONC	-17% ES = -0,70 (-1,50 à 0,15)	-20% ES = -0,82 (-1,62 à 0,04)			
			EXT EXC	-10% ES = -0,38 (-1,18 à 0,44)	-26% ES = -1,07 (-1,88 à -0,18)			
MacIntyre et al. (2001)	12 ♂ sportifs amateurs	300 contractions excentriques 30°.s <sup>-1</sup>	EXT EXC	-11% ES = -0,44 (-1,24 à 0,38)	-27% ES = -1,21 (-2,04 à -0,31)	-14% ES = -0,55 (-1,35 à 0,28)	-4% ES = -0,13 (-0,93 à 0,67)	
Miyama et Nosaka (2004)	8 ♂	100 DJ 60 cm	EXT ISO (90°)	-37% ES = -13,08 (-16,76 à -7,97)	-40% ES = -6,66 (-8,68 à -3,90)	-37% ES = -6,33 (-8,28 à -3,69)		
Paulsen et al. (2010)	11 ♂ (répondeurs modérés, n = 8) + (très répondeurs, n = 3)	300 contractions excentriques 30°.s <sup>-1</sup>	EXT CONC (60°.s <sup>-1</sup> )	-40% ES = -8,08 (-10,46 à -4,82)	-25% ES = -3,54 (-4,86 à -1,83)	-24% ES = -4,85 (-6,45 à -2,72)	-22% ES = -4,44 (-5,96 à -2,45)	-15% ES = -1,52 (-2,53 à -0,33)
			EXT CONC (60°.s <sup>-1</sup> )	-68% ES = -43,71 (-54,68 à -15,08)	-59% ES = -37,93 (-47,5 à -13,1)	-60% ES = -38,57 (-48,3 à -13,3)	-59% ES = -9,38 (-12 à -2,96)	-50% ES = -16,44 (-20,7 à -5,5)
Stupka et al. (2001)	8 ♂ + 8 ♀ non entraînés	36 contractions excentriques sur presse + 100 à 120% de 1RM sur appareil à quadriceps	EXT CONC (30°.s <sup>-1</sup> )	-30% ES = -5,30 (-6,62 à -3,73)	-20% ES = -2,36 (-3,19 à -1,40)	-25% ES = -1,41 (-2,15 à -0,61)		-15% ES = -2,12 (-2,93 à -1,21)
			EXT CONC (180°.s <sup>-1</sup> )	-25% ES = -3,54 (-4,54 à -2,35)	-20% ES = -1,89 (-2,66 à -1,01)	-22% ES = -2,59 (-3,46 à -1,60)		ns ES = -0,79 (-1,48 à -0,05)
			EXT EXC (30°.s <sup>-1</sup> )	-35% ES = -4,12 (-5,23 à -2,82)	-27% ES = -3,18 (-4,13 à -2,07)	-25% ES = -1,77 (-2,53 à -0,91)		ns ES = -1,18 (-1,90 à -0,40)

♂ = homme. ♀ = femme. ISO = force isométrique. CONC = force concentrique. EXC = force excentrique. EXT = muscles extenseurs du genou. FL = muscles fléchisseurs du genou. DJ = drop jump. 1RM = 1 répétition maximale. ns = non significatif. Les pourcentages représentent une différence significative. ES = taille de l'effet (Intervalle de Confiance à 95%). 0 ≤ ES ≤ 0,2 = trivial ; 0,2 ≤ ES ≤ 0,6 = petit ; 0,6 ≤ ES ≤ 1,2 = modéré ; 1,2 ≤ ES ≤ 2 = large ; 2 ≤ ES ≤ 4 = très large ; ES > 4 = presque parfait (Hopkins, 2002a).

Les résultats de Prasartwuth et al. (2005) confirment l'apparition d'une fatigue centrale après un exercice inducteur de dommages musculaires des fléchisseurs du coude. Les participants de cette étude ont réalisé un exercice composé de plusieurs blocs de 5 séries de 10 répétitions, les séries étaient entrecoupées d'un test de force isométrique volontaire maximale. Le principe était de réaliser le nombre de blocs de travail nécessaire pour atteindre une baisse de 40% de la force isométrique volontaire maximale. Le niveau d'activation volontaire était mesuré immédiatement après exercice, 24h, 48h et 96h après exercice. Le niveau d'activation volontaire était significativement diminué de 23% après exercice ( $p < 0,05$ ) et de 12,5%, 24h après exercice ( $p < 0,05$ ).

Asp et al. (1998) ont réalisé une étude dont un des buts était d'analyser l'évolution des réserves musculaires en glycogène suite à un exercice excentrique. Le protocole consistait à réaliser un exercice excentrique sur une jambe en sollicitant les muscles extenseurs du genou. Une biopsie était réalisée, avant et après exercice, au niveau du vaste externe. Après l'exercice inducteur de dommages musculaires, les réserves en glycogène musculaire avaient diminué passant de  $515 \pm 26 \text{ mmol.kg}^{-1}$  de muscle frais (moyenne  $\pm$  erreur standard) dans la jambe au repos à  $402 \pm 30 \text{ mmol.kg}^{-1}$  de muscle frais dans la jambe ayant réalisé l'exercice ( $p < 0,05$ ).

En résumé, les résultats des études présentées dans cette partie ont montré que la fatigue induite par un exercice inducteur de dommages musculaires est très importante. L'intérêt d'un exercice inducteur de dommages musculaire réside dans la standardisation de l'exercice et dans une diminution de force plus importante permettant de mieux appréhender l'influence des stratégies de récupération.

## **1.2. Les cinétiques de récupération après un match de football**

### **1.2.1. Description**

De nombreuses études se sont intéressées à l'évolution des marqueurs des dommages musculaires, de la performance et des marqueurs psychologiques suite à un match de football. Les marqueurs fréquemment utilisés sont : le niveau de force, la détente, la performance en sprint, les concentrations sanguines en protéines musculaires (créatine kinase, [CK] et myoglobine, [Mb]), des marqueurs de l'inflammation (interleukines (IL), IL-6, protéine C-réactive, leucocytes), des marqueurs du stress oxydatif (acide urique, substances réagissant avec l'acide Thio barbiturique TBARS, le glutathion sous sa forme réduite GSH ou oxydée

GSSG, les protéines carbonyles), des marqueurs subjectifs (niveau de douleurs musculaires, niveau de fatigue).

### 1.2.2. Le niveau de force

Concernant la force des membres inférieurs, certaines études se sont intéressées à l'évolution de la force des extenseurs du genou (Rampinini et al., 2011) et d'autres se sont intéressées également à l'évolution de la force des fléchisseurs du genou (Ascensão et al., 2008 ; Magalhães et al., 2010 ; Draganidis et al., 2015). Le tableau 3 présente les résultats obtenus pour la mesure de la force les jours qui suivent le match. Une analyse de la taille de l'effet montre un effet de la participation au match sur la performance allant de petit à large en fonction des études. Dans la majorité des études, les niveaux de force des fléchisseurs du genou et des extenseurs du genou n'ont pas retrouvé leur valeur initiale 72h après le match (Ascensão et al., 2008 ; Magalhães et al., 2010 ; Draganidis et al., 2015). Cela indique qu'une période de trois jours de récupération est insuffisante pour ce paramètre.

### 1.2.3. Puissance musculaire et performance en sprint

Le tableau 4 présente l'évolution de la performance en saut et celle en sprint dans les différentes études. La puissance musculaire, qui peut être évaluée par un saut, constitue un autre paramètre de la performance. Les résultats obtenus dans la littérature scientifique divergent quant à l'évolution de ces paramètres au cours du temps après un match. Ainsi, dans certaines études, 48h de récupération post-match sont suffisantes pour que la performance en saut revienne à des valeurs de repos (Ispirlidis et al., 2008 ; Fatouros et al., 2010 ; Silva et al., 2013) alors que pour d'autres études 72h de récupération sont insuffisantes pour totalement récupérer (Andersson et al., 2008 ; Magalhães et al., 2010).

Pour la performance en sprint, Silva et al. (2013) ont observé un retour aux valeurs initiales 24h après le match pour la performance sur un sprint de 30m. Andersson et al. (2008) observent, chez des joueuses de haut niveau, que 69h de récupération sont suffisantes pour que la performance en sprint sur 20m revienne à son niveau initial après un match. Ces résultats divergent avec ceux d'autres études où une période de récupération supérieure à 72h est nécessaire pour retrouver le niveau initial en sprint (Ascensão et al., 2008 ; Ispirlidis et al., 2008 ; Fatouros et al., 2010 ; Magalhães et al., 2010).

Ces différences de résultats peuvent s'expliquer par des protocoles différents d'une étude à l'autre. En effet, les sujets ayant participé aux études sont soit des joueurs ou joueuses de haut niveau (Andersson et al., 2008 ; Ispirlidis et al., 2008 ; Silva et al., 2013), soit des joueurs

évoluant dans des divisions inférieures (Magalhães et al., 2010), soit de jeunes joueurs (Fatouros et al., 2010).

**Tableau 3** : Evolution de la force au cours des jours qui suivent un match de football.

Etudes	Sujets	Paramètre mesuré	Temps (heures après le match)		
			24h	48h	72h
Andersson et al. (2008)	9 ♀ Haut niveau	EXT CONC (60°.s <sup>-1</sup> )	-6,5% (21h) ES = -0,63 (-1,54 à 0,35)	ns (51h) ES = 0 (-0,92 à 0,92)	
		FL CONC (60°.s <sup>-1</sup> )	-4% (21h) ES = -2,36 (-3,42 à 1,07)	ns (51h) ES = 0 (-0,92 à 0,92)	
Ascensão et al. (2008)	16 ♂ div. inf.	EXT CONC (90°.s <sup>-1</sup> )	-10% ES = 0,43 (-1,12 à 0,28)	-6,5% ES = -0,29 (-0,97 à 0,42)	-4% ES = -0,18 (-0,87 à 0,52)
		FL CONC (90°.s <sup>-1</sup> )	-14% ES = -0,81 (-1,51 à -0,07)	-10% ES = -0,66 (-1,35 à 0,07)	-8% ES = -0,50 (-1,19 à 0,22)
Draganidis et al. (2015)	34 ♂ div. inf.	EXT CONC (60°.s <sup>-1</sup> )	-9,5% (12h) ES = -0,12 (-0,60 à 0,36)	-4,8% (36h) ES = -0,03 (-0,51 à 0,44)	ns ES = 0,07 (-0,41 à 0,54)
		EXT CONC (180°.s <sup>-1</sup> )	-8,6% (12h) ES = 0,13 (-0,35 à 0,60)	-5,2% (36h) ES = 0,19 (-0,29 à 0,66)	ns ES = 0,30 (-0,18 à 0,77)
		EXT ISO	-11,9% (12h) ES = -0,16 (-0,64 à 0,32)	-6% (36h) ES = -0,10 (-0,58 à 0,37)	-6% (60h) ES = -0,10 (-0,58 à 0,37)
		EXT EXC (60°.s <sup>-1</sup> )	-9% (12h) ES = -0,14 (-0,62 à 0,34)	-4,5% (36h) ES = -0,05 (-0,52 à 0,43)	ns ES = 0,01 (-0,47 à 0,48)
		EXT EXC (180°.s <sup>-1</sup> )	-8,8% (12h) ES = -0,16 (-0,63 à 0,32)	-2,9% (36h) ES = -0,05 (-0,53 à 0,42)	ns ES = 0 (-0,48 à 0,48)
		FL CONC (60°.s <sup>-1</sup> )	-12,1% (12h) ES = -0,20 (-0,68 à 0,28)	-7,3% (36h) ES = -0,13 (-0,61 à 0,35)	-2,4% (60h) ES = -0,02 (-0,50 à 0,45)
		FL CONC (180°.s <sup>-1</sup> )	-27,5% (12h) ES = -0,06 (-0,54 à 0,41)	-13,8% (36h) ES = 0,06 (-0,42 à 0,53)	-10,3% (60h) ES = 0,15 (-0,33 à 0,62)
		FL ISO	-13,3% (12h) ES = -0,12 (-0,59 à 0,36)	-11,1% (36h) ES = -0,09 (-0,56 à 0,39)	-8,9% (60h) ES = -0,07 (-0,54 à 0,41)
		FL EXC (60°.s <sup>-1</sup> )	-19% (12h) ES = -0,16 (-0,63 à 0,32)	-12,8% (36h) ES = -0,19 (-0,67 à 0,28)	-6,4% (60h) ES = -0,08 (-0,55 à 0,40)
		FL EXC (180°.s <sup>-1</sup> )	-35,8% (12h) ES = -0,51 (-0,99 à -0,02)	-22,6% (36h) ES = -0,34 (-0,81 à 0,14)	-9,4% (60h) ES = -0,17 (-0,65 à 0,30)
Magalhães et al. (2010)	16 ♂ Div. inf.	EXT CONC (90°.s <sup>-1</sup> )	-8% ES = -0,46 (-1,15 à 0,25)	-6,1% ES = -0,35 (-1,04 à 0,35)	-4,7% ES = -0,27 (-0,96 à 0,43)
		FL CONC (90°.s <sup>-1</sup> )	-15% ES = -0,74 (-1,44 à -0,01)	-11,5% ES = -0,57 (-1,26 à 0,15)	-7% ES = -0,24 (-0,93 à 0,46)
Rampinini et al. (2011)	20 ♂ Haut niveau	EXT ISO (90°)	-6% ES = -0,30 (-0,91 à 0,33)	ns ES = 0,07 (-0,55 à 0,69)	
Silva et al. (2013)	7 ♂ haut niveau	EXT CONC (90°.s <sup>-1</sup> )	ns ES = -0,25 (-1,28 à 0,82)	ns ES = -0,13 (-1,17 à 0,92)	ns ES = -0,09 (-1,13 à 0,97)
		FL CONC (90°.s <sup>-1</sup> )	ns ES = -0,28 (-1,31 à 0,79)	ns ES = -0,19 (-1,22 à 0,88)	ns ES = -0,11 (-1,15 à 0,95)

♂ = homme. ♀ = femme. ISO = force isométrique. CONC = force concentrique. EXC = force excentrique. EXT = muscles extenseurs du genou. FL = muscles fléchisseurs du genou. ns = non significatif. (21h) = correspond au temps de mesure du paramètre. div. inf. = divisions inférieures. Les pourcentages représentent une différence significative. ES = taille de l'effet (Intervalle de Confiance à 95%). 0 ≤ ES ≤ 0,2 = trivial ; 0,2 ≤ ES ≤ 0,6 = petit ; 0,6 ≤ ES ≤ 1,2 = modéré ; 1,2 ≤ ES ≤ 2 = large ; 2 ≤ ES ≤ 4 = très large ; ES > 4 = presque parfait (Hopkins, 2002a).



Les outils utilisés dans les différentes études ainsi que le type de saut réalisé peuvent également influencer les résultats obtenus. Le saut réalisé était un saut en contremouvement libre (Magalhães et al., 2010) ou avec les mains fixes (Andersson et al., 2008 ; Ispirlidis et al., 2008 ; Fatouros et al., 2010 ; Silva et al., 2013). La distance de sprint était différente entre les études. Elle était de 5 m (Silva et al., 2013), 20 m (Andersson et al., 2008 ; Ispirlidis et al., 2008 ; Fatouros et al., 2010), 30 m (Silva et al., 2013) ou 40 m (Rampinini et al., 2011).

**Tableau 4** : Evolution de la performance en sprint et en saut suite à un match de football

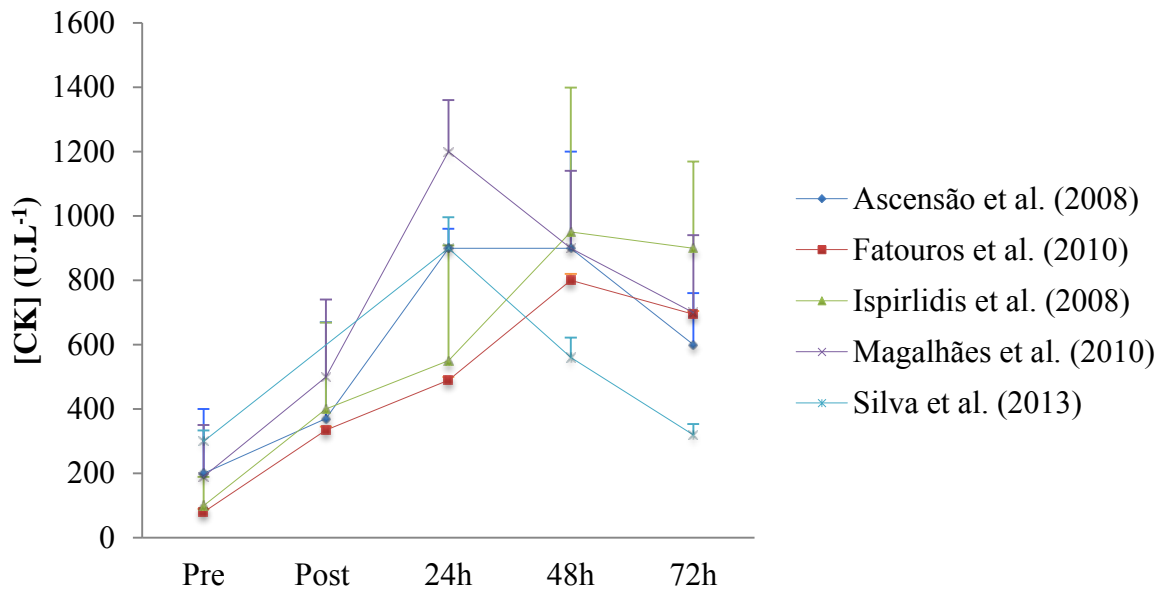
Études	Sujets	Paramètre mesuré	Temps (heures après le match)			
			0h	24h	48h	72h
Andersson et al. (2008)	9 ♀ Haut niveau	20 m	+3% ES = 1,04 (0,01 à 1,97)	ns (21h) ES = -0,28 (-1,20 à 0,66)	ns (45h) ES = 0 (-0,92 à 0,92)	ns (69h) ES = -0,19 (-1,11 à 0,75)
		CMJ	-4% ES = -0,42 (-1,34 à 0,53)	-2% (21h) ES = -1,05 (-1,98 à -0,02)	-2% (45h) ES = -0,94 (-1,87 à -0,07)	-3% (69h) ES = -0,25 (-1,17 à 0,69)
Ascensão et al. (2008)	16 ♂ div. inf.	20 m	+7% ES = 1,97 (1,08 à 2,75)	+6% ES = 0,30 (-0,41 à 0,99)	+5% ES = 0,90 (0,15 à 0,60)	+5% ES = 1,14 (0,37 à 1,86)
Fatouros et al. (2010)	30 ♂ jeunes	20 m		+8% ES = 1,95 (0,53 à 1,61)	+5% ES = 0,72 (0,19 à 1,24)	+3% ES = 0,55 (0,03 à 1,06)
		CMJ		-12% ES = -1,16 (-1,69 à 0,60)	ns ES = -0,55 (-1,06 à 0,03)	ns ES = -0,37 (-0,88 à 0,14)
Ispirlidis et al. (2008)	24 ♂ Haut niveau	20 m		+2% ES = 0,19 (-0,38 à 0,75)	+2,5% ES = 0,20 (-0,37 à 0,77)	+1,6% ES = 0,12 (-0,45 à 0,68)
		CMJ		-13,9% ES = -0,48 (-1,05 à 0,10)	ns ES = -0,38 (-0,94 à 0,20)	ns ES = -0,58 (-0,41 à 0,99)
Magalhães et al. (2010)	16 ♂ div. inf.	20 m	+9% ES = 1,06 (0,29 à 1,77)	+7% ES = 0,70 (-0,03 à 1,40)	+6% ES = 0,57 (-0,15 à 1,26)	+5% ES = 0,66 (-0,07 à 1,35)
		CMJ libre	-11% ES = -0,57 (-1,27 à 0,15)	-7,1% ES = -0,40 (-1,09 à 0,31)	-7,1% ES = -0,33 (-1,01 à 0,38)	-7,9% ES = -0,41 (-1,10 à 0,30)
Rampinini et al. (2011)	20 ♂ haut niveau	40 m	+3% ES = 0,75 (0,09 à 1,37)	+1% ES = 0,31 (-0,32 à 0,92)	ns ES = 0,12 (-0,50 à 0,74)	
Silva et al. (2013a)	7 ♂ haut niveau	30 m		ns ES = 0,13 (-0,93 à 1,17)	ns ES = 0 (-1,05 à 1,05)	ns ES = 0,05 (-1 à 1,10)
		CMJ		-7% ES = -0,55 (-1,58 à 0,55)	ns ES = -0,11 (-1,15 à 0,95)	ns ES = -0,04 (-1,08 à 1,01)

♂ = homme. ♀ = femme. 20 m = temps sur la distance indiquée. CMJ = détente lors d'un saut en contremouvement. CMJ libre = détente lors d'un saut en contremouvement avec les mains libres. ns = non significatif. (21h) = correspond au temps de mesure du paramètre. div. inf. = divisions inférieures. Les pourcentages représentent une différence significative. ES = taille de l'effet (Intervalle de Confiance à 95%). 0 ≤ ES ≤ 0,2 = trivial ; 0,2 ≤ ES ≤ 0,6 = petit ; 0,6 ≤ ES ≤ 1,2 = modéré ; 1,2 ≤ ES ≤ 2 = large ; 2 ≤ ES ≤ 4 = très large ; ES > 4 = presque parfait (Hopkins, 2002a).

#### 1.2.4. Les marqueurs sanguins des dommages musculaires

Les concentrations en créatine kinase [CK] et en myoglobine [Mb] sont souvent utilisées comme marqueur sanguin des dommages musculaires (Warren, 1999). La réalisation d'un exercice comprenant des contractions excentriques peut entraîner, au niveau du muscle, des déchirures du disque Z, du sarcolemme, de la lame basale, du tissu conjonctif, des éléments contractiles et du cytosquelette (Koch et al., 2014). La créatine kinase et la myoglobine sont deux protéines se trouvant dans le muscle. La réalisation d'un exercice induisant des dommages musculaires augmente la perméabilité de la membrane musculaire, ce qui a pour conséquence une augmentation des concentrations sanguines en protéines musculaires (Koch et al., 2014). Les concentrations sanguines en protéines musculaires augmentent après un exercice inducteur musculaire d'où leur utilisation comme marqueur des dommages musculaires (Clarkson and Hubal, 2002). Comme le montre la figure 1, leur évolution après un match de football est variable, mais on observe généralement un pic de [CK] 24h après le match, avec des valeurs comprises entre 900 et 1200 U.L<sup>-1</sup> (Ascensão et al., 2008 ; Magalhães et al., 2010 ; Silva et al., 2013) ou 48h après le match, avec des valeurs comprises entre 800 et 950 U.L<sup>-1</sup> (Ispirlidis et al., 2008 ; Fatouros et al., 2010). Ces valeurs reviennent à des valeurs de repos entre 72h (Silva et al., 2013) et 120h de repos (Ascensão et al., 2008 ; Ispirlidis et al., 2008 ; Magalhães et al., 2010 ; Draganidis et al., 2015). Pour ce qui est des [Mb], les résultats de l'étude de Silva et al. (2013) ont montré un pic 24h après le match et un retour aux valeurs de repos 48h après le match. Cependant, dans cette étude, les [Mb] n'étaient pas mesurées immédiatement après le match. Or, plusieurs études notent un pic de [Mb] immédiatement après le match avec des valeurs pouvant atteindre 350 µg.l<sup>-1</sup> (Ascensão et al., 2008 ; Magalhães et al., 2010).

L'utilisation des concentrations en protéines musculaires présente néanmoins quelques limites. La concentration sanguine est une fonction de ce qui est produit dans le muscle et ce qui est éliminé (Clarkson et Hubal, 2002). De ce fait, les concentrations sanguines en protéines musculaires ne sont pas uniquement dépendantes du niveau de dommages musculaires, mais également de la vitesse à laquelle les protéines seront éliminées (Clarkson et Hubal, 2002). Les concentrations en créatine kinase présentent également une grande variabilité entre les personnes (Clarkson et Hubal, 2002 ; Koch et al., 2014).



**Figure 1** : Evolution des concentrations en créatine kinase après un match de football.

#### 1.2.5. Les marqueurs de l'inflammation

La réalisation d'un exercice excentrique entraîne une réponse inflammatoire aigüe qui se prolonge plusieurs jours et peut accentuer les dommages musculaires (Cannon et St Pierre, 1998 ; Smith et al., 2000 ; Suzuki et al., 2000). Parmi les médiateurs de l'inflammation on trouve les interleukines, notamment l'interleukine-6 (IL-6) qui est une protéine dont un des rôles est d'attirer les cellules immunitaires vers la zone lésée suite à un exercice inducteur de dommages musculaires (Scheller et al., 2011). En football, immédiatement après un match, la réponse inflammatoire se traduit par une augmentation des [IL-6] qui reviennent à leur valeur de référence 24h après le match (Ispirlidis et al., 2008). La protéine C-réactive (CRP) est un autre marqueur de la phase aigüe de l'inflammation dont les concentrations sanguines augmentent après un match (Ascensão et al., 2011 ; Silva et al., 2013). Un pic des [CRP] a été observé 24h après la participation à un match (Ascensão et al., 2011 ; Silva et al., 2013). Dans les études ayant dosé ce paramètre, le retour aux valeurs initiales se fait 48h après le match (Ascensão et al., 2011 ; Silva et al., 2013). Lors de la réalisation d'un exercice excentrique, les leucocytes sont attirés vers la zone lésée afin d'enclencher un processus de réparation des fibres musculaires endommagées (Cannon et St Pierre, 1998 ; Smith et al., 2000 ; Suzuki et al., 2000). Cet indicateur peut être utilisé comme marqueur de l'inflammation, comme cela a été le cas dans certaines études (Ascensão et al., 2008 ; Fatouros et al., 2010 ; Magalhães et al., 2010). Pour les cinétiques des leucocytes après un

match, un pic est observé immédiatement après le match avec un retour aux valeurs initiales 48h après le match.

#### 1.2.6. Les marqueurs du stress oxydatif

L'exercice constitue un stress inducteur d'espèces réactives de l'oxygène (Niess et Simon, 2007). Le muscle squelettique intègre différents mécanismes potentiellement responsables d'une augmentation de la formation d'espèces réactives de l'oxygène à l'exercice (Niess et Simon, 2007). Cette augmentation peut avoir des effets néfastes sur la contractilité musculaire et accentuer les dommages musculaires (Kerskik et al., 2015). De nombreux indicateurs sanguins sont utilisés pour évaluer le niveau de stress oxydatif ce qui rend la comparaison entre les études difficile. De plus les résultats des différentes études qui se sont intéressées au stress oxydatif engendré par un match de football divergent, ce qui rend difficile la mise en évidence d'une évolution précise (Ascensão et al., 2008 ; Ispirlidis et al., 2008 ; Fatouros et al., 2010 ; Silva et al., 2013). Les valeurs des TBARS présentent une augmentation significative immédiatement après exercice (moyenne±erreur standard,  $7\pm 0,8$  uM) et un pic 24h après exercice ( $7,5\pm 0,3$  uM) (Ispirlidis et al., 2008). Les valeurs des TBARS reviennent au repos 72h après exercice (Ispirlidis et al., 2008). Les concentrations en acide urique ont été mesurées dans plusieurs études avec des évolutions différentes (Ascensão et al., 2008 ; Ispirlidis et al., 2008 ; Silva et al., 2013). Ispirlidis et al. (2008) observent une augmentation significative ( $p < 0,05$ ) des concentrations en acide urique 24h après le match, un pic 72h après le match (moyenne±erreur standard,  $55\pm 4,2$  mg.l<sup>-1</sup>) et un retour aux valeurs initiales 120h après le match. Les résultats d'Ascensão et al. (2008) diffèrent, puisqu'ils ont montré un pic des concentrations en acide urique 30 minutes après le match (moyenne±erreur standard,  $65\pm 0,5$  mg.l<sup>-1</sup>). Silva et al. (2013) ne trouvent pas d'augmentation significative des concentrations en acide urique après un match. Le Moal et al. (2016) ont analysé le lien entre charge de travail et statut antioxydant au cours d'une saison chez des footballeurs professionnels. Les résultats de leur étude ont montré une relation entre charge d'entraînement et statut antioxydant dans le sens d'une diminution du stress oxydatif avec une diminution de la charge d'entraînement. La variabilité de l'effort réalisé entre les matches pourrait expliquer la différence d'évolution trouvée entre les différentes études.

#### 1.2.7. Les marqueurs subjectifs

L'évolution des douleurs musculaires après un match présente une augmentation continue jusqu'à un pic obtenu le lendemain (Ascensão et al., 2008 ; Fatouros et al., 2010 ; Magalhães et al., 2010 ; Draganidis et al., 2015) ou 48h après le match (Ispirlidis et al., 2008). Le retour

aux valeurs initiales est effectif 72h ou plus après le match (Ispirlidis et al., 2008 ; Magalhães et al., 2010).

Les échelles de perception de la fatigue et de perception de la récupération sont également des outils développés pour évaluer la récupération après un exercice (Hooper et Mackinnon, 1995 ; Laurent et al., 2011). Cependant, à notre connaissance, aucune étude ne s'est intéressée à l'évolution de ces marqueurs au cours de jours suivant un match de football. De nouvelles études sont envisageables afin d'analyser le lien entre les marqueurs subjectifs de la récupération et les variables objectives comme, par exemple, la fonction neuromusculaire.

### 1.3. Variabilité des cinétiques de récupération

La reproductibilité d'un marqueur correspond à la fiabilité des mesures d'une variable (Atkinson et Nevill 1998 ; Bruton et al., 2000). Il s'agit d'un indicateur de la variabilité d'une mesure. Il existe deux types de reproductibilité : la reproductibilité relative et la reproductibilité absolue (Atkinson et Nevill 1998 ; Bruton et al., 2000). La reproductibilité relative est le degré auquel les sujets maintiennent leur position dans un échantillon lors de mesures répétées. La reproductibilité absolue correspond au degré auquel les mesures répétées varient pour chaque individu : plus la variation est faible plus la reproductibilité est élevée. Le coefficient de variation est le rapport entre l'écart-type et la moyenne, il est exprimé en pourcentage (Atkinson et Nevil, 1998). Selon Atkinson et Nevill (1998), un coefficient de variation est généralement considéré comme élevé lorsqu'il est au-dessus de 10%. Dans le cadre des cinétiques de récupération, la reproductibilité des marqueurs a été calculée dans certaines études et les résultats sont présentés dans le tableau 5. La mesure de la reproductibilité est importante car elle informe sur la variation de la mesure. Ce paramètre entre dans l'interprétation des résultats. Si une variable est modifiée de manière moins importante que la variabilité interindividuelle, alors les résultats obtenus peuvent être dus à la variabilité de la mesure et non du protocole appliqué aux sujets. Afin de vérifier si l'effet d'un protocole est réel, on peut également calculer le plus petit effet détectable (Smallest Worthwhile Change, SWC) qui est calculé de la manière suivante :  $0,2 \times \text{écart-type du groupe}$  sur les valeurs de référence (Page, 2014). Cet indicateur informe sur le plus petit changement nécessaire pour obtenir un effet dans des conditions de pratique.

**Tableau 5** : coefficient de variation des marqueurs des dommages musculaires utilisés dans les études

<b>Etudes</b>	<b>Paramètre mesuré</b>	<b>Coefficient de variation</b>
<b>Andersson et al. (2008)</b>	CMJ	<5%
	FL CONC (90°.s <sup>-1</sup> )	<5%
	EXT CONC (90°.s <sup>-1</sup> )	<5%
	[CK]	<5%
<b>Fatouros et al. (2010)</b>	Sprint 20 m	3,1%
	CMJ	3,4%
<b>Ispirlidis et al. (2008)</b>	Sprint 20 m	3,5%
	CMJ	8,4%
<b>Rampinini et al. (2011)</b>	Sprint 40 m (20 m + 20 m)	0,7%
	EXT ISO (90°)	6,1%
<b>Silva et al. (2013)</b>	Sprint 30 m	5,1%
	CMJ	3,5%
	FL CONC (90°.s <sup>-1</sup> )	4,3%
	EXT CONC (90°.s <sup>-1</sup> )	4,1%
	[CK]	3,8%

ISO = force isométrique. CONC = force concentrique. EXC = force excentrique. EXT = muscles extenseurs du genou. FL = muscles fléchisseurs du genou. CMJ = détente lors d'un saut en contremouvement. [CK] = concentrations en créatine kinase.

Le calcul de la reproductibilité des marqueurs de la récupération a été réalisé dans des conditions de repos. Il pourrait être intéressant d'évaluer la variabilité inter-individuelle suite à un match de football. Dans le cadre de cette revue de littérature, les coefficients de variation inter-individuels ont été calculés pour chaque évaluation réalisée dans les études ayant analysé les cinétiques de récupération après un match de football (tableau 6). Plusieurs observations ressortent de l'analyse de ces données. Premièrement, dans la majorité des études présentées, les marqueurs retenus présentent une variabilité très élevée pour chaque mesure, exception faite de la vitesse en sprint. Deuxièmement, les coefficients de variation inter-individuels d'un marqueur diffèrent en fonction du moment de la mesure. Pour exemple, dans l'étude d'Ispirlidis et al. (2008), le coefficient de variation interindividuel de la détente lors d'un saut en contre-mouvement est de 7,8% au repos et il passe à 16,7% 48h après le match. Dans le cas des cinétiques de récupération, la valeur moyenne obtenue pour un marqueur est modifiée après exercice (tableau 2 et 3). A l'intérieur du groupe de sujets, il y a des différences individuelles quant à la réponse à l'exercice. Cette variabilité est représentée par l'écart-type qui intègre la somme des écarts à la moyenne (Altman et Band, 2005 ; Biau, 2011). Si ces différences restent stables d'une mesure à l'autre (par exemple entre 24h et 48h), alors le coefficient de variation sera le même pour les deux points de mesure. Dans le tableau 6, les coefficients de variation diffèrent d'un point à l'autre dans la majorité des cas. Cela suggère qu'il existe une variabilité inter-individuelle importante des cinétiques de récupération après un match de football.

**Tableau 6** : Coefficient de variation interindividuel des marqueurs des dommages musculaires suite à un match de football

Etudes	Paramètre mesuré	Coefficient de variation						
		Pre	Post	24h	48h	72h	96h	120h
Andersson et al. (2008)	Sprint 20 m		22%	64% (21h)	20% (45h)	3,8% (69h)		
	CMJ		55,8%	123% (21h)	46% (45h)	55% (69h)		
	FL CONC		50%	171% (21h)	50% (51h)	0%		
	EXT CONC		80%	39% (21h)	30% (51h)	20% (69h)		
	CK	51%	48%			55% (69h)		
	Douleurs	19%	15,4%			19% (69h)		
Ascensão et al. (2008)	Sprint 20 m	4%	5%	6,4%	6,5%	3,4%		
	FL CONC	13%	15%	14%	19%	14%		
	EXT CONC	24%	23%	27%	26%	25%		
	CK	92%	83%	15%	37%	21%		
	Douleurs		70%	67%	128%	206%		
Fatouros et al. (2010)	Sprint 20 m	6,2%		9%	12%	9%		
	CMJ	15%		13%	8%	11%		
	CK	12%	4%	2,7%	3,2%	2%		
	Douleurs		6,9%	5,9%	4,1%			
Ispirlidis et al. (2008)	Sprint 20 m	18%		54,4%	50%	20,4%	27%	37%
	CMJ	7,8%		12,2%	16,7%	13,8%	10%	12%
	CK	140%	70%	61%	45%	25%	56%	77%
	Douleurs			56%	59%	76%	117%	31%
Magalhães et al. (2010)	Sprint 20 m	2,95%	3,22%	3,16%	3,12%	3,11%		
	CMJ libre	5,5%	4%	3,8%	6%	5%		
	FL CONC	4,4%	3,7%	4,2%	4,1%	8,5%		
	EXT CONC	9,8%	10,2%	5,5%	5,2%	7,8%		
	CK	159%	45%	13%	34%	27%		
	Douleurs		7%	24%	55%	80%		
Rampinini et al. (2011)	Sprint 40 m	2,7%	3,7%	2,9%	2%			
	EXT ISO	20%	18%	24%	20%			
	CK	73%	49%	54%	51%			
	Douleurs	102,8%	43%	74%	63%			
Silva et al. (2013)	Sprint 30 m	6%		4%	6%	0,6%		
	CMJ	15%		12%	14%	14%		
	FL CONC	21%		26%	16%	20%		
	EXT CONC	17%		16%	11%	19%		
	CK	30%		28%	29%	28%		

ISO = force isométrique. CONC = force concentrique. EXC = force excentrique. EXT = muscles extenseurs du genou. FL = muscles fléchisseurs du genou. CMJ = détente lors d'un saut en contremouvement. CMJ libre = détente lors d'un saut en contremouvement avec les mains libres. CK = créatine kinase.

Cette variabilité se retrouve également suite à la réalisation d'un exercice simulant un match de football (tableau 7). Il peut également être émis l'hypothèse d'une variabilité intra individuelle des cinétiques de récupération.

Cette hypothèse est confirmée par Russell et al. (2015) qui ont réalisé une étude dont un des buts était d'examiner la variabilité de certains marqueurs de la récupération lors de différents matches. Ils ont évalué l'évolution de la créatine kinase et de la puissance développée lors d'un saut au cours des 48h qui suivaient quatre matches différents. Leurs résultats indiquaient

une variabilité de la puissance développée lors d'un saut de 10,9%, 11% et 9,9% respectivement pour les valeurs de repos, à 24h et à 48h. La variabilité des concentrations en créatine kinase était de 41,7% ; 30% et 34,3% respectivement pour les valeurs de repos, à 24h et à 48h. Harper et al. (2016) ont analysé la variabilité de la réponse immédiatement après un exercice simulant un match de football. Les résultats de cette étude ont montré un coefficient de variation intra-individuel de 2,2% pour la performance en sprint sur 20m, 3,5% pour la détente lors d'un saut en contre mouvement et 20,5% pour la créatine kinase. Ces résultats, ne prennent pas en compte les réponses dans les jours qui suivent l'exercice et d'autres études sont nécessaires pour analyser la variabilité des cinétiques de récupération après une simulation de match.

**Tableau 7** : Coefficient de variation interindividuel des marqueurs des dommages musculaires suite à une simulation de match

Etudes	Paramètre mesuré	Coefficient de variation					
		Pre	Post	24h	48h	72h	96h
Bailey et al. (2007)	FL ISO	13,3%		14,9%	6,5%		
	CK	37,2%	35,2%	19%	35,2%		
	Douleurs	150%	36,8%	37,5%	15,2%		
Leeder et al. (2014)	CMJ		6,1%	6,2%	5,5%	4,2%	
	EXT ISO		23,1%	6,5%	8,8%	4,5%	
	CK	76,7%		88,3%	100%	74,7%	
	Douleurs		81,2%	48,7%	40,6%	59,8%	
Magalhães et al. (2010)	Sprint 20 m	2,4%	2,3%	1,7%	2,3%	2,3%	
	CMJ libre	5,6%	5,4%	5,3%	6,1%	5,3%	
	FL CONC	4,4%	3,7%	4,2%	4,1%	8,5%	
	EXT CONC	5,5%	4,3%	5,3%	4,3%	6%	
	CK	159%	75,5%	17,5%	33,4%	52,5%	
	Douleurs		24%	15%	60%	80%	
Nédélec et al. (2013b)	SJ	9,9%	10,2%	8,4%	9,2%		
	CMJ	12,8%	10,2%	8,2%	9,4%		
	FL EXC	11,5%	13,5%	11,3%	9,7%		
	Douleurs	39,4%	20,9%	33,3%	28,2%		
Nédélec et al. (2013c)	CMJ	6,7%	8,3%	7%	8%	9,5%	
	CK	86,7%	67,5%	77,1%	76,4%	95%	
	Douleurs	20%	30%	20,8%	14,3%	36,7%	

ISO = force isométrique. CONC = force concentrique. EXC = force excentrique. EXT = muscles extenseurs du genou. FL = muscles fléchisseurs du genou. CMJ = détente lors d'un saut en contremouvement. CMJ libre = détente lors d'un saut en contremouvement avec les mains libres. CK = créatine kinase.

En résumé, il existe une variabilité inter-individuelle importante des marqueurs des dommages musculaires suite à un match de football et une simulation de match. Les



cinétiques de récupération sont également très variables d'un match à l'autre. Pour expliquer ces différences, il faut prendre en compte certains facteurs qui peuvent influencer ces cinétiques de récupération. La partie qui suit abordera les facteurs potentiels qui influencent les cinétiques de récupération après un match.

#### 1.4. Facteurs pouvant influencer les cinétiques de récupération

La réalisation d'un exercice inducteur de dommages musculaires entraîne une fatigue, et la durée nécessaire pour récupérer est fonction du niveau de dommages musculaires induits par l'exercice (Clarkson et al., 1992 ; Clarkson and Hubal, 2002 ; Paulsen et al., 2012). Le niveau de force représente le meilleur marqueur indirect des dommages musculaires pouvant être utilisé pour évaluer la récupération (Warren, 1999). De ce fait, plus la baisse de force sera importante, plus longue sera la récupération. Cependant, la variabilité inter-individuelle est élevée, un même exercice peut induire une diminution de 55% chez un sujet et 20% chez un autre sujet (Gulbin et Gafney, 2002). De nombreux facteurs ont été proposés pour expliquer cette variabilité parmi lesquels le niveau initial de force (Sayers et al., 2003 ; Paulsen et al., 2012), le niveau d'entraînement (McHugh et al., 1999 ; Newton et al., 2008 ; Johnston et al., 2015), l'expérience (Hunkin et al., 2014), l'âge (Easthope et al., 2010 ; Brisswalter and Nosaka, 2013), les aspects hormonaux (Schoenfeld, 2013), l'activité réalisée pendant le match (Howatson et al., 2007 ; Nosaka et Sakamoto, 2001), le poste (Di Salvo et al., 2007 ; Bradley et al., 2009 ; Andrzejewski et al., 2013), le contexte du match (Samuels, 2012), certains états psychologiques (Stults-Kolehmainen et al., 2014) et l'interaction entre perception de l'effort et douleurs musculaires (Knicker et al., 2011).

##### 1.4.1. Le niveau initial de force

Les résultats de Sayers et al. (2003) présentent un intérêt particulier. Dans cette étude, les auteurs avaient pour but d'analyser les variables pouvant expliquer la variabilité des réponses suite à un exercice inducteur de dommages musculaires. Au préalable, trente-six sujets ont réalisé un exercice excentrique des fléchisseurs du coude constitué de 2 séries de 25 répétitions. Ensuite, en fonction de leur réponse à l'exercice, vingt sujets étaient retenus pour la suite de l'étude. Les sujets étaient répartis en deux groupes de la manière suivante : un groupe était composé des 10 sujets ayant la diminution de force la plus importante après exercice (répondeurs) ; un autre groupe était composé des 10 sujets ayant la diminution de force la plus faible après exercice (non répondeurs). Le niveau de force isométrique maximale volontaire initial n'était pas significativement différent entre les deux groupes, mais notre

analyse de la taille de l'effet ( $ES = 1,75$  ; Intervalle de confiance à 90% ( $IC_{90\%} = 0,66$  à  $2,70$ ) montre une différence large entre le groupe des répondeurs (moyenne±écart type ;  $82,7\pm 6,4$  N.m) et le groupe des non répondeurs ( $97\pm 9,6$  N.m). Leurs résultats indiquent que la réponse à l'exercice est significativement influencée par le niveau de force développé pendant l'exercice. Ainsi le pic de force moyen développé à l'exercice était moins élevé dans le groupe de sujets répondeurs en comparaison avec les sujets non répondeurs (moyenne±erreur standard ;  $68,9\pm 5,9$  contre  $74\pm 7,1$  N.m lors de la première série ;  $50,5\pm 5$  contre  $60,8\pm 5,8$  N.m lors de la deuxième série ;  $p < 0,001$ ). Les sujets capables de développer un niveau de force élevé pendant l'exercice avaient un niveau de fatigue moindre après l'exercice.

Ahtiainen et Häkkinen (2009) ont comparé les réponses et la récupération suite à un exercice en force entre des sujets très entraînés en force et des sujets non-entraînés. Le niveau initial de force isométrique des extenseurs du genou était de 29% supérieur ( $p < 0,001$ ) chez les entraînés en comparaison avec les non-entraînés. En normalisant les données en pourcentage de la force initiale, les résultats ne montrent pas de différence entre les deux groupes quant à l'évolution du niveau de force au cours des 48h. Ces résultats diffèrent de ceux de Sayers et al. (2003) et pourraient s'expliquer par les membres sollicités (membres inférieurs contre membres supérieurs), le type d'exercice (exercice global de musculation contre exercice isolé) et le niveau des sujets (entraînés et non entraînés contre uniquement non entraînés). La principale limite de cette expérimentation réside dans le fait que le nombre de sujets était de 4 par groupe expérimental uniquement. Après calcul, la puissance statistique de la force isométrique immédiatement après exercice (puissance = 0,55) était faible. D'un point de vue statistique, la taille de l'effet et les intervalles de confiance (IC) n'ont pas été calculés ce qui aurait été plus adapté pour ce genre de protocole (Hopkins et al., 2009 ; Page, 2014).

Selon ces résultats, le niveau de force initial et le niveau de force développé lors de l'exercice pourraient influencer les cinétiques de récupération. Dans le domaine du football aucune n'étude n'a pour le moment analysé le lien entre cinétiques de récupération et niveau de force mais une étude s'est intéressée à la relation entre niveau de force des membres inférieurs sur un mouvement de demi-squat et les niveaux de créatine kinase 48h après un match (Owen et al., 2015). Ces mesures ont été réalisées chez des footballeurs professionnels au cours d'une saison complète. La période allant du mois d'août au mois de septembre était divisée en trois phases de 8 semaines chacune. Pour chaque phase une corrélation entre le niveau de force développé lors d'un mouvement de demi-squat et les niveaux de [CK] était réalisée. Les résultats indiquent une relation modérée lors de la phase 1 (coefficient de corrélation  $r = -$

0,46) et une relation large lors de la phase 2 ( $r = -0,51$ ) ainsi que lors de la phase 3 ( $r = -0,66$ ). Cependant l'absence d'IC ne permet pas de connaître le niveau de probabilité de contenir la valeur du paramètre correspondant à la population. Plus le niveau initial de force est élevé, plus les concentrations en créatine kinase sont faibles. Ces résultats corroborent ceux d'une étude réalisée chez des jeunes joueurs de rugby (Johnston et al., 2015) qui montre que les joueurs ayant une meilleure performance en squat ont des concentrations en créatine kinase plus faibles au cours de 48h qui suivent un match.

En résumé, le niveau initial de force pourrait influencer les cinétiques de récupération d'après-match. Les joueurs les plus forts musculairement semblent récupérer plus rapidement en comparaison avec les joueurs les plus faibles. Cette hypothèse reste néanmoins à confirmer.

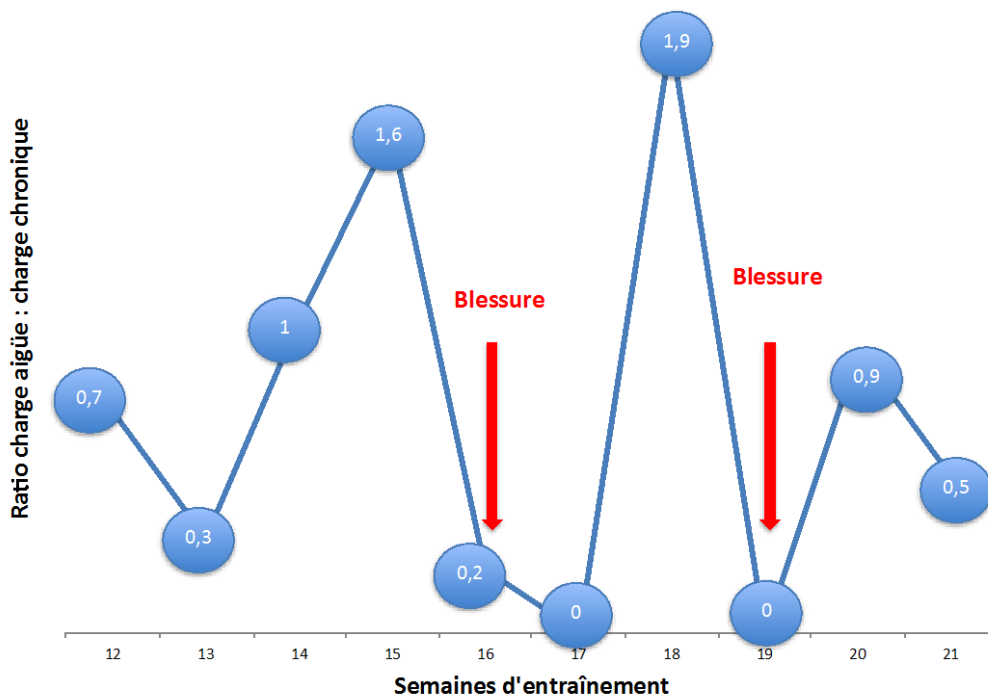
#### 1.4.2. Le niveau d'entraînement

La consommation maximale d'oxygène ( $VO_{2max}$ ) est fréquemment utilisée pour évaluer le niveau physique d'un individu (Bassett and Howley, 2000). Ce facteur peut avoir une influence sur la performance en sports collectifs puisque certaines études montrent une relation positive entre performance lors d'un test de répétition de sprints et  $VO_{2max}$  (Dupont et al., 2005). Un lien peut également exister entre capacité à récupérer et performance aérobie. Ainsi, des joueurs ayant un plus haut niveau de performance lors d'un test Yo-Yo sont susceptibles d'accélérer les cinétiques de récupération de la performance lors d'un saut en contremouvement (Johnston et al., 2015). D'autres études sont nécessaires afin d'analyser le lien entre le niveau d'entraînement et les cinétiques de récupération.

La familiarisation et l'habitude à réaliser un exercice peuvent également influencer les cinétiques de récupération (McHugh et al., 1999). Lorsqu'un exercice excentrique est réalisé, l'amplitude des dommages musculaires sera moindre si l'exercice a déjà été réalisé au préalable en comparaison avec une première réalisation (McHugh et al., 1999 ; McHugh et al., 2003). La familiarisation avec un exercice entraîne une baisse de force moindre immédiatement après exercice et un retour plus rapide aux valeurs initiales de la performance en force (Nosaka and Clarkson, 1995 ; Howatson et al., 2009). Newton et al. (2008) ont comparé les réponses de la fonction neuromusculaire suite à exercice inducteur de dommages musculaires entre des sportifs entraînés en force et des personnes non-entraînées. Les résultats indiquent une baisse de force isométrique et une baisse de force concentrique plus importantes immédiatement après exercice chez les sujets non-entraînés. De plus, au cours des 5 jours qui

ont suivi l'exercice, le niveau de force était significativement plus élevé chez les entraînés ( $p < 0,05$ ). Trois jours après exercice, les sujets entraînés ont totalement récupéré leur niveau initial de force, alors que 5 jours après exercice les sujets non-entraînés n'avaient toujours pas récupéré. Par conséquent, le niveau d'entraînement initial aurait une influence sur les cinétiques de récupération. Dans le cas de joueurs participant à plusieurs matches par semaine, l'habituelle exposition à ce type d'effort pourrait avoir un effet protecteur.

Le fait d'être exposé à une charge inhabituelle pourrait augmenter le risque de blessures chez les sportifs (Blanch et Gabbett, 2015 ; Gabbett, 2016). La charge aigüe correspond à la charge cumulée sur une semaine et la charge chronique correspond à la charge cumulée sur quatre semaines. L'augmentation brutale de la charge d'entraînement, c'est à dire lorsque le ratio charge aigüe : charge chronique est supérieur à 1,5 entraînerait un niveau de fatigue plus important que d'habitude. La figure 2 présente un exemple d'évolution du ratio charge aigüe : charge chronique.



**Figure 2** : Représentation graphique de l'évolution du ratio charge aigüe : charge chronique chez un joueur de rugby. D'après Blanch et Gabbett (2015).

Sur cette figure 2, on peut observer l'apparition d'une blessure après une augmentation brutale du ratio dont la valeur dépasse 1,5. Le nombre de jours de récupération insuffisants suite à ce pic de charge pourrait expliquer une augmentation du risque de blessures (Murray et al., 2014). Les résultats de ces études suggèrent que le fait d'augmenter, de manière brutale, la charge d'entraînement nécessite une récupération plus importante pour éviter une augmentation du risque de blessures.

En résumé, toutes ces données suggèrent que le niveau d'entraînement et la charge d'entraînement peuvent influencer le processus de récupération musculaire. De plus, le fait d'être familiarisé et d'avoir l'habitude de réaliser un exercice permet une récupération plus rapide.

#### 1.4.3. L'expérience du joueur

L'accumulation d'un stress physiologique pendant une saison sportive peut prédisposer des joueurs de football à une incapacité à faire face à aux demandes de l'entraînement et des matches ce qui peut compromettre la performance et la récupération (Silva et al., 2014). Lors d'une période présentant de nombreux matches (par exemple trois matches par semaine) la performance réalisée en match pourrait être diminuée de manière plus importante chez les joueurs les moins expérimentés, ce qui pourrait être lié à une moindre capacité de récupération (Black et al., 2015).

La capacité à récupérer peut être différente entre des joueurs accédant au haut niveau et des joueurs ayant déjà plusieurs années de pratique. Cela s'observe notamment par l'analyse de marqueurs physiologiques et plus spécifiquement la créatine kinase (Hunkin et al., 2014). Les stress métabolique et mécanique subis par les joueurs de football les moins expérimentés, pourrait induire des perturbations plus importantes au cours de périodes où la charge de travail est élevée (Silva et al., 2014). Au cours d'une saison, les niveaux de CK sont plus élevés chez les joueurs les moins expérimentés. Cela pourrait être associé à des dommages musculaires résiduels résultant d'une période d'entraînement intense (Hunkin et al., 2014). De fait, la transition des catégories de jeunes à la catégorie senior ou le passage d'un niveau amateur à un niveau professionnel entraînent une charge plus élevée à l'entraînement et en match (Brewer et al., 2010). Si le ratio charge aigüe : charge chronique est supérieur à 1,5 le risque de blessures peut augmenter comme le montre la figure 2 (Blanch et Gabbett, 2015). Par conséquent, lors des premières années à haut niveau, des adaptations physiques et physiologiques entraînent le développement d'une meilleure capacité à intégrer les demandes

du match et de l'entraînement (Fortington et al., 2016). Il est fortement probable que les joueurs les plus expérimentés aient une meilleure capacité à tolérer des charges physiques importantes que les joueurs les moins expérimentés (Hunkin et al., 2014). De plus, les joueurs les plus expérimentés ont développé un plus haut niveau tactique et une meilleure intelligence de jeu alors que les moins expérimentés ont tendance à réaliser plus d'efforts ce qui occasionne un plus haut risque de blessure et un possible ralentissement des cinétiques de récupération (Fortington et al., 2016).

En résumé, l'expérience du joueur semble avoir une influence sur la capacité à récupérer. La récupération des joueurs les plus expérimentés est plus rapide que celle des joueurs les moins expérimentés. Les joueurs expérimentés sont ceux qui ont le plus de pratique à un niveau donné. L'expérience de jeu n'étant pas nécessairement liée à l'âge, ce dernier paramètre peut également influencer les cinétiques de récupération. C'est ce que nous allons aborder dans la partie suivante.

#### 1.4.4. Age

Bien que l'importance des dommages musculaires suite à un exercice puisse être le même indépendamment de l'âge, la régénération ou la réparation du tissu musculaire semble plus lente chez les joueurs les plus âgés (Easthope et al., 2010 ; Brisswalter et Nosaka, 2013).

La différence d'âge peut influencer les cinétiques de récupération de la force maximale volontaire et de l'endurance de force (Mc Lester et al., 2003 ; Easthope et al., 2010). Lorsque le niveau initial de force est plus élevé chez les joueurs les plus jeunes, la récupération sera plus rapide chez les joueurs les plus jeunes en comparaison avec les joueurs les plus âgés (Easthope et al., 2010). Pour un niveau de force identique, l'âge ne semble pas être un facteur influençant les cinétiques de récupération lors d'un exercice isolé (Lavender et Nosaka, 2006). Lors de la répétition d'un exercice, les joueurs les plus âgés auront des cinétiques de récupération de la force musculaire plus lentes que les jeunes joueurs (Lavender et Nosaka, 2007). L'effet protecteur fourni par la participation à un exercice (par exemple un match) sera moins important chez les joueurs les plus âgés en comparaison avec les joueurs les plus jeunes (Lavender et Nosaka, 2007). Parallèlement, bien que l'entraînement régulier renforce la résistance du muscle suite à un exercice inducteur de dommages musculaires, ce processus adaptatif est ralenti avec l'âge (Peake et al., 2010).

Les différentes cinétiques de récupération en fonction de l'âge peuvent être étudiées en comparant des variables comme le temps requis pour réparer les changements structurels et

fonctionnels induits par l'exercice ou le temps nécessaire à la reconstitution des réserves énergétiques (Fell et Williams, 2008).

La vitesse à laquelle un tissu peut cicatriser suite à un exercice et se préparer à un autre exercice va définir à quelle fréquence et à quelle intensité le tissu peut être exposé à un stress (Fell et Williams 2008). Une des causes possibles d'une récupération plus longue chez les joueurs plus âgés peut être un ralentissement de la cicatrisation et des adaptations musculaires suite à un exercice inducteur de dommages musculaires (Fell et Williams, 2008). Après un exercice inducteur de dommages musculaires, l'altération de la contraction musculaire se prolonge plusieurs jours après l'exercice et cette prolongation perdure plus longtemps chez les sportifs les plus âgés (Easthope et al., 2010). L'explication principale des perturbations des paramètres contractiles pourrait être une altération du couplage excitation-contraction attribuée à plusieurs mécanismes parmi lesquels une réduction de l'élimination du calcium du réticulum sarcoplasmique et une réduction de la vitesse ou de la force des ponts actine-myosine (Easthope et al., 2010). De plus, au regard des évidences scientifiques disponibles, la détérioration des mécanismes de la synthèse protéique pourrait être responsable de la récupération plus lente des joueurs plus âgés après un exercice (Brisswalter et Nosaka, 2013 ; Doering et al., 2015).

Les études menées sur les différences en substrats énergétiques soulignent les différences en fonction de l'âge pour les cinétiques de récupération à court terme de certains substrats énergétiques comme la phosphorylcréatine (Fell et Williams, 2008). Un exercice excentrique chez un sujet âgé va diminuer la resynthèse du glycogène (Costill et al., 1990 ; Hall et al., 1994 ; Fell et Williams, 2008). La réalisation d'un exercice inducteur de dommages musculaires entraîne un ralentissement de la resynthèse du glycogène (Costill et al., 1990) et des niveaux musculaires en GLUT-4, un transporteur du glucose, avec l'âge (Hall et al., 1994), suggérant un ralentissement de la reconstitution des réserves en énergie chez les joueurs plus âgés.

D'autres facteurs comme une moindre activité des cellules satellites avec l'avancement en âge peuvent contribuer à une récupération retardée du muscle chez les joueurs plus âgés (Doering et al., 2015 ; Fry et al., 2015). La voie de signalisation de la protéine mTORC1 (de l'anglais *mammalian target of rapamycin complex 1*, complexe 1 de la cible de la rapamycine chez les mammifères) connaît également des perturbations liées à l'âge suite à un exercice, avec une diminution de la phosphorylation de la kinase p70S6K1 responsable de la synthèse protéique

au niveau des ribosomes (Doering et al., 2015). Du fait d'un changement du nombre de cellules satellites et de leur réponse à un stimulus avec l'âge, il est possible que la régénération musculaire soit perturbée chez les joueurs les plus âgés (Buford et al., 2014).

Des réponses inflammatoires inadaptées suite à un exercice peuvent expliquer la détérioration à long terme de la masse et de la fonction musculaires avec l'âge (Peake et al., 2010). Des adaptations et une régénération musculaires plus lentes chez les joueurs les plus âgés peuvent résulter d'une inflammation et d'un stress chroniques (Peake et al., 2010). Les joueurs les plus âgés présentent des niveaux plus faibles de neutrophiles circulants et de concentrations en IL-6 dans l'heure qui suit l'exercice (Cannon et al., 1991 ; Cannon et al., 1994) et il est possible que ces niveaux plus faibles soient liés à une inflammation chronique (Peake et al., 2010). L'inflammation chronique limite la capacité des cellules immunitaires à répondre à un stimulus inflammatoire additionnel (Peake et al., 2010). De plus, le nombre moins élevé de macrophages dans le muscle squelettique avec l'âge peut inhiber la régénération musculaire suite à des dommages musculaires (Peake et al., 2010). Les macrophages stimulent la régénération musculaire en régulant l'expression des cellules pro-inflammatoires qui stimulent la phagocytose pour laisser place à des cellules anti-inflammatoires qui stimulent la myogenèse, la croissance fibrillaire et le recrutement des cellules satellites (Peake et al., 2010).

En résumé, les cinétiques de récupération pourraient être ralenties avec l'âge des joueurs. Ce ralentissement semble être dû à une diminution de la resynthèse du glycogène, de la synthèse protéique et de la vitesse de cicatrisation.

#### 1.4.5. Aspects hormonaux

Le modèle explicatif des dommages musculaires présente le stress mécanique comme étant le facteur dominant induisant des dommages musculaires (Tee et al., 2007). La contrainte mécanique de la contraction excentrique est une des causes principales des dommages musculaires induits par l'exercice (Clarkson and Hubal, 2002). L'étirement du muscle cause une déformation de certains sarcomères au sein du muscle au-delà de leur longueur de repos (Armstrong et al., 1991 ; Clarkson and Hubal, 2002). Il en résulte des dommages à l'ultrastructure du muscle, la matrice extracellulaire et probablement aux capillaires (Clarkson and Hubal, 2002). Les dommages musculaires constituent également un stimulus à une réponse inflammatoire aiguë dans le tissu musculaire caractérisée par la libération des médiateurs de l'inflammation (Malm, 2001). Un des rôles de l'inflammation aiguë est



l'élimination du tissu nécrosé ou des débris cellulaires qui favorise par la suite la réparation des fibres musculaires endommagées, des vaisseaux sanguins, des fibres nerveuses et de la matrice extracellulaire (Cannon and St Pierre, 1998). Le processus de régénération musculaire est basé sur une population de cellules spécifiques appelées cellules satellites et qui se situent entre la lame basale et le sarcolemme (Hawke et Garry, 2001 ; Schoenfeld, 2010 ; Kharraz et al., 2013). En réponse à un trauma du muscle, ces cellules sont activées, prolifèrent et migrent vers le site où se trouve les dommages musculaires (Hawke et Garry, 2001 ; Schoenfeld, 2010). En fonction du degré des dommages subis par le muscle, les cellules satellites vont fusionner avec la fibre endommagée ou fusionner entre elles pour construire une nouvelle fibre (Hawke et Garry, 2001 ; Chargé et Rudnicki, 2004). Certaines hormones comme la testostérone, l'hormone de croissance et l'IGF-1 agissent directement sur ces cellules satellites pour favoriser leur stimulation et leur prolifération (Chakravarthy et al., 2000 ; Sinha-Hikim et al., 2013 ; Schoenfeld, 2013). La testostérone est un des facteurs stimulant l'activation et la prolifération des cellules satellites (Sinha-Hikim et al., 2013) et, de ce fait, une augmentation des concentrations sanguines en testostérone augmente la synthèse protéique et favorise l'hypertrophie musculaire (Urban et al. 1995 ; Brodsky et al., 1996). La régénération musculaire est accélérée en présence de ces hormones et un milieu anabolique pourrait se répercuter de manière bénéfique sur les cinétiques de récupération. Il semblerait donc que l'augmentation des concentrations hormonales puisse accélérer la récupération suite à un exercice inducteur de dommages musculaires (Urban et al. 1995 ; Brodsky et al., 1996 ; Velloso, 2008).

Suite à un exercice, la synthèse protéique est stimulée grâce à des facteurs de signalisation. L'enzyme mTORC1 est une protéine centrale d'une voie de signalisation qui intègre les signaux nécessaires à l'expression des ARN messagers responsables de la synthèse protéique (Burd et al., 2013). L'entraînement en force permet une augmentation des concentrations en mTORC1, ce qui fait de l'exercice un stimulateur de la synthèse protéique (Damas et al., 2015 ; Bond, 2016). L'augmentation de la synthèse protéique musculaire induite par l'exercice se prolonge plus dans le temps et voit son pic se présenter plus tardivement dans les heures qui suivent l'exercice chez des personnes non-entraînées en comparaison avec des personnes entraînées (Damas et al., 2015). L'hypothèse présentée est que l'entraînement en force entraîne des adaptations dans le processus qui régule la synthèse protéique musculaire (Damas et al., 2015). La synthèse protéique musculaire est également influencée par les

facteurs hormonaux notamment la testostérone, l'hormone de croissance et l'IGF-1 (Schoenfeld, 2010).

En résumé, la testostérone, l'hormone de croissance et l'IGF-1 pourraient jouer un rôle dans la récupération après un match. Leur action est ciblée sur la synthèse protéique et sur la stimulation de la cicatrisation musculaire. Certaines séances de musculation permettent d'augmenter les concentrations hormonales (Kraemer et al., 1990 ; Simão et al., 2012). Toutefois, à notre connaissance, aucune étude ne s'est intéressée aux effets d'une séance de musculation induisant une augmentation des concentrations hormonales sur les cinétiques de récupération.

#### 1.4.6. Activité réalisée pendant le match

L'activité réalisée lors d'un match englobe la quantité et à l'intensité des actions réalisées lors d'un match. Lors de la réalisation d'un exercice inducteur de dommages musculaires, l'amplitude des dommages musculaires est influencée par l'intensité, le nombre de répétitions, la vitesse et la longueur d'étirement des contractions excentriques (Nosaka et Sakamoto, 2001 ; Chen et al., 2007 ; Howatson et al., 2007). Plusieurs études ont montré que l'amplitude des dommages musculaires est plus importante lorsque le nombre de contractions excentriques est plus élevé (Howatson et al., 2007 ; Nosaka et Sakamoto, 2001). De plus lorsque l'intensité des contractions excentriques est plus élevée, le niveau de dommages musculaires l'est également (Chen et al., 2007).

Les cinétiques de récupération sont également influencées par le nombre de contractions excentriques (Nosaka et Sakamoto, 2001) : plus le nombre de répétitions est élevé plus le retour à un niveau initial de force sera lent (Nosaka et Sakamoto, 2001). Cette relation se retrouve également pour les actions impliquant la puissance musculaire comme les sauts (Nédélec et al., 2015a). Nédélec et al. (2015a) ont analysé le lien entre le nombre d'actions spécifiques à l'activité football réalisées lors d'un match et les cinétiques de récupération. Dans cette étude, une analyse vidéo des actions réalisées au cours de 4 matches a été réalisée. Dix joueurs de football ont participé à cette étude. Au cours des 72h qui ont suivi le match, les auteurs ont évalué la performance en saut, la puissance et la vitesse lors d'un sprint sur tapis roulant non motorisé, la force isométrique des ischio-jambiers, les concentrations en créatine kinase et des marqueurs subjectifs comme les douleurs, le sommeil, la fatigue, le stress et la perception de la récupération. Les résultats ont montré une corrélation significative entre le nombre de sprints courts (>5m) et le niveau de douleurs 48h ( $r = 0.74$ ;  $IC_{95\%} : 0,35 \text{ à } 0,91$ ;

$p < 0,01$ ) et 72h ( $r = 0,57$ ;  $IC_{95\%}$ : 0,05 à 0,84;  $p < 0,05$ ) après le match. Il existe également une corrélation entre la baisse de performance en saut et le nombre de changements de direction, 24h après le match ( $r = -0,55$ ;  $IC_{95\%}$ : -0,84 à -0,03 ;  $p < 0,05$ ).

D'un match à l'autre, la variabilité du nombre d'actions à haute intensité est très importante puisqu'elle se situe entre 16 et 30% (Carling et al., 2013). Cette variabilité est liée à différents paramètres comme le niveau de l'adversaire, le système de jeu, les caractéristiques physiques individuelles des joueurs (Carling et al., 2013).

En fonction du contexte du match, l'activité réalisée sera différente et, par conséquent, l'amplitude des dommages musculaires sera également affectée puisqu'une baisse de force plus importante entraîne un temps de récupération plus long (Newton et al., 2008). Cela entraînerait une influence sur les cinétiques de récupération.

En résumé, l'activité réalisée au cours du match est un facteur influençant les cinétiques de récupération. Plus l'activité réalisée en match est importante, plus le temps de récupération nécessaire pour bien récupérer est long. Cependant, tous les joueurs ne réalisent pas la même activité au cours d'un match. En fonction du poste, du système de jeu et/ou de la stratégie, les efforts réalisés seront différents et cela peut avoir une conséquence sur les cinétiques de récupération.

#### 1.4.7. Poste de jeu

Des mesures indirectes de la charge de travail comme la distance totale parcourue ou celle parcourue à différentes intensités, évaluées par des systèmes d'analyse semi-automatisés sont les moyens qui ont été utilisés jusqu'à présent pour évaluer l'activité du joueur lors d'une compétition (Carling et al., 2008). D'autres outils comme les GPS (Global Positioning System) ou la LPM (Local Position Measurement) sont également utilisés afin d'obtenir des données sur le travail réalisé au cours d'un match (Buchheit et al., 2014). L'analyse du match fournit des informations concernant les exigences physiques des joueurs lors d'un match de football (Andrzejewski et al., 2013).

Les différentes analyses de matches montrent que les joueurs de football de haut niveau parcourent une distance moyenne comprise en 9 et 14 km et leur vitesse de course peut varier pouvant atteindre jusqu'à  $36 \text{ km.h}^{-1}$  (Bangsbo et al., 2006 ; Bloomfield et al., 2007). L'activité réalisée pendant un match peut avoir un effet sur les cinétiques de récupération. Cette activité

est étroitement liée au poste auquel le joueur évolue (Di Salvo et al., 2007 ; Bradley et al., 2009 ; Andrzejewski et al., 2013). L'analyse de 20 matches de Liga espagnole et 10 matches de Ligue des champions, avec un système d'analyse semi-automatisé (Amisco Pro, version 1.0.2, Nice, France), montre que les défenseurs centraux parcouraient moins de distance totale en comparaison avec les autres postes (Di Salvo et al., 2007). La distance totale parcourue la plus élevée étant celle des milieux de terrain axiaux et excentrés. Pour des courses à haute intensité (vitesse entre 19,1 et 23 km.h<sup>-1</sup>), les milieux excentrés parcourent la plus grande distance. Pour les sprints (vitesse > 23 km.h<sup>-1</sup>), ce sont les défenseurs latéraux, les milieux excentrés et les attaquants de pointe qui parcourent la plus grande distance. Ces résultats sont confirmés dans une étude d'Andrzejewski et al. (2013) qui se sont intéressés aux efforts en sprint réalisés en fonction du poste. L'analyse de l'activité à haute intensité et en sprint en fonction de la position des joueurs révèle des différences entre les postes. Les attaquants, les milieux excentrés et les défenseurs latéraux parcourent une distance plus élevée que les défenseurs centraux et les milieux axiaux (Andrzejewski et al., 2013). Pour des sprints (vitesse > 24 km.h<sup>-1</sup>) ce sont les défenseurs latéraux, les milieux excentrés et les attaquants de pointe qui parcourent la plus grande distance (Andrzejewski et al., 2013). Pour ce qui est du nombre total de sprints : les attaquants et les milieux excentrés sont ceux qui parcourent le plus de sprints dont la distance est comprise entre 10 et 20m et dont la durée est inférieure à 5 secondes. Les défenseurs latéraux sont ceux qui réalisent le plus de sprints dont la distance est supérieure à 20m et dont la durée est supérieure à 5 secondes (Andrzejewski et al., 2013).

Les accélérations, les décélérations (Osgnach et al., 2010), les contacts avec les adversaires, les sauts et les tacles (Stølen et al., 2005) devraient être inclus dans l'analyse des efforts réalisés par les joueurs. Ces actions induisent des dommages musculaires (Howatson et Milak, 2009 ; Nédélec et al., 2015a) et leur fréquence peut affecter le temps nécessaire pour récupérer complètement après une compétition (Nédélec et al., 2015a).

Le poste de jeu pourrait être un facteur influençant les cinétiques de récupération. Une relation existe entre la baisse de la fonction musculaire et le nombre d'actions inductrices de dommages musculaires lors d'un match (Nédélec et al., 2015a). Si le nombre et le type d'actions sont variables d'un poste à l'autre, le niveau de dommages musculaires engendrés, et, par conséquent, les cinétiques de récupération peuvent également être variables en fonction du poste.

En résumé, l'activité réalisée au cours d'un match diffère d'un poste à l'autre. Dans ce contexte, les actions inductrices de dommages musculaires pourraient varier elles aussi, avoir des conséquences sur le niveau de fatigue d'après match et, par conséquent, sur les cinétiques de récupération.

#### 1.4.8. Contexte du match

La localisation du match (domicile ou extérieur) peut avoir une influence sur la performance sportive (Courneya et Carron, 1992). Courneya et Carron (1992) ont présenté un modèle concernant l'avantage de jouer à domicile. Dans ce modèle la relation entre performance et localisation du match (domicile ou extérieur) est influencée par trois composantes : des facteurs liés à la localisation du match, l'état psychologique et le comportement. Les quatre variables liées à la localisation du match considérées comme pouvant avoir un impact sur la performance sont le public, le voyage et la familiarisation avec le lieu.

Bien que l'avantage de jouer à domicile ait été étudié sur la performance sportive, l'influence de la localisation du match sur les cinétiques de récupération n'a pas encore été abordée dans la littérature scientifique.

Le fait de jouer à domicile peut avoir un impact sur les aspects psychologiques du sportif. Les résultats de différentes études mettent en avant un plus haut niveau de confiance en soi et d'auto-efficacité lorsque les matches sont joués à domicile en comparaison avec les matches joués à l'extérieur (Terry et al., 1998).

Le but de l'étude Terry et al., (1998) était d'examiner l'influence de la localisation du match sur l'anxiété, la confiance en soi et l'humeur de sportifs avant la compétition. Les résultats montrent, que, lors de compétitions à domicile, les joueurs présentent une meilleure confiance en soi et plus de vigueur. Ils présentent également moins de tension, de dépression, de colère, de fatigue, d'anxiété cognitive et somatique. Cela peut s'expliquer par le fait que le public puisse engendrer une stimulation psychologique permettant d'améliorer la performance des sportifs évoluant à domicile (Nevill et Holder, 1999).

Le match à l'extérieur peut également avoir pour conséquence une altération du sommeil et une augmentation de la fatigue engendrée par le voyage. Le voyage est un stress additionnel fréquemment imposé aux sportifs de haut niveau lors de certaines compétitions (Fowler et al., 2015). La fatigue induite par un voyage peut s'accumuler lors d'une saison, ralentissant la capacité du sportif à récupérer (Samuels, 2012). La répétition des matches lors d'une saison

souvent combinée avec le stress du voyage peut entraîner un manque et une perturbation du sommeil, ce qui peut être délétère pour la récupération (Nédélec et al., 2015b).

La fatigue induite par un voyage est liée à la distance et à la fréquence des voyages réalisés lors d'une saison (Fullagar et al., 2015). Ainsi, Fowler et al., (2015) ont examiné les effets d'une simulation de vol international (9h et 13h de vol avec 2h d'escale) et une simulation de vol national (5h de vol) sur le sommeil et sur la performance lors d'un exercice de répétition de sprints. Pour simuler le vol les sujets étaient positionnés dans une cabine hypoxique simulant une altitude de 2093 m, une fraction inspirée en oxygène de 0,17% et dans des conditions de confort similaires à celles trouvées dans un avion. Les résultats indiquent une baisse de la performance en répétition de sprint le jour qui suivait la simulation de vol international.

Les effets du voyage n'ont été évalués que pour un seul vol et non pour une multiplication de vols sur une journée ou une semaine. Il peut être émis comme hypothèse que la multiplication de voyages sur une semaine ou une saison puisse influencer négativement la récupération. Des études en ce sens sont nécessaires pour confirmer ou non cette hypothèse.

En résumé, jouer un match à l'extérieur pourrait être préjudiciable pour la récupération puisque les composantes psychologique et environnementale semblent avoir une influence sur la récupération. De plus le voyage, effectué au cours de la nuit peut également affecter la qualité et la quantité de sommeil, et par conséquent, la récupération.

#### 1.4.9. Aspects psychologiques

Les facteurs psychologiques peuvent également influencer les cinétiques de récupération après un match. Les mesures des perturbations de l'humeur, du stress perçu, de la perception de la récupération sont utiles pour l'évaluation des athlètes et peuvent avoir une influence sur les cinétiques de récupération après un match (Saw et al., 2015).

Stults-Kolehmainen et al., (2014) se sont intéressés aux effets d'un stress chronique sur les cinétiques de récupération suite un exercice inducteur de dommages musculaires. Après avoir rempli un questionnaire d'évaluation du niveau de stress, les 31 participants étaient répartis en deux groupes : stress élevé et stress faible. Le niveau de force était évalué toutes les 24h au cours des 96h qui suivaient l'exercice. Leurs résultats ont indiqué que les sujets ayant un niveau de stress élevé présentaient une récupération de la force musculaire plus lente. Ainsi, les résultats ont montré que le stress chronique a un impact sur les cinétiques de récupération

de la force suite à un exercice inducteur de dommages musculaires en augmentant la durée nécessaire pour récupérer complètement (Stults-Kolehmainen et al., 2014).

Le discours délivré aux joueurs pourrait également influencer la récupération et la performance lors du match suivant. La comparaison de stratégies de récupération intégrant un feedback de l'entraîneur positif ou négatif peut influencer les réponses physiologiques suite à une compétition (Crewther and Cook, 2012). Plus précisément la diffusion de vidéos présentant des situations positives associées à un feedback positif de l'entraîneur aurait des effets bénéfiques sur les sécrétions hormonales, en comparaison avec une vidéo de situations négatives avec un feedback négatif de l'entraîneur (Crewther and Cook, 2012). La diffusion de vidéos montrant les joueurs dans des situations favorables favoriserait la sécrétion de testostérone qui est impliquée dans le processus de cicatrisation musculaire et permettrait la réalisation d'une meilleure performance lors du match qui suit (Crewther and Cook, 2012 ; Schoenfeld, 2013). Ces données suggèrent que les réponses physiologiques peuvent être influencées par une exposition à un événement stressant ou perçu comme tel (Crewther and Cook, 2012). Le résultat d'un match peut également avoir une influence sur les sécrétions hormonales. Suite à une défaite les concentrations en testostérone peuvent augmenter ou rester stables (Brondino et al., 2013) et le niveau de testostérone peut influencer l'engagement dans une nouvelle compétition (Mehta et Josephs, 2006). Le résultat d'un match peut également influencer l'humeur et pourrait influencer les cinétiques de récupération.

Il existe une relation temporelle entre des facteurs psychologiques et le temps nécessaire pour reprendre l'activité après une blessure (Arderm et al., 2013). Les réponses psychologiques d'un sportif avant une opération sont associées à la durée nécessaire de réhabilitation complète (Arderm et al., 2013). Ainsi les facteurs psychologiques sont importants pour bien récupérer, bien cicatriser et la confiance en soi est un paramètre prédictif d'une récupération objective et subjective de la fonction neuromusculaire (Arderm et al., 2013). Des facteurs comme les émotions (colère, optimisme, impuissance), le locus de contrôle et l'humeur peuvent influencer la confiance en soi et par conséquent la capacité à récupérer (Arderm et al., 2013). Dans une méta-analyse de Arderm (2015), trois facteurs ressortent comme influençant le retour au jeu après une blessure : la peur de se blesser à nouveau, le désir de reprendre le sport, l'évaluation subjective de l'évolution de la blessure. Si un joueur a moins peur de se blesser à nouveau, à un désir élevé de reprendre le sport et une évaluation positive de l'évolution de la blessure alors il pourrait retourner au jeu plus rapidement (Arderm, 2015).

En résumé, les aspects psychologiques semblent jouer un rôle important dans la récupération et pourraient influencer directement la capacité à récupérer d'un sportif. Les aspects psychologiques peuvent non seulement influencer les concentrations en hormones impliquées dans le processus de cicatrisation, mais également la vitesse de récupération.

#### 1.4.10. Interaction entre perception de l'effort et douleurs

La perception de l'effort ne peut être expliquée que par des variables physiologiques (Hampson et al., 2001). La perception de l'effort implique l'intégration de multiples signaux afférents provenant d'une variété de stimulations perceptives. C'est le traitement de ces signaux qui pourrait également influencer la régulation de la performance lors d'un exercice (Hampson et al., 2001). Certains modèles théoriques expliquant le lien entre perception de l'effort et régulation de l'exercice posent l'hypothèse que la perception de l'effort puisse être d'abord un système d'anticipation régulant son action par les feedback afférents de différentes zones du corps (Hampson et al., 2001). C'est en utilisant une commande anticipatrice en réponse à des rétroactions afférentes de différents systèmes physiologiques que le recrutement musculaire est contrôlé (Noakes et al., 2005).

Un des facteurs pouvant persister après un match est le niveau de douleurs musculaires (Ispirlidis et al., 2008). Ce signal envoyé au centres nerveux supérieurs pourrait également représenter une rétroaction afférente enjoignant le cerveau à réguler la performance afin de ne pas affecter l'homéostasie (Hampson et al., 2001 ; Noakes et al., 2005). De plus, la perception de l'effort réalisé d'un match peut influencer également les cinétiques de récupération et réguler la performance musculaire par le biais d'un mécanisme de gestion de l'effort et par anticipation du match qui suit (Hampson et al., 2001 ; Noakes et al., 2005 ; Knicker et al., 2011).

D'un point de vue pratique, bien que le niveau de douleurs musculaires soit un marqueur variable des dommages musculaires (Warren, 1999 ; Nosaka et al., 2002), le fait d'appliquer des stratégies de récupération limitant ce marqueur pourrait permettre d'accélérer les cinétiques de récupération par un engagement plus important dans l'effort réalisé (Hampson et al., 2001 ; Noakes et al., 2005).



En conclusion de cette deuxième partie, la récupération peut être influencée par des facteurs biologiques, physiques et psychologiques. Pris isolément, chaque facteur semble avoir une influence différente sur les cinétiques de récupération. Pour certains facteurs, il semble que ce soit leur complémentarité qui aurait un effet sur la récupération. Par exemple, l'activité réalisée en match est dépendante du poste auquel le joueur évolue mais également à son âge. Le niveau de force initiale semble être un paramètre pouvant influencer isolément la récupération après un exercice inducteur de dommages musculaires. Par un effet de répétition, l'entraînement constitue une protection contre une baisse de force trop importante post-exercice et une récupération plus rapide. L'âge et l'expérience du joueur peuvent également être pris en compte pour expliquer la variabilité des cinétiques de récupération. Bien que l'âge ne semble pas être un marqueur très influent sur les cinétiques de récupération, l'expérience du joueur à un niveau de jeu donné et pour une charge d'entraînement donnée semble influencer positivement la récupération. Le contexte du match, par sa localisation et le niveau de l'adversaire, entraîne une variabilité des réponses à l'exercice et par conséquent peut entraîner une variabilité de la récupération. Cet aspect est lié à un contexte psychologique qui influence les cinétiques de récupération, mais également aux déplacements engendrés par certains matches.

### 1.5. Stratégies de récupération

Dans l'enquête réalisée par Nédélec et al. (2013a), les clubs ont déclaré utiliser différentes stratégies de récupération comme le bain froid, les massages, la récupération active, les étirements, l'électrostimulation. Parmi toutes ces stratégies, le niveau d'évidence scientifique est élevé pour l'utilisation du froid en tant que technique de récupération. L'utilisation d'une stratégie augmentant les concentrations des hormones impliquées dans le processus de régénération musculaire semble également être un axe de travail intéressant à aborder. Les effets des stratégies de récupération peuvent ne pas être plus élevés que les effets d'un placebo (Broatch et al., 2014). Dans ce cas, il semble utile de comprendre l'effet placebo et le rôle qu'il pourrait avoir sur les cinétiques de récupération.

#### 1.5.1. Le froid

##### 1.5.1.1. Immersion en bain froid

L'immersion en bain froid est une stratégie de récupération utilisée par de nombreux sportifs. Une enquête menée auprès des staffs des clubs de Ligue 1 française montre que 88% des équipes interrogées utilisent le bain froid comme stratégie de récupération (Nédélec et al., 2013a). Le principe est d'immerger une partie ou la totalité du corps (excepté la tête) dans une eau dont la température est inférieure à 15°C pour une durée de 10 à 12 minutes (Versey et al., 2013). L'efficacité du bain froid sur l'accélération de la récupération a été montrée sur différents paramètres de la performance et sur les marqueurs des dommages musculaires (Leeder et al., 2012 ; Bleakley et al., 2012 ; Poppendieck et al., 2013). Le bain froid est efficace pour accélérer les cinétiques de récupération de la force et de la puissance musculaire (Leeder et al., 2012 ; Poppendieck et al., 2013). Les douleurs musculaires et la perception de la fatigue sont diminuées suite à une immersion en bain froid en comparaison avec une récupération passive. Cependant, les résultats des différentes méta-analyses montrent que l'influence du bain froid sur les concentrations en créatine kinase n'est pas clairement établie (Leeder et al., 2012 ; Bleakley et al., 2012).

Concernant les mécanismes expliquant l'effet bénéfique du bain froid, ceux-ci restent encore débattus. Certains auteurs posent l'hypothèse d'une action du froid sur l'inflammation qui ralentirait la baisse de force consécutive à un exercice inducteur de dommages musculaires (Wilcock et al., 2006 ; Banfi et al., 2010). Cette hypothèse n'est pas validée du fait de la divergence de résultats entre les études qui se sont intéressées aux effets d'un bain froid sur les marqueurs de l'inflammation. White et al. (2014) ont comparé les effets de différentes modalités d'immersion en bain froid sur des marqueurs sanguins de l'inflammation et sur des

paramètres de la performance suite à un exercice inducteur de dommages musculaires. Leurs résultats montrent un effet bénéfique sur la récupération de la performance en force mais pas sur les concentrations sanguines en interleukines (IL). L'action de la pression hydrostatique de l'eau pourrait également jouer un rôle dans l'accélération de la récupération (Wilcock et al., 2006). Vaile et al. (2008) ont analysé l'effet d'immersions dans des eaux à différentes températures. L'immersion en eau chaude peut avoir un effet bénéfique sur la récupération. Cependant l'immersion en bain froid est plus efficace que l'immersion en bain chaud pour accélérer la récupération après un exercice (Vaile et al., 2008). Ainsi, il semblerait que la combinaison du froid et de la pression hydrostatique permet au bain froid d'être efficace pour accélérer la récupération.

Bien que l'immersion en bain froid soit largement utilisée et présente certains avantages pour la récupération, elle présente néanmoins quelques limites. Utilisée de manière chronique, cette stratégie de récupération peut limiter les adaptations musculaires lors d'un programme de renforcement musculaire (Yamane et al., 2006 ; Fröhlich et al., 2014 ; Yamane et al., 2015). Yamane et al. (2006) ont analysé les effets d'une immersion en bain froid chronique lors d'un programme d'entraînement des muscles de l'avant bras. Les sujets ont participé à un programme constitué de 3 séances par semaine pendant 4 semaines. Deux séries de 8 répétitions à 70% du maximum ont été réalisées. Immédiatement après l'entraînement, le bras était plongé dans une eau à 10°C pendant 20 minutes. Le deuxième bras a été utilisé comme bras contrôle. Les résultats ont montré une meilleure progression de l'endurance de force dans le groupe contrôle (96±81%) que dans le groupe expérimental (53±40%). Cette limitation est liée à un ralentissement et/ou une suppression de l'activité des cellules satellites et des kinases des voies de signalisation de mTOR lors des périodes de récupération (Roberts et al., 2015). Le tableau 8 présente les effets d'une immersion en bain froid sur la récupération de certains marqueurs des dommages musculaires. Il apparaît que le bain froid est efficace pour accélérer la récupération de la force et de la détente. Le bain froid est aussi efficace pour diminuer les douleurs musculaires après un exercice.

**Tableau 8** : Effets du bain froid sur la performance et sur les marqueurs de dommages musculaires

Etudes	Sujets	Exercice	Récupération	Effets du bain froid
Ascensão et al. (2011)	20 ♂ Haut niveau	Match de football	10 min à 10°C ou 10 min à 35°C	↑EXT ISO, ↓douleurs, ↓CK, ↓Mb, ↓CRP
Bailey et al. (2007)	10 ♂ entraînés	Simulation de match	10 min à 10°C ou récupération passive	↑FL ISO, ↓douleurs, ↓Mb
Delextrat et al. (2013)	8 ♂ + 8 ♀ entraînés	Match de basket- ball	5 x 2 min à 11°C ou massage ou passive	↑CMJ, ↓douleurs, ↓perception de la fatigue
Howatson et al. (2009)	16 ♂ entraînés	100 DJ 60 cm	12' à 15°C ou passive	Pas de différence significative pour EXT ISO, CK, douleurs
Ingram et al. (2009)	11 ♂ entraînés	Simulation de sport collectif	2 x 5 min à 10°C ou 3 x 2' à 10°C et 40°C en alterné ou passive	↑EXT ISO, ↑FL ISO, ↑RSA, ↓douleurs
King et Duffield (2009)	14 Fe entraînés	Exercice de répétition de sprints	15 min à 9°C ou active ou alterné 9°C et 39°C ou passive	↑CMJ, ↓douleurs
Pointon et Duffield (2012)	10 ♂ entraînés	Simulation match de rugby	20 min à 9°C ou passive	↑EXT ISO, VA, ↓douleurs
Pournot et al. (2011)	41 ♂ haut niveau	Exercice inducteur de dommages musculaires	15 min à 10°C ou alterné 10°C et 42°C ou passive	Pas de différence entre les groupes : EXT ISO, CMJ. ↓CK
Rupp et al. (2012)	13 ♂ + 9 Fe Haut niveau	Test Yo-Yo	15 min à 12°C ou passive	Pas de différence entre les groupes : CMJ, perception de la fatigue
Takeda et al. (2014)	20 ♂ entraînés	Simulation match de rugby	10 min à 15°C ou passive	Pas de différence entre les groupes : CMJ, vitesse. ↓Perception de la fatigue
Vaile et al. (2008)	38 ♂ entraînés	Exercice inducteur de dommages musculaires	Passive et 14 min à 15°C ou 14 min à 38°C ou 14 min alterné 15°C et 38°C	↑EXT ISO, ↑SJ, ↓CK
White et al. (2014)	8 ♂ entraînés	12 sprints de 120m	10' à 10°C ou 30' à 10°C ou 10' à 20°C ou 30' à 20°C ou passive	↑DJ, ↓IL-8. Pas de différence entre les groupes : SJ, IL- 6

♂ = homme. ♀ = femme. ISO = force isométrique. CONC = force concentrique. EXC = force excentrique. EXT = muscles extenseurs du genou. FL = muscles fléchisseurs du genou. CMJ = détente lors d'un saut en contremouvement. DJ = drop jump, saut en contrebas. SJ = squat jump, saut avec départ en position squat. RSA = performance lors d'un test de répétition de sprints. CK = créatine kinase. Mb = myoglobine. CRP = protéine C-réactive. IL- = interleukine.

#### 1.5.1.2. La cryothérapie corps entier

Le principe de la cryothérapie corps entier est d'exposer le corps à un air froid dont la température est comprise entre  $-110^{\circ}\text{C}$  et  $-195^{\circ}\text{C}$  pour une durée de 3 à 4 minutes (Banfi et al., 2010). L'exposition peut se faire dans une chambre de cryothérapie dans laquelle l'air est maintenu à la température désirée (Hauswirth et al., 2011) ou dans une cabine de cryothérapie dans laquelle de l'azote liquide permet d'atteindre la température souhaitée (Ferreira-Junior et al., 2015). Les effets de la cryothérapie corps entier sur la récupération de la performance ne sont pas clairement définis dans la littérature scientifique. Les résultats de certaines études montrent un effet bénéfique de la cryothérapie corps entier sur la récupération de la force musculaire après un exercice inducteur de dommages musculaires en comparaison avec une récupération passive (Hauswirth et al., 2011 ; Ferreira-Junior et al., 2015). D'autres études en revanche ne trouvent pas de différence entre une récupération passive et la cryothérapie corps entier sur la capacité à accélérer la récupération de la force et de la performance en saut (Fonda and Sarabon, 2013).

La cryothérapie corps entier peut influencer certains marqueurs des dommages musculaires et de l'inflammation (Banfi et al., 2010). L'exposition à cette stratégie de récupération induit une augmentation des cytokines anti-inflammatoires IL-10 et une diminution des enzymes pro-inflammatoires IL-2 (Banfi et al., 2010). Concernant les marqueurs des dommages musculaires, l'augmentation des concentrations en créatine kinase post-exercice est limitée suite à une exposition à de la cryothérapie corps entier (Banfi et al., 2010). Pour les douleurs musculaires, une méta-analyse de Costello et al., (2015) indique que le niveau d'évidence scientifique est actuellement trop faible pour conclure à un effet bénéfique de la cryothérapie corps entier sur la réduction des douleurs musculaires. Le tableau 9 présente les effets d'une exposition à de la cryothérapie corps entier sur les marqueurs des dommages musculaires. Les données montrent un effet possible de la cryothérapie sur la récupération de la force musculaire, mais cet effet n'est pas retrouvé dans toutes les études. La cryothérapie corps entier ne semble pas améliorer la récupération de la performance en saut après un exercice.

**Tableau 9 :** Effets de la cryothérapie corps entier sur la performance et sur les marqueurs de dommages musculaires

Etudes	Sujets	Exercice	Récupération	Effets de la cryothérapie corps entier
Costello et al. (2012a)	14 ♂ + 8 ♀ entraînés	100 contractions excentriques à 90°.s <sup>-1</sup>	3 min à -110°C ou passive	Pas de différence entre les groupes : EXT ISO, douleurs, puissance sur vélo
Ferreira-Junior et al. (2015)	26 ♂ entraînés	100 DJ 60 cm	3 min à -110°C ou passive	↑EXT ISO
Fonda et Sarabon (2013)	11 ♂ entraînés	Exercice inducteur de dommages musculaires	3' à -140 et -195°C ou passive	Pas de différence entre les groupes : FL ISO, CMJ, SJ, CK
Hauswirth et al. (2011)	9 ♂ haut niveau	Simulation de trail	3' à -110°C ou lumière infra-rouge ou passive	↑EXT ISO, ↓douleurs
Vieira et al. (2015)	12 ♂ entraînés	60 contractions concentriques et excentriques à 60°.s <sup>-1</sup> et 180°.s <sup>-1</sup>	3 min à -110°C ou passive	Pas de différence entre les groupes : CMJ

♂ = homme. ♀ = femme. ISO = force isométrique. CONC = force concentrique. EXC = force excentrique. EXT = muscles extenseurs du genou. FL = muscles fléchisseurs du genou. CMJ = détente lors d'un saut en contremouvement. DJ = drop jump, saut en contrebas. SJ = squat jump, saut avec départ en position squat. RSA = performance lors d'un test de répétition de sprints. CK = créatine kinase. Mb = myoglobine. CRP = protéine C-réactive. IL- = interleukine.

### 1.5.2. Entraînement en force

Les sécrétions de certaines hormones comme la testostérone, l'hormone de croissance et l'IGF-1 sont impliquées dans le processus de régénération musculaire (Urban et al. 1995 ; Brodsky et al., 1996 ; Chakravarthy et al., 2000 ; Sinha-Hikim et al., 2013). De plus les résultats de certaines études ont montré qu'une injection de testostérone chronique ou aigüe permet d'augmenter la synthèse protéique (Urban et al. 1995 ; Brodsky et al., 1996).

Certaines séances de musculation permettent d'augmenter les concentrations sanguines hormonales (Kraemer et al., 1990 ; Simão et al., 2012). Ainsi Kraemer et al. (1990) ont observé un pic de testostérone, d'hormone de croissance et d'IGF-1 dans les 30 minutes suivant une séance de musculation à charge lourde contenant des exercices des membres supérieurs et des membres inférieurs. Ces résultats concordent avec ceux de McCaulley et al. (2009) qui ont observé une augmentation des concentrations en testostérone de 32,3% (p<0,05) immédiatement après un exercice en hypertrophie. Simão et al. (2012) ont comparé l'influence de l'ordre des exercices lors d'une séance de musculation des membres supérieurs sur les concentrations hormonales. Leurs résultats indiquent que les concentrations hormonales les plus élevées sont retrouvées lorsque les plus gros groupes musculaires sont

sollicités en premier. Dans cette étude, les résultats ont montré une augmentation significative ( $p < 0,05$ ) des concentrations en hormone de croissance immédiatement après exercice.

En résumé, certaines hormones sont impliquées dans le processus de cicatrisation musculaire et certaines séances de musculation permettent une augmentation des concentrations hormonales. Il peut donc être émis comme hypothèse que la réalisation de ces séances permettrait d'accélérer la cicatrisation musculaire et, par conséquent, les cinétiques de récupération.

### 1.5.3. Effet placebo

La perception que se fait une personne des effets d'un traitement peut influencer l'efficacité de ce même traitement (Koshi et al., 2007 ; Miller et al., 2009). Ainsi, l'administration d'une substance présumée inerte et/ou sans principe actif peut se révéler efficace pour diminuer les douleurs ou accélérer la cicatrisation (De Craen et al., 1999 ; Koshi et al., 2007 ; Miller et al., 2009). Cet effet, connu sous le terme d'effet placebo, s'exprime dans un contexte psychosocial bien particulier intégrant la relation entre le praticien et la personne, les caractéristiques physiques du traitement, la présentation faite du traitement et de ses effets (Koshi et al., 2007 ; Howland, 2008). Il existe des différences entre les différents types de placebo fournis (injection, comprimé, une action, une pratique) (De Craen et al., 2000 ; Benedetti et Dogue, 2015). Par exemple, l'injection sous-cutanée d'un placebo est plus efficace que la consommation orale pour dans le traitement de la migraine (De Craen et al., 2000). Bien que les mécanismes de l'effet placebo ne soient pas encore connus, certaines théories ont posé des hypothèses quant à l'explication de ce phénomène. Le modèle des « attentes » explique que les croyances et les idées reçues peuvent avoir une influence forte sur l'état de santé et sur les réactions neurochimiques dans le corps ce qui peut entraîner une réponse hormonale et immune (Koshi et al., 2007 ; Benedetti et al., 2011 ; Pozgain et al., 2014). Le modèle du conditionnement explique que l'effet placebo est une réponse apprise par un traitement précédent ayant eu des effets bénéfiques, cela agissant comme un stimulus conditionné sur les traitements suivants (Koshi et al., 2007 ; Benedetti et al., 2011 ; Pozgain et al., 2014). Pour le modèle des opioïdes, les endorphines sont sécrétées comme une réponse induite par le stimulus que constitue le placebo (Koshi et al., 2007 ; Benedetti et al., 2011 ; Pozgain et al., 2014). En réalité ces trois modèles semblent plus interagir qu'être en opposition (Pozgain et al., 2014).

Broatch et al. (2014) ont comparé les effets d'un bain froid et d'un placebo, composé d'un bain à température neutre couplé à une huile, sur la récupération suite à un exercice. Le niveau de force maximale volontaire au cours des 48h post-exercice n'était pas significativement différent entre les conditions. Dans une revue de littérature, Beedie and Foad (2009) mettent en avant le fait que la majorité des études s'intéressant à l'effet placebo sur la performance obtiennent une amélioration de 1% à 5% en comparaison avec une condition contrôle.

Les effets de la consommation d'un placebo ont d'abord été montrés chez des patients pour qui le placebo avait un effet analgésique (De Craen et al. 1999). La réalisation d'un exercice inducteur de dommages musculaires peut entraîner des douleurs qui pourraient être limitées par la consommation d'un placebo. La cicatrisation musculaire peut également être accélérée par la consommation d'un placebo (Miller et al., 2009). Etant donné l'immédiateté du processus de cicatrisation des fibres musculaires après un exercice, l'implémentation d'un placebo pourrait aider à accélérer cette cicatrisation et par conséquent la récupération (Smith et al., 2008 ; Miller et al., 2009).

L'effet placebo peut jouer un rôle dans la récupération de la performance après un exercice (Rattray et al., 2015). A notre connaissance, aucune étude n'a cependant évalué les effets d'un placebo sur la récupération en comparaison avec une récupération passive, suite à un exercice inducteur de dommages musculaires.

En résumé, les stratégies de récupération présentent un intérêt pour les joueurs. Cependant certaines questions subsistent quant à l'utilisation de ces stratégies de récupération. **Le bain froid et la cryothérapie sont deux stratégies utilisant le froid pour accélérer la récupération, mais ont-elles les mêmes effets sur la récupération de performance ?** Il est intéressant de comparer les deux stratégies pour savoir laquelle est la plus efficace pour récupérer.

Afin d'accélérer la récupération de la performance musculaire, l'entraînement en force peut également représenter une technique intéressante notamment le lendemain d'un match. La mise en place de certaines séances de musculation induisant une augmentation des concentrations hormonales pourrait accélérer la récupération de la performance. **La réalisation d'une séance de musculation du haut du corps le lendemain d'un exercice du bas du corps influence-t-elle les cinétiques de récupération ?**



L'effet placebo peut influencer la cicatrisation et, par conséquent, la récupération. Etudier l'effet placebo sur la récupération semble être une piste de travail permettant de comprendre, en partie, les mécanismes de la récupération. Autrement dit, il s'agira de répondre à la question suivante : **l'effet placebo influence-t-il les cinétiques de récupération après un exercice inducteur de dommages musculaires ?**

Pour répondre à ces questions, un modèle expérimental comprenant un modèle d'exercice inducteur de dommages musculaires et un modèle d'analyse de la récupération, a été élaboré afin de :

- 1) comparer les effets du bain froid (10 minutes à 10°C) et de la cryothérapie corps entier (3 minutes à -110°C) sur la récupération ;
- 2) évaluer les effets d'une séance de musculation du haut du corps réalisée le lendemain d'un exercice des membres inférieurs sur leur récupération;
- 3) étudier les effets de la consommation d'un placebo en comparaison avec une condition contrôle sur les cinétiques de récupération.

## **2. Contribution personnelle**

## 2.1. Matériel et Méthodes

### 2.1.1. Participants

Etude 1 : 10 sujets masculins sportifs (23,4±4 ans, 178±9 cm, 73,4±12 kg) ont participé à cette étude.

Etude 2 : 12 sujets masculins sportifs (29,2±5,5 ans, 177,7±7 cm, 76±5 kg) ont participé à cette étude.

Etude 3 : 13 footballeurs (25,3±5,6 ans; 177,0±5,5 cm; 74,1±8,9 kg) ont participé à cette étude.

*Critères d'inclusion.* Les sujets pratiquaient au moins trois heures de sport par semaine et n'avaient pas contracté de blessure aux ischio-jambiers lors des six derniers mois précédant l'expérimentation. Il était demandé aux sujets de ne réaliser aucune activité physique au moins 48h avant la réalisation du premier test (valeurs de référence). Les sujets avaient pour instruction de ne pas réaliser d'activité physique, de ne pas consommer de protéines, d'alcool, de caféine, ni d'utiliser une stratégie de récupération dans les 24h qui précédaient l'exercice inducteur de dommages musculaires et pendant les 3 jours qui suivaient l'exercice (une liste de ce que constituait une stratégie de récupération était fournie, elle est disponible dans les documents annexes). Des recommandations nutritionnelles étaient fournies aux sujets. Chaque sujet devait consommer 6-8 g.kg<sup>-1</sup> de glucides par jour et était autorisé de boire *ad-libitum*. Le niveau de douleurs musculaires et le niveau de fatigue le premier jour du protocole devaient être strictement inférieurs à 5 (moyennement douloureux/fatigué) sur une échelle graduée de 0 à 10 (0 = pas douloureux ; 10 = très très douloureux) (0 = pas fatigué et 10 = très très fatigué). Avant chaque venue au laboratoire, le sujet devait répondre à un questionnaire afin de vérifier si les critères d'inclusion étaient respectés. Tous les sujets ont fourni un consentement éclairé écrit avant de participer à cette étude.

### 2.1.2. Description des protocoles

#### 2.1.2.1. Modèle expérimental pour l'exercice inducteur de dommages musculaires

Afin de répondre aux questions de recherche que nous nous sommes posés au cours de cette thèse, nous avons élaboré un modèle expérimental que nous avons utilisé dans toutes les études. Ce modèle consistait à réaliser un exercice inducteur de dommages musculaires sur les ischio-jambiers et d'un suivi régulier de la performance dans les jours qui suivaient cet exercice.

### *But des études.*

Etude 1 : le but de cette étude était de comparer les effets d'une immersion en bain froid avec ceux de d'une exposition à la cryothérapie corps entier sur les cinétiques de récupération suite à un exercice inducteur de dommages musculaires.

Etude 2 : le but de cette étude était d'évaluer les effets d'une séance de musculation du haut du corps réalisée le jour suivant un exercice inducteur de dommages musculaires sur les cinétiques de récupération.

Etude 3 : le but de cette étude était d'analyser les effets d'un placebo sur les cinétiques de récupération suite à un exercice inducteur de dommages musculaires.

*Exercice inducteur de dommages musculaires.* Sur un dynamomètre isocinétique (Con-Trex, CMV AG, Dübendorf, Switzerland), les sujets ont réalisé un exercice sur les ischio-jambiers de la jambe testée. L'exercice était constitué de 5 séries de 15 contractions excentriques à une vitesse de  $60^{\circ}.s^{-1}$  entrecoupées de 3 minutes de récupération passive (Image 1). Les sujets étaient assis confortablement sur le siège du dynamomètre avec un angle de hanche fixé à  $75^{\circ}$ . L'extension complète de la jambe était considérée comme étant  $0^{\circ}$  pour les tests dynamiques (amplitude de mouvement :  $0-90^{\circ}$ ). L'adaptateur distal du dynamomètre était attaché 3 à 4 cm au-dessus de la malléole latérale par une sangle. Pendant les contractions de la cuisse, et afin de minimiser les mouvements du corps, des sangles maintenaient la poitrine, le bassin et la cuisse. L'alignement entre l'axe de rotation du dynamomètre et l'axe de rotation du genou (condyle fémoral latéral) était vérifié au début de chaque session. L'effet de la gravité était enregistré lors de la définition de l'amplitude du mouvement et était utilisé pour corriger les mesures de couple de force lors des tests. Approximativement 30 minutes après l'exercice, les sujets devaient noter l'intensité globale en utilisant l'échelle de perception de l'effort modifiée de 0 (repos) à 10 (effort maximal) (Foster et al., 2001).

**Image 1 :** Exercice inducteur de dommages musculaires réalisé sur appareil isocinétique



#### 2.1.2.2. Procédures

*Affectation des sujets.* Les sujets étaient affectés à un groupe dans ordre aléatoire, équilibré et transversal aux deux conditions :

- bain froid et cryothérapie corps entier (étude 1)
- récupération passive et musculation (étude 2)
- récupération passive et placebo (étude 3)

Les passages dans chaque condition étaient séparés par une période de deux semaines. La jambe dominante et non dominante étaient affectées à une condition dans un ordre aléatoire et équilibré. L'ordre de passage dans une condition était également randomisé et équilibré et 4 combinaisons à affecter étaient possibles :

- jambe non dominante + condition 1,
- jambe dominante + condition 2,
- jambe non dominante + condition 2,
- jambe dominante + condition 1.

Afin d'éviter l'effet des adaptations croisées sur les valeurs (Starbuck et Eston, 2012), la moitié du groupe a commencé dans la condition 1 et l'autre moitié dans la condition 2.

*Echauffement.* L'échauffement était constitué de :

- 2 séries de 10 contractions concentriques avec une minute de récupération entre les séries sur un dynamomètre isocinétique (Con-Trex MJ, CMV AG, Dübendorf, Switzerland). Les sujets ont réalisé des flexions du genou à une vitesse de  $60^{\circ}.s^{-1}$  et à une intensité de  $60 N.m^{-1}$  (étude 1).
- 3 séries de 10 répétitions sur un appareil à ischio-jambiers (allongé). L'intensité était augmentée progressivement en suivant l'échelle de perception de l'effort de Borg (1970). Les sujets réalisaient l'échauffement à une intensité perçue de 11 (léger) pour la première série, 13 (ni léger ni dur) pour la deuxième série et 15 (dur) pour la troisième série (étude 2).

- une première partie consistant en 6 minutes de vélo à une perception de l'effort de 11 (léger) pendant 2 minutes, 13 (ni léger ni dur) pendant 2 minutes et 15 (dur) pendant 2 minutes sur l'échelle de perception de l'effort de Borg (Borg, 1970). La deuxième partie de l'échauffement était constitué de 2 séries de 10 répétitions de contractions concentriques des fléchisseurs du genou à  $60^{\circ} \cdot s^{-1}$  à  $60 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$  sur un appareil isocinétique (Con-Trex MJ, CMV AG, Dübendorf, Switzerland) (étude 3).

*Familiarisation.* Les sujets ont été familiarisés avec la batterie de tests avant le protocole expérimental. Les valeurs de référence étaient mesurées avant les deux séances (expérimentale et contrôle). Avant de participer aux tests de reproductibilité, les sujets étaient familiarisés au cours de deux séances au cours desquelles ils réalisaient 5 répétitions des tests à une faible intensité et deux répétitions à une intensité maximale. Ensuite, deux séances de tests étaient réalisées pour déterminer le niveau de reproductibilité. Avant de commencer la deuxième semaine d'expérimentation (deuxième jambe) les valeurs de force de référence étaient testées à nouveau afin d'éviter l'effet des adaptations croisées sur les valeurs (Starbuck et Eston, 2012). Au cours de chaque exercice les sujets étaient verbalement encouragés.

*Tests de force.* Les sujets étaient testés à différentes vitesses et pour différents régimes de contractions sur un dynamomètre isocinétique (Con-Trex, CMV AG, Dübendorf, Switzerland) :

- étude 2 : force concentrique ( $60^{\circ} \cdot s^{-1}$  et  $120^{\circ} \cdot s^{-1}$ ), force excentrique ( $120^{\circ} \cdot s^{-1}$ ), force isométrique (5 secondes à  $60^{\circ}$ ) des fléchisseurs du genou;
- étude 1 et 3 : force excentrique ( $60^{\circ} \cdot s^{-1}$ ) et force isométrique (5 secondes à  $60^{\circ}$ ) des fléchisseurs du genou.

*Saut en contremouvement sur une jambe.* Les sujets ont réalisé un saut en contremouvement sur une jambe (CMJ-1J) sur une plateforme de force (Kistler Instruments, Hampshire, UK). Il leur était demandé de maintenir la jambe testée en contact avec la plateforme et avec les mains sur les hanches. Les sujets devaient ensuite fléchir le genou à une profondeur choisie, de sauter le plus haut possible et d'atterrir sur la même jambe.

*Saut en contremouvement sur deux jambes.* (Etudes 1 et 3) Les sujets ont réalisé un saut en contremouvement sur deux jambes (CMJ-2J) sur une plateforme de force (Kistler Instruments, Hampshire, UK). Il leur était demandé de se maintenir debout sur la plateforme

et avec les mains sur les hanches. Les sujets devaient ensuite fléchir les genoux à une profondeur choisie, de sauter le plus haut possible et d'atterrir sur les deux jambes.

*Créatine kinase.* Un échantillon de 32 µl de sang était prélevé par une ponction capillaire du bout des doigts afin de mesurer les concentrations sanguines en créatine kinase [CK]. Le sang prélevé était ensuite placé sur une bandelette et les analyses étaient réalisées par un Reflotron (Roche Diagnostics, Grenzacherstrasse, Switzerland). Le Reflotron était calibré conformément aux recommandations du fabricant. Une étude de Horder et al. (1991) montre un coefficient de variation de 4,2% pour les mesures de créatine kinase en utilisant le Reflotron. Dans la même étude, la comparaison entre le Reflotron et d'autres appareils de mesure de créatine kinase montre une corrélation  $\geq 0.994$ .

*Douleurs musculaires.* Il était demandé aux sujets d'évaluer le niveau de douleur des ischio-jambiers en utilisant une échelle de Likert graduée de 0 (pas du tout douloureux) à 10 (très très douloureux) (Thompson et al., 1999).

*Perception de la récupération.* (Etudes 1 et 3) Il était demandé aux sujets d'évaluer de manière subjective la récupération des ischio-jambiers en utilisant une échelle de graduée de 0 (très bien récupéré) à 10 (très mal récupéré) (Laurent et al., 2011).

*Puissance sur une jambe.* (Etude 2) Afin d'évaluer la puissance sur une jambe, la jambe libre était fixée sur le côté d'un tapis roulant non-motorisé (Woodway Force 3.0, Waukesha, USA) alors que la jambe testée était mise en mouvement sur la partie mobile avec les mains fixées à l'avant. L'instruction donnée était de pousser avec la jambe de l'avant vers l'arrière avec le plus haut niveau de force et le plus vite possible pendant 6 secondes.

*Circonférence de la cuisse.* (Etude 2) La circonférence de la cuisse a été mesurée en 3 points : 1/3, 1/2 et 2/3 de la longueur de la cuisse évaluée. Les mesures étaient réalisées entre le grand trochanter et le condyle fémoral externe. La peau était marquée avec un feutre semi-permanent. Vaile et al. (2008) montrent un bon niveau de reproductibilité pour ces variables avec un coefficient de corrélation intra-classe (ICC) = 1 et un coefficient de variation (CV) = 0,1%.

*Stratégies de récupération.* Dans les trois études les stratégies de récupération étaient placées après l'exercice inducteur de dommages musculaires comme suit :

- étude 1 : 5 minutes après le dernier test, ce qui correspond au point 0h après exercice, les sujets étaient exposés à une stratégie de récupération. Pendant le bain froid, en position debout, les sujets étaient vêtus d'un maillot de bain et étaient immergés jusqu'au cou dans un bain d'eau froide (Image 2) pendant 10 minutes à 10°C (Versey et al., 2013). Pendant la cryothérapie corps entier (Image 3), les sujets étaient dans une cryocabine (Cryo Sana, Mecacel, France) produisant de l'air froid à partir d'azote liquide à une température de -110°C pendant 3 minutes (Ferreira-Junior et al., 2015). La peau était directement exposée au froid excepté la tête (qui dépassait de la cabine par le haut) et les mains ainsi que les pieds qui étaient protégés par des gants, des chaussettes et des sabots.



**Image 2** : Immersion en bain froid (étude 1)



**Image 3** : cryothérapie corps entier (étude 1).

- étude 2 : la mise en place des stratégies de récupération avait lieu le lendemain de l'exercice (entre 8h30 et 10h00). La séance de musculation était composée de 5 exercices du haut du corps réalisés dans l'ordre suivant : développé couché (Image 4), tirage poitrine, tirage horizontal, biceps et triceps. Pour chaque exercice les sujets réalisaient 3 séries à 70% de 1RM jusqu'à épuisement entrecoupées d'une minute de récupération. Pendant la récupération passive les sujets restaient assis 15 minutes dans une pièce. La durée de la récupération passive a été définie avant la mise en place du protocole. Etant donné que la séance de musculation durait 15 minutes, la durée de la récupération passive était également de 15 minutes.





**Image 4** : Exemple d'exercice de musculation utilisé lors de l'étude 2 (développé couché).

- étude 3 : avant le protocole, des pilules étaient présentées aux sujets comme étant un nouveau supplément alimentaire combinant des propriétés anti-inflammatoires et antioxydantes. Etant donné qu'un médicament de couleur bleue est généralement perçu comme ayant un effet calmant (De Craen et al., 1996; Stegeman, 2005), une pilule bleue (Image 5) était présentée aux participants comme favorisant le sommeil et limitant le catabolisme musculaire et ayant pour composition 33,3% de composés antioxydants et anti-inflammatoires (cerise, rhus, curcuma, et de la canneberge), 33,3% de tryptophane extrait de produits naturels (cerises, tomates, fraises et baies) et 33,3% de mélatonine extraite de produits naturels (bananes, amandes et graines de courges). Un médicament rouge étant généralement perçu comme ayant un effet stimulant (De Craen et al., 1996; Stegeman, 2005), une pilule rouge (Image 5) était présentée comme un stimulant de la régénération musculaire et contenant 100% de composés antioxydants et anti-inflammatoires (cerise, rhus, curcuma, et de la canneberge). Un spécialiste de la récupération et un médecin travaillant pour un club de football professionnel étaient présentés aux sujets. Ils ont expliqué individuellement aux sujets les bénéfices d'une supplémentation en antioxydants et anti-inflammatoires sur les cinétiques de récupération. Ils ont également expliqué que la consommation des pilules pouvait présenter des effets secondaires comme des maux d'estomac, des diarrhées passagères et des nausées. Un document écrit avec toutes les explications était également fourni aux participants. Les pilules étaient consommées au laboratoire, devant l'expérimentateur à raison d'une pilule par prise. Les pilules bleues étaient consommées le premier jour de l'expérience 15 minutes avant et 5 minutes après la réalisation de l'exercice inducteur de dommages musculaires. La pilule rouge était consommée les jours suivant l'exercice avant les tests.



**Image 5** : Pilules utilisées comme placebo dans l'étude 3. A gauche, la pilule présentée comme favorisant le sommeil et limitant la dégradation musculaire. A droite, la pilule présentée comme stimulant la régénération musculaire.

#### 2.1.2.3. Analyses statistiques.

Les données sont présentées en tant que moyenne±écart-type (ET). Les valeurs de force, CMJ-1J, CMJ-2J et [CK] étaient normalisées à 100%. L'effet du temps et de la condition sur les variables dépendantes était analysé selon la taille de l'effet (ES, effect size) à partir des critères suivants :  $0 \leq ES \leq 0,2$  = trivial ;  $0,2 \leq ES \leq 0,6$  = petit ;  $0,6 \leq ES \leq 1,2$  = modéré ;  $1,2 \leq ES \leq 2$  = large ;  $2 \leq ES \leq 4$  = très large ;  $ES > 4$  = presque parfait (Hopkins, 2002a). L'IC était fixé à 90%. La probabilité d'avoir un effet plus important d'une condition par rapport à l'autre était évalué qualitativement de la manière suivante :  $<0,5\%$  = plus improbable,  $0,5-5\%$  = très improbable ;  $5,1-25\%$  = improbable ou probablement pas ;  $25,1-75\%$  = possible ;  $75,1-95\%$  = probable ;  $95,1-99,5\%$  = très probable ;  $>99,5\%$  = certainement probable ou presque certain. Si la probabilité d'avoir un résultat en faveur des deux conditions était  $>5\%$  la différence vraie était considérée comme incertaine (Batterham et Hopkins, 2006). Pour évaluer le niveau de reproductibilité des tests et du modèle expérimental, le coefficient de variation (CV), le coefficient de corrélation intra-classe (ICC), les IC et l'erreur type (TE) étaient calculés (Hopkins, 2002b). Dans l'étude 3, le plus petit effet détectable (SWC) a été calculé selon la formule  $SWC = 0,2 \times \text{écart-type inter-sujets des valeurs de référence}$  (Page, 2014).

Dans l'étude 2, la normalité de la courbe était vérifiée avec le test de Shapiro-Wilk. L'effet du temps et de la condition sur les variables dépendantes (force, créatine kinase, douleurs, CMJ-1J, puissance et circonférence de la cuisse) était analysé en utilisant une analyse de variance

(ANOVA) à deux voies à mesures répétées. Si la valeur F était significative un test de Bonferroni *post hoc* était appliqué. Le seuil de significativité était fixé à  $p < 0,05$ .

Dans l'étude 3, une transformation logarithmique a été réalisée sur les données des concentrations en créatine kinase.

## 2.2. Résultats

L'analyse des résultats est consacrée à la reproductibilité des différents paramètres utilisés dans les trois études de cette thèse. Les résultats intègrent également l'effet du temps sur les marqueurs des dommages musculaires suite à l'exercice inducteur de dommages musculaires. La variabilité de la fatigue induite par l'exercice inducteur de dommages musculaires a été traitée dans cette partie ainsi que l'effet des différentes conditions appliquées au modèle expérimental.

### 2.2.1. Reproductibilité

Le niveau de reproductibilité pour les différents paramètres a été calculé et les résultats sont présentés dans le tableau 10, 11 et 12 pour respectivement les études 1, 2 et 3. Le niveau de reproductibilité était élevé pour la force isométrique, le CMJ-1J, le CMJ-2J et la puissance sur une jambe sur tapis roulant non motorisé avec un coefficient de corrélation intraclass supérieur à 0,90 (Vincent, 1999) et un coefficient de variation inférieur à 10% (Atkinson et Nevill, 1998).

**Tableau 10** : Niveau de reproductibilité des tests réalisés (étude 1)

	Essai 1	Essai 2	Effect Size (IC <sub>90%</sub> )	TE (IC <sub>90%</sub> )	ICC (IC <sub>90%</sub> )	CV
Force excentrique 60°.s <sup>-1</sup> (N.m <sup>-1</sup> )	194,7±29,1	200,5±44,3	0,15 (IC <sub>90%</sub> = -0,6 à 0,9)	16,76 (IC <sub>90%</sub> = 12 à 28,7)	0,85 (IC <sub>90%</sub> = 0,6 à 1)	12%
Force isométrique 60° (N)	144,2±26	144,8±28	0,02 (IC <sub>90%</sub> = -0,8 à 0,8)	4,05 (IC <sub>90%</sub> = 2,7 à 7,8)	0,98 (IC <sub>90%</sub> = 0,9 à 1)	3,9%
CMJ-1J (cm)	17,5±4,2	16,8±4,6	-0,16 (IC <sub>90%</sub> = -1,04 à 0,7)	0,85 (IC <sub>90%</sub> = 0,5 à 2,5)	0,97 (IC <sub>90%</sub> = 0,8 à 0,99)	9,4%

Essai 1 et Essai 2 correspondent au premier et deuxième essai réalisés par les sujets après les séances de familiarisation pour chaque variable mesurée.

**Tableau 11 : Niveau de reproductibilité des tests réalisés (étude 2)**

	Essai 1	Essai 2	Effect Size (IC <sub>90%</sub> )	TE (IC <sub>90%</sub> )	ICC (IC <sub>90%</sub> )	CV
<b>Force concentrique 60°.s<sup>-1</sup> (N.m<sup>-1</sup>)</b>	109,9±20	113,7±17,6	0,2 (IC <sub>90%</sub> = -0,54 à 0,93)	8,4 (IC <sub>90%</sub> = 6,1 à 13,8)	0,84 (IC <sub>90%</sub> = 0,57 à 0,95)	12,5%
<b>Force concentrique 120°.s<sup>-1</sup> (N.m<sup>-1</sup>)</b>	99,1±14,6	94,6±10,6	-0,35 (IC <sub>90%</sub> = -1,08 à 0,4)	7,23 (IC <sub>90%</sub> = 5,3 à 11,9)	0,73 (IC <sub>90%</sub> = 0,34 à 0,91)	11,5%
<b>Force excentrique 120°.s<sup>-1</sup> (N.m<sup>-1</sup>)</b>	128,4±22,7	126,2±23,1	-0,10 (IC <sub>90%</sub> = -0,83 à 0,64)	9,53 (IC <sub>90%</sub> = 7 à 15,7)	0,86 (IC <sub>90%</sub> = 0,6 à 1)	11,4%
<b>Force isométrique 60° (N)</b>	118,4±26,3	127,2±26,1	0,34 (IC <sub>90%</sub> = -1,06 à 0,42)	4,95 (IC <sub>90%</sub> = 3,6 à 8,1)	0,97 (IC <sub>90%</sub> = 0,9 à 1)	6%
<b>CMJ-1J (cm)</b>	17,6±4,3	17,3±4,1	-0,07 (IC <sub>90%</sub> = -0,95 à 0,81)	0,8 (IC <sub>90%</sub> = 0,5 à 2,2)	0,98 (IC <sub>90%</sub> = 0,8 à 1)	6,3%
<b>Puissance (W)</b>	1020,6±171	1120,9±212	0,52 (IC <sub>90%</sub> = -0,34 à 1,35)	54,36 (IC <sub>90%</sub> = 37,5 à 104,1)	0,94 (IC <sub>90%</sub> = 0,7 à 1)	7,9%

Essai 1 et Essai 2 correspondent au premier et deuxième essai réalisés par les sujets après les séances de familiarisation pour chaque variable mesurée.

**Tableau 12 : Niveau de reproductibilité des tests réalisés (étude 3)**

	Essai 1	Essai 2	Effect Size (IC <sub>95%</sub> )	TE (IC <sub>95%</sub> )	ICC (IC <sub>95%</sub> )	CV
<b>Force excentrique 60°.s<sup>-1</sup> (N.m<sup>-1</sup>)</b>	193,6±47,3	193,4±57,9	0 (IC <sub>95%</sub> = -0,92 à 0,93)	19,23 (IC <sub>95%</sub> = 13 à 36,84)	0,90 (IC <sub>95%</sub> = 0,63 à 0,98)	13,6%
<b>Force isométrique 60° (N)</b>	124,1±27,6	123±28,8	-0,04 (IC <sub>95%</sub> = -0,92 à 0,84)	5,56 (IC <sub>95%</sub> = 3,82 à 10,15)	0,97 (IC <sub>95%</sub> = 0,89 à 0,99)	7,3%
<b>CMJ-1J (cm)</b>	15,7±3	15,9±3	-0,07 (IC <sub>95%</sub> = -0,73 à 0,87)	0,92 (IC <sub>95%</sub> = 0,65 à 1,56)	0,93 (IC <sub>95%</sub> = 0,76 à 0,98)	8,1%
<b>CMJ-2J (cm)</b>	32,6±6,2	33,1±5,2	0,09 (IC <sub>95%</sub> = -0,71 à 0,89)	1,94 (IC <sub>95%</sub> = 1,36 à 3,41)	0,90 (IC <sub>95%</sub> = 0,69 à 0,97)	9,4%

Essai 1 et Essai 2 correspondent au premier et deuxième essai réalisés par les sujets après les séances de familiarisation pour chaque variable mesurée.

Le plus petit effet détectable pour la force excentrique à 60°.s<sup>-1</sup> était de 4,5%. Pour la force isométrique, le plus petit effet détectable était de 3,8%. Pour CMJ-1J, le plus petit effet détectable était de 3,1%. Pour CMJ-2J, le plus petit effet détectable était de 3,7%.

### 2.2.2. Effet du temps

Les ES et IC<sub>90%</sub> pour chaque point en comparaison avec les valeurs de référence sont présentés dans les tableaux 13, 14 et 15 pour toutes les variables mesurées dans chaque condition. Un effet modéré à large du temps est observé pour la majorité des marqueurs, immédiatement après l'exercice inducteur de dommages musculaires sauf pour CMJ-1J (étude 2 et 3) et la puissance sur une jambe (étude 2).

**Tableau 13** : Effet du temps pour chaque variable en comparaison avec les valeurs de référence (étude 1)

Variable	Condition	0h	24h	48h	72h
<b>Force excentrique</b> 60°,s <sup>-1</sup>	CWI	ES = -1,38 (IC <sub>90%</sub> = -2,2 à -0,6)	ES = -1,97 (IC <sub>90%</sub> = -2,9 à -1,1)	ES = -3,64 (IC <sub>90%</sub> = -4,8 à -2,5)	ES = -2,79 (IC <sub>90%</sub> = -3,8 à -1,9)
	WBC	ES = -1,84 (IC <sub>90%</sub> = -2,7 à -1)	ES = -1,91 (IC <sub>90%</sub> = -2,8 à -1)	ES = -2,23 (IC <sub>90%</sub> = -3,2 à -1,3)	ES = -1,51 (IC <sub>90%</sub> = -2,3 à -0,7)
<b>Force isométrique</b> 60°	CWI	ES = -4,29 (IC <sub>90%</sub> = -5,6 à -3)	ES = -2,71 (IC <sub>90%</sub> = -3,71 à -1,71)	ES = -2,8 (IC <sub>90%</sub> = -3,8 à -1,8)	ES = -2,79 (IC <sub>90%</sub> = -3,8 à -1,8)
	WBC	ES = -3,57 (IC <sub>90%</sub> = -4,7 à -2,4)	ES = -2,82 (IC <sub>90%</sub> = -3,84 à -1,8)	ES = -2,58 (IC <sub>90%</sub> = -3,6 à -1,6)	ES = -2,15 (IC <sub>90%</sub> = -3,1 à -1,2)
<b>CMJ-2J</b>	CWI	ES = -1,47 (IC <sub>90%</sub> = -2,3 à -0,7)	ES = -1,72 (IC <sub>90%</sub> = -2 à -0,9)	ES = -2,14 (IC <sub>90%</sub> = -3,1 à -1,2)	ES = -1,56 (IC <sub>90%</sub> = -2,4 à -0,7)
	WBC	ES = -1,25 (IC <sub>90%</sub> = -2,1 à -0,5)	ES = -1,69 (IC <sub>90%</sub> = -2,5 à -1)	ES = -1,43 (IC <sub>90%</sub> = -2,3 à -0,6)	ES = -1,57 (IC <sub>90%</sub> = -2,4 à -0,7)
<b>CMJ-1J</b>	CWI	ES = -1,34 (IC <sub>90%</sub> = -2,1 à -0,5)	ES = -1,03 (IC <sub>90%</sub> = -1,8 à -0,3)	ES = -1,16 (IC <sub>90%</sub> = -2 à -0,4)	ES = -0,53 (IC <sub>90%</sub> = -1,3 à 0,2)
	WBC	ES = -1,03 (IC <sub>90%</sub> = -1,8 à -0,3)	ES = -0,81 (IC <sub>90%</sub> = -1,6 à -0)	ES = -1,7 (IC <sub>90%</sub> = -2,6 à -0,9)	ES = -1,02 (IC <sub>90%</sub> = -1,8 à -0,3)
<b>[CK]</b>	CWI	N/A	ES = 0,29 (IC <sub>90%</sub> = -0,5 à 1)	ES = 0,54 (IC <sub>90%</sub> = -0,2 à 1,3)	ES = 1,24 (IC <sub>90%</sub> = 0,4 à 2)
	WBC	N/A	ES = 1,21 (IC <sub>90%</sub> = 0,4 à 2)	ES = 1,02 (IC <sub>90%</sub> = 0,2 à 1,8)	ES = 1,34 (IC <sub>90%</sub> = 0,5 à 2,1)
<b>Douleurs</b>	CWI	ES = 2,15 (IC <sub>90%</sub> = 1,2 à 3,1)	ES = 2,35 (IC <sub>90%</sub> = 1,4 à 3,3)	ES = 3,86 (IC <sub>90%</sub> = 2,7 à 5,1)	ES = 2,88 (IC <sub>90%</sub> = 1,9 à 3,9)
	WBC	ES = 2,18 (IC <sub>90%</sub> = 1,3 à 3,1)	ES = 3,7 (IC <sub>90%</sub> = 2,5 à 4,9)	ES = 5,88 (IC <sub>90%</sub> = 4,2 à 7,5)	ES = 3,17 (IC <sub>90%</sub> = 2,1 à 4,3)
<b>Perception de la récupération</b>	CWI	N/A	ES = 0,79 (IC <sub>90%</sub> = 0 à 1,6)	ES = 1,88 (IC <sub>90%</sub> = 1 à 2,8)	ES = 1,51 (IC <sub>90%</sub> = 0,7 à 2,3)
	WBC	N/A	ES = 0,99 (IC <sub>90%</sub> = 0,2 à 1,8)	ES = 1,61 (IC <sub>90%</sub> = 0,8 à 2,5)	ES = 1,33 (IC <sub>90%</sub> = 0,5 à 2,1)

CWI = bain froid, WBC = cryothérapie corps entier. N/A = non applicable

Dans les trois études, l'effet du temps était modéré à très large 48h et 72h après l'exercice inducteur de dommages musculaires sauf la force concentrique à 60°.s<sup>-1</sup> dans la condition musculation (étude 2). Dans l'étude 2, pour la circonférence de la cuisse, les résultats montrent un effet trivial du temps après l'exercice inducteur de dommages musculaires dans la condition contrôle pour 1/3 (pre vs 48h: 57,1±2,7 vs 56,6±2,4 ES = 0,19 (IC<sub>90%</sub> = -0,5 to 0,87), 2/3 (pre vs 48h: 48±3,9 vs 47,7±3,2 ES = 0,07 (IC<sub>90%</sub> = -0,62 to 0,75), 1/2 (pre vs 48h: 53,9±2,3 vs 54,1±2,9 ES = -0,08 (IC<sub>90%</sub> = -0,77 to 0,61).

**Tableau 14** : Effet du temps pour chaque variable en comparaison avec les valeurs de référence (étude 2)

Variable	Condition	Post	20h	24h	48h
Force concentrique 60°.s <sup>-1</sup>	PAS	ES = 1,16 (IC <sub>90%</sub> = 0,40 à 1,84)	ES = 0 (IC <sub>90%</sub> = -0,67 à 0,67)	ES = 0,24 (IC <sub>90%</sub> = -0,45 à 0,90)	ES = 0,68 (IC <sub>90%</sub> = -0,03 à 1,34)
	MUS	ES = 1,16 (IC <sub>90%</sub> = 0,40 à 1,84)	ES = -0,17 (IC <sub>90%</sub> = -0,83 à 0,51)	ES = -0,28 (IC <sub>90%</sub> = -0,95 à 0,40)	ES = -0,24 (IC <sub>90%</sub> = -0,90 à 0,45)
Force concentrique 120°.s <sup>-1</sup>	PAS	ES = 1,41 (IC <sub>90%</sub> = 0,62 à 2,11)	ES = 1,96 (IC <sub>90%</sub> = 1,08 à 2,70)	ES = 2,36 (IC <sub>90%</sub> = 1,41 à 3,14)	ES = 1,35 (IC <sub>90%</sub> = 0,56 à 2,04)
	MUS	ES = 1,15 (IC <sub>90%</sub> = 0,39 à 1,83)	ES = 1,62 (IC <sub>90%</sub> = 0,79 à 2,33)	ES = 1,33 (IC <sub>90%</sub> = 0,55 à 2,02)	ES = 1,66 (IC <sub>90%</sub> = 0,83 à 2,38)
Force excentrique 120°.s <sup>-1</sup>	PAS	ES = 3,26 (IC <sub>90%</sub> = 2,12 à 4,17)	ES = 3,47 (IC <sub>90%</sub> = 2,31 à 4,39)	ES = 3,26 (IC <sub>90%</sub> = 2,15 à 4,16)	ES = 2,75 (IC <sub>90%</sub> = 1,73 à 3,57)
	MUS	ES = 0,86 (IC <sub>90%</sub> = 0,13 à 1,53)	ES = 1,16 (IC <sub>90%</sub> = 0,4 à 1,84)	ES = 2,16 (IC <sub>90%</sub> = 1,25 à 2,92)	ES = 1,84 (IC <sub>90%</sub> = 0,99 à 2,57)
Force isométrique 60°	PAS	ES = 2,42 (IC <sub>90%</sub> = 1,47 à 3,21)	ES = 1,73 (IC <sub>90%</sub> = 0,89 à 2,45)	ES = 2,42 (IC <sub>90%</sub> = 1,47 à 3,21)	ES = 2,12 (IC <sub>90%</sub> = 1,22 à 2,88)
	MUS	ES = 2,45 (IC <sub>90%</sub> = 1,49 à 3,24)	ES = 1,83 (IC <sub>90%</sub> = 0,98 à 2,56)	ES = 2 (IC <sub>90%</sub> = 1,12 à 2,74)	ES = 1,41 (IC <sub>90%</sub> = 0,62 à 2,11)
CMJ-1J	PAS	ES = -0,12 (IC <sub>90%</sub> = -0,79 à 0,56)	ES = -0,20 (IC <sub>90%</sub> = -0,90 à 0,51)	ES = -0,44 (IC <sub>90%</sub> = -1,10 à 0,26)	ES = -0,76 (IC <sub>90%</sub> = -1,43 à -0,04)
	MUS	ES = -0,13 (IC <sub>90%</sub> = -0,80 à 0,55)	ES = -0,71 (IC <sub>90%</sub> = -1,37 à 0,01)	ES = -0,81 (IC <sub>90%</sub> = -1,48 à -0,08)	ES = -0,44 (IC <sub>90%</sub> = -1,11 à 0,25)
Puissance	PAS	ES = -0,14 (IC <sub>90%</sub> = -0,83 à 0,55)	ES = -1,06 (IC <sub>90%</sub> = -1,75 à -0,29)	ES = -1,62 (IC <sub>90%</sub> = -2,33 à -0,79)	ES = -1,23 (IC <sub>90%</sub> = -1,91 à -0,46)
	MUS	ES = -0,09 (IC <sub>90%</sub> = -0,76 à -0,58)	ES = -0,54 (IC <sub>90%</sub> = -1,21 à 0,10)	ES = -0,53 (IC <sub>90%</sub> = -1,19 à 0,17)	ES = -0,85 (IC <sub>90%</sub> = -1,52 à -0,12)
Douleurs	PAS	ES = -2,08 (IC <sub>90%</sub> = -2,83 à -1,18)	ES = -2,49 (IC <sub>90%</sub> = -3,3 à -1,5)	ES = -2,77 (IC <sub>90%</sub> = -3,65 à -1,67)	ES = -3,54 (IC <sub>90%</sub> = -4,48 à -2,37)
	MUS	ES = -2,31 (IC <sub>90%</sub> = -3,09 à -1,38)	ES = -2 à 63 (IC <sub>90%</sub> = -3,45 à -1,61)	ES = -3,67 (IC <sub>90%</sub> = -4,64 à -2,44)	ES = -4,84 (IC <sub>90%</sub> = -5,97 à -3,38)
[CK]	PAS	N/A	ES = 0,14 (IC <sub>90%</sub> = -0,53 à 0,81)	ES = 0,27 (IC <sub>90%</sub> = -0,41 à 0,94)	ES = 0,16 (IC <sub>90%</sub> = -0,52 à 0,83)
	MUS	N/A	ES = -0,04 (IC <sub>90%</sub> = -0,71 à 0,64)	ES = -0,32 (IC <sub>90%</sub> = -0,99 à 0,36)	ES = 0,34 (IC <sub>90%</sub> = -0,38 à 1,04)

PAS = récupération passive. MUS = séance de musculation. N/A = non applicable.

**Tableau 15** : Effet du temps pour chaque variable en comparaison avec les valeurs de référence (étude 3)

Variable	Condition	0h	24h	48h	72h
<b>Force excentrique 60°,s<sup>-1</sup></b>	PASSIVE	ES = -2,27 (IC <sub>95%</sub> = -1,3 à -3,2)	ES = -2,03 (IC <sub>95%</sub> = -1,1 à -3)	ES = -1,47 (IC <sub>95%</sub> = -0,6 à -2,3)	ES = -1,22 (IC <sub>95%</sub> = -0,4 à -2,1)
	PLACEBO	ES = -2,33 (IC <sub>95%</sub> = -1,4 à -3,3)	ES = -1,77 (IC <sub>95%</sub> = -0,9 à -2,7)	ES = -1,35 (IC <sub>95%</sub> = -0,5 à -2,2)	ES = -1,44 (IC <sub>95%</sub> = -0,6 à -2,3)
<b>Force isométrique 60°</b>	PASSIVE	ES = -4,44 (IC <sub>95%</sub> = -3 à -5,8)	ES = -2,79 (IC <sub>95%</sub> = -1,7 à -3,9)	ES = -1,68 (IC <sub>95%</sub> = -0,8 à -2,6)	ES = -1,24 (IC <sub>95%</sub> = -0,4 à -2,1)
	PLACEBO	ES = -2,97 (IC <sub>95%</sub> = -1,9 à -4,1)	ES = -2,18 (IC <sub>95%</sub> = -1,2 à -3,1)	ES = -2,04 (IC <sub>95%</sub> = -1,1 à -3)	ES = -1,78 (IC <sub>95%</sub> = -0,9 à -2,7)
<b>CMJ-2J</b>	PASSIVE	ES = -0,94 (IC <sub>95%</sub> = -0,1 à -1,8)	ES = -0,26 (IC <sub>95%</sub> = 0,5 à -1)	ES = -0,37 (IC <sub>95%</sub> = 0,4 à -1,1)	ES = -0,7 (IC <sub>95%</sub> = -0,03 à -1,5)
	PLACEBO	ES = -1,22 (IC <sub>95%</sub> = -0,4 à -2,1)	ES = -0,11 (IC <sub>95%</sub> = -0,7 à -0,9)	ES = -0,19 (IC <sub>95%</sub> = -0,6 à -1)	ES = -0,2 (IC <sub>95%</sub> = -0,6 à -1)
<b>CMJ-1J</b>	PASSIVE	ES = -0,64 (IC <sub>95%</sub> = 0,1 à -1,4)	ES = 0,24 (IC <sub>95%</sub> = -0,5 à 1)	ES = -0,14 (IC <sub>95%</sub> = -0,6 à 0,9)	ES = -0,39 (IC <sub>95%</sub> = 0,4 à -1,2)
	PLACEBO	ES = -0,53 (IC <sub>95%</sub> = 0,3 à -1,3)	ES = 0,09 (IC <sub>95%</sub> = -0,7 à 0,9)	ES = -0,39 (IC <sub>95%</sub> = 0,4 à -1,2)	ES = -0,53 (IC <sub>95%</sub> = -0,3 à -1,3)
<b>[CK]</b>	PASSIVE	N/A	ES = 0,84 (IC <sub>95%</sub> = 0 à 1,6)	ES = 0,76 (IC <sub>95%</sub> = 0 à 1,6)	ES = 1,07 (IC <sub>95%</sub> = 0,3 à 1,9)
	PLACEBO	N/A	ES = 1,12 (IC <sub>95%</sub> = 0,3 à 2)	ES = 1,06 (IC <sub>95%</sub> = 0,2 à 1,9)	ES = 1,08 (IC <sub>95%</sub> = 0,3 à 1,9)
<b>Douleurs</b>	PASSIVE	ES = 1,18 (IC <sub>95%</sub> = 0,4 à 2)	ES = 1,87 (IC <sub>95%</sub> = 1 à 2,8)	ES = 2,5 (IC <sub>95%</sub> = 1,5 à 3,5)	ES = 1,83 (IC <sub>95%</sub> = 0,9 à 2,7)
	PLACEBO	ES = 1,25 (IC <sub>95%</sub> = 0,4 à 2,1)	ES = 2,25 (IC <sub>95%</sub> = 1,3 à 3,2)	ES = 2,18 (IC <sub>95%</sub> = 1,2 à 3,1)	ES = 1,58 (IC <sub>95%</sub> = 0,7 à 2,5)
<b>Perception de la récupération</b>	PASSIVE	N/A	N/A	ES = 1,92 (IC <sub>95%</sub> = 1 à 2,8)	ES = 0,97 (IC <sub>95%</sub> = 0,2 à 1,8)
	PLACEBO	N/A	N/A	ES = -0,03 (IC <sub>95%</sub> = 0,7 à -0,8)	ES = -0,33 (IC <sub>95%</sub> = 0,5 à -1)

N/A = non applicable

### 2.2.3. Variabilité de la fatigue induite par l'exercice inducteur de dommages musculaires

Le tableau 16 présente la variabilité des paramètres mesurés immédiatement après l'exercice inducteur de dommages musculaires. Les résultats obtenus ont montré une variabilité élevée de la force et de la détente immédiatement après l'exercice inducteur de dommages musculaires avec des coefficients de variation supérieurs à 10%.

### 2.2.4. Effet de l'ordre de passage en fonction de la dominance de la jambe

Le tableau 17 présente les résultats de la comparaison de la réponse immédiatement après l'exercice en fonction de la jambe qui réalise l'exercice (dominante ou non-dominante). L'amplitude de la différence entre les deux passages était triviale pour la force excentrique à 60°.s-1 et CMJ-1J. L'amplitude de la différence entre les deux passages était modérée pour la force isométrique à 60° et CMJ-2J, avec une diminution de force et de détente plus importante lorsque le premier passage était réalisé avec la jambe non-dominante.

**Tableau 16** : Variabilité des paramètres mesurés immédiatement après l'exercice inducteur de dommages musculaires

	Essai 1	Essai 2	Effect Size (IC <sub>90%</sub> )	TE (IC <sub>90%</sub> )	ICC (IC <sub>90%</sub> )	CV
<b>Force excentrique 60°.s<sup>-1</sup> (N.m<sup>-1</sup>)</b>	163,8±40,6 n = 23	153,6±41,5 n = 23	0,25 (IC <sub>90%</sub> = -0,2 à 0,7)	14,35 (IC <sub>90%</sub> = 11,2 to 20,4)	0,89 (IC <sub>90%</sub> = 0,7 à 0,9)	25,8%
<b>Force isométrique 60° (N)</b>	96±18,8 n = 35	90,5±21,9 n = 35	0,27 (IC <sub>90%</sub> = -0,1 à 0,7)	11,28 (IC <sub>90%</sub> = 8,9 à 15,6)	0,70 (IC <sub>90%</sub> = 0,4 à 0,8)	21,9%
<b>CMJ-1J (cm)</b>	16,3±3,3 n = 35	16±2,9 n = 35	0,10 (IC <sub>90%</sub> = -0,3 à 0,5)	1,9 (IC <sub>90%</sub> = 1,5 à 2,6)	0,63 (IC <sub>90%</sub> = 0,3 à 0,8)	19,1%
<b>CMJ-2J (cm)</b>	31,6±5,2 n = 23	31,1±5,3 n = 23	0,10 (IC <sub>90%</sub> = -0,4 à 0,6)	1,5 (IC <sub>90%</sub> = 1,2 à 2,1)	0,93 (IC <sub>90%</sub> = 0,8 à 0,96)	16,9%

Essai 1 et Essai 2 correspondent aux premier et deuxième passages réalisés par les sujets sur une jambe pour chaque variable mesurée.

**Tableau 17** : Comparaison de la réponse immédiatement l'exercice en fonction de la jambe utilisé lors du premier passage

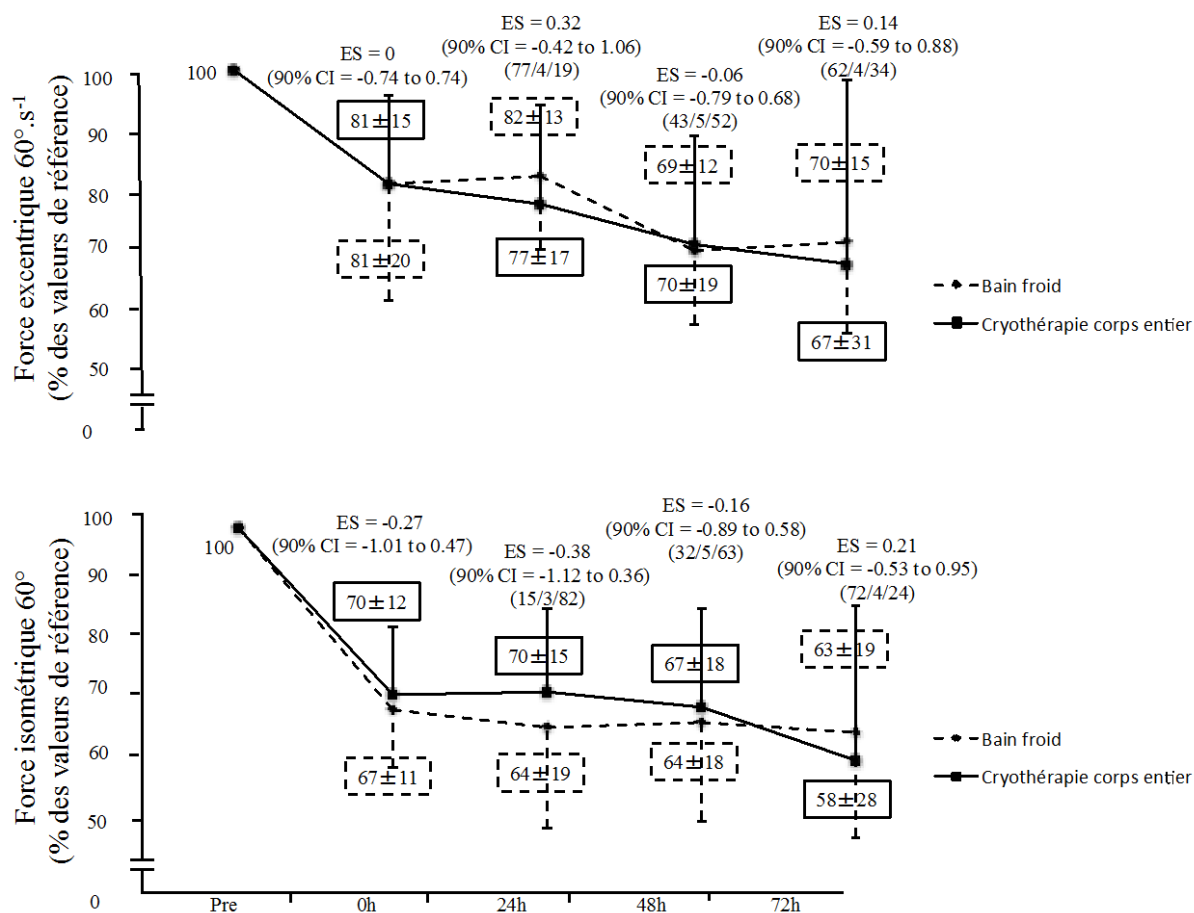
Paramètre mesuré	Non-dominante (1 <sup>er</sup> passage)	Dominante (1 <sup>er</sup> passage)	Effect Size (IC <sub>90%</sub> )
Force excentrique 60°.s <sup>-1</sup> (% des valeurs de référence)	84,8±9,7 n = 12	83,9±21,4 n = 11	0,06 (IC <sub>90%</sub> = -0,63 à 0,74)
Force isométrique 60° (% des valeurs de référence)	66,5±10,7 n = 19	74,4±12,6 n = 16	-0,68 (IC <sub>90%</sub> = -1,24 à -0,09)
CMJ-1J (% des valeurs de référence)	99±13,7 n = 19	97,2±9 n = 16	0,15 (IC <sub>90%</sub> = -0,41 à 0,71)
CMJ-2J (% des valeurs de référence)	89,2±8,8 n = 12	98,3±7,7 n = 11	-1,10 (IC <sub>90%</sub> = -1,79 à -0,32)

### 2.2.5. Effet de la condition

#### *Comparaison entre immersion en bain froid et cryothérapie corps entier (étude 1)*

Les ES et IC<sub>90%</sub> pour l'effet de la condition et les probabilités d'avoir un effet en faveur d'une condition sont présentés par la figure 3 pour la force excentrique à 60°.s<sup>-1</sup> et la force isométrique, la figure 4 pour la hauteur de saut lors de CMJ-1J et CMJ-2J, la figure 5 pour les données perceptives et la figure 6 pour les concentrations en créatine kinase. La figure 3 montre une diminution continue de la performance en force dans les jours qui suivent l'exercice inducteur de dommages musculaires.

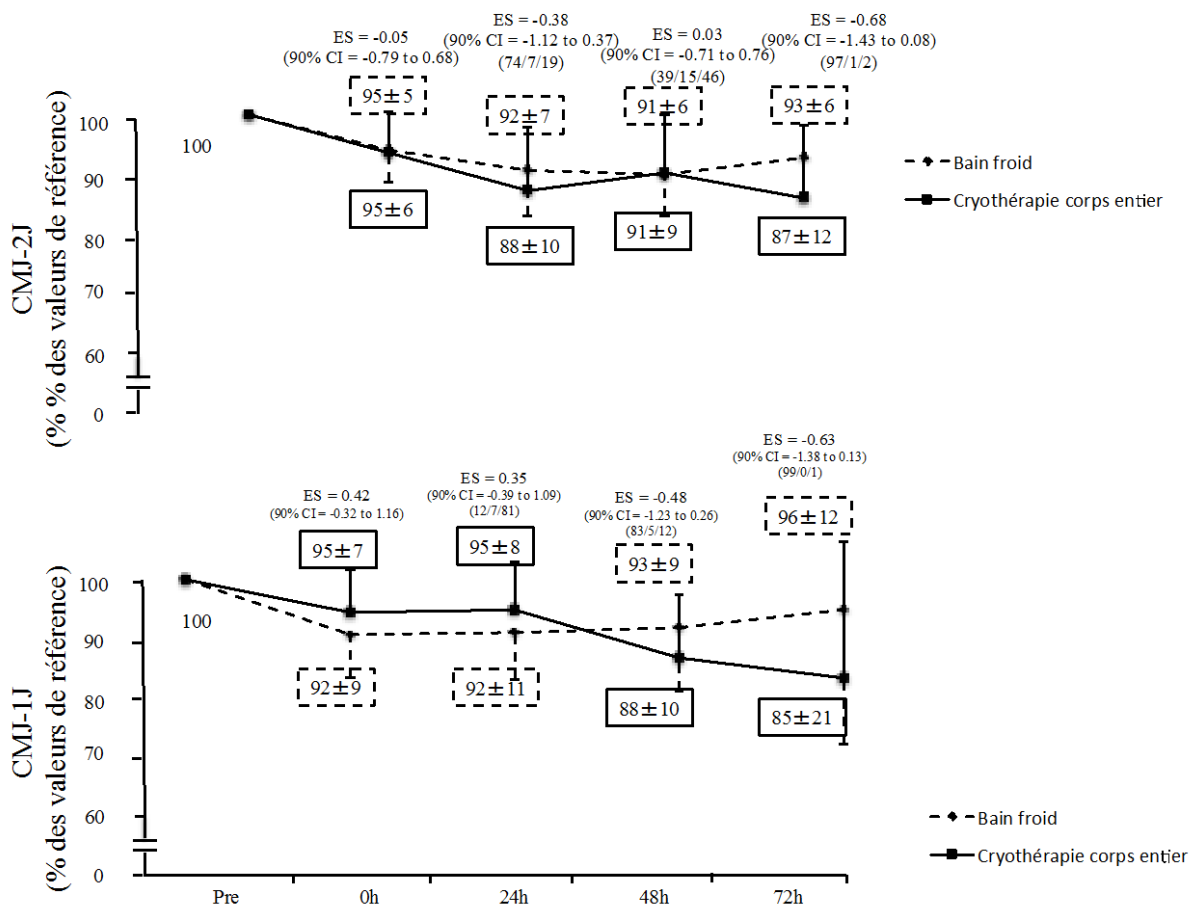




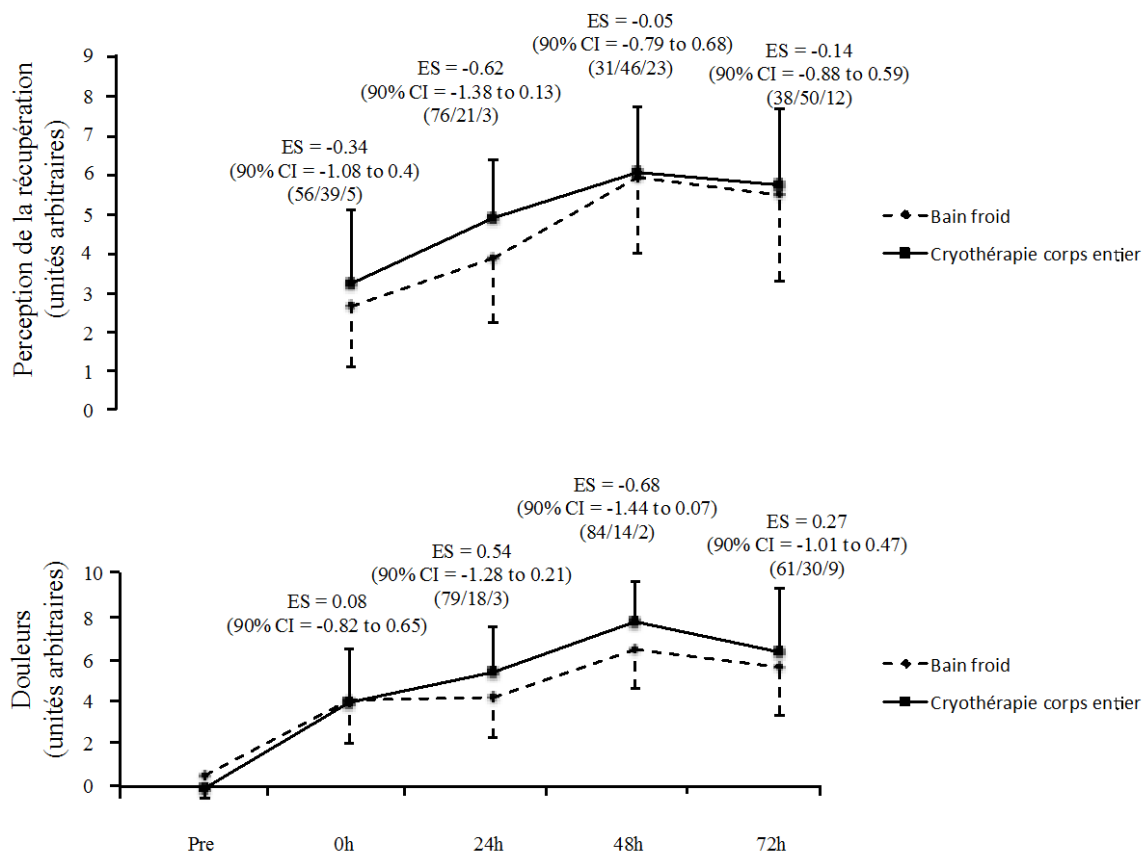
**Figure 3 :** Evolution de la force excentrique à 60°.s<sup>-1</sup> et de la force isométrique dans les conditions bain froid et cryothérapie corps entier avant (Pre), immédiatement après (0h), 24h, 48h et 72h après l'exercice inducteur de dommages musculaires. ES = effect size entre le bain froid et la cryothérapie corps entier. Les probabilités d'avoir un effet sont présentées comme suit : bain froid/trivial/cryothérapie corps entier.

La performance en saut diminue dans les deux conditions immédiatement après exercice jusque 24h. A partir de 24h l'évolution de la performance est différente entre les conditions. Pour les données perceptives, il y a un pic du niveau de douleurs 48h après l'exercice inducteur de dommages musculaires et le niveau de la perception de la récupération est le plus élevé à ce même point. Les [CK] augmentent de manière continue dans les deux conditions.

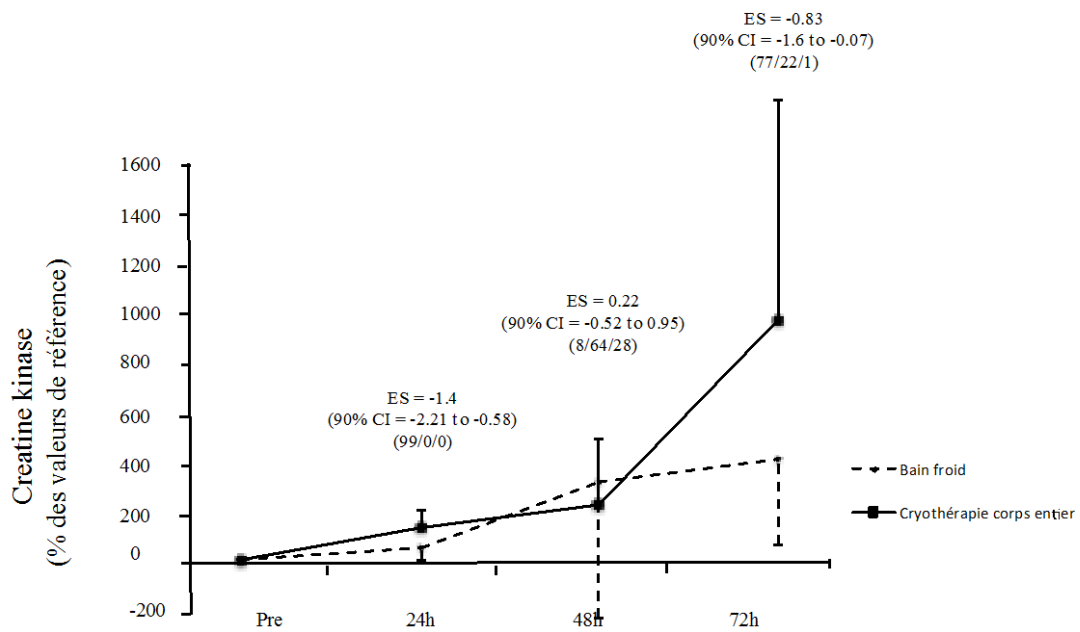
Un effet de la condition en faveur du bain froid a été observé pour la performance en CMJ-1J et CMJ-2J 72h post exercice (figure 4), les douleurs musculaires 48h post exercice et la perception de la récupération 24h post exercice (figure 5). Les [CK] étaient largement et modérément plus basses dans la condition bain froid en comparaison avec la cryothérapie corps entier respectivement 24h et 72h après exercice.



**Figure 4 :** Evolution de la hauteur de saut pour CMJ-1J et CMJ-2J dans les conditions bain froid et cryothérapie corps entier avant (Pre), immédiatement après (0h), 24h, 48h et 72h après l'exercice inducteur de dommages musculaires. ES = effect size entre le bain froid et la cryothérapie corps entier. Les probabilités d'avoir un effet sont présentées comme suit : bain froid/trivial/cryothérapie corps entier.



**Figure 5** : Evolution du niveau de douleur et de la perception de la récupération dans les conditions bain froid et cryothérapie corps entier avant (Pre), immédiatement après (0h), 24h, 48h et 72h après l'exercice inducteur de dommages musculaires. ES = effect size entre le bain froid et la cryothérapie corps entier. Les probabilités d'avoir un effet sont présentées comme suit : bain froid/trivial/cryothérapie corps entier.



**Figure 6** : Evolution des concentrations en créatine kinase dans les conditions bain froid (cold-water immersion) et cryothérapie corps entier (whole-body cryotherapy) avant (Pre), 24h, 48h et 72h après l'exercice inducteur de dommages musculaires. ES = effect size entre le bain froid et la cryothérapie corps entier. Les probabilités d'avoir un effet sont présentées comme suit : bain froid/trivial/cryothérapie corps entier.

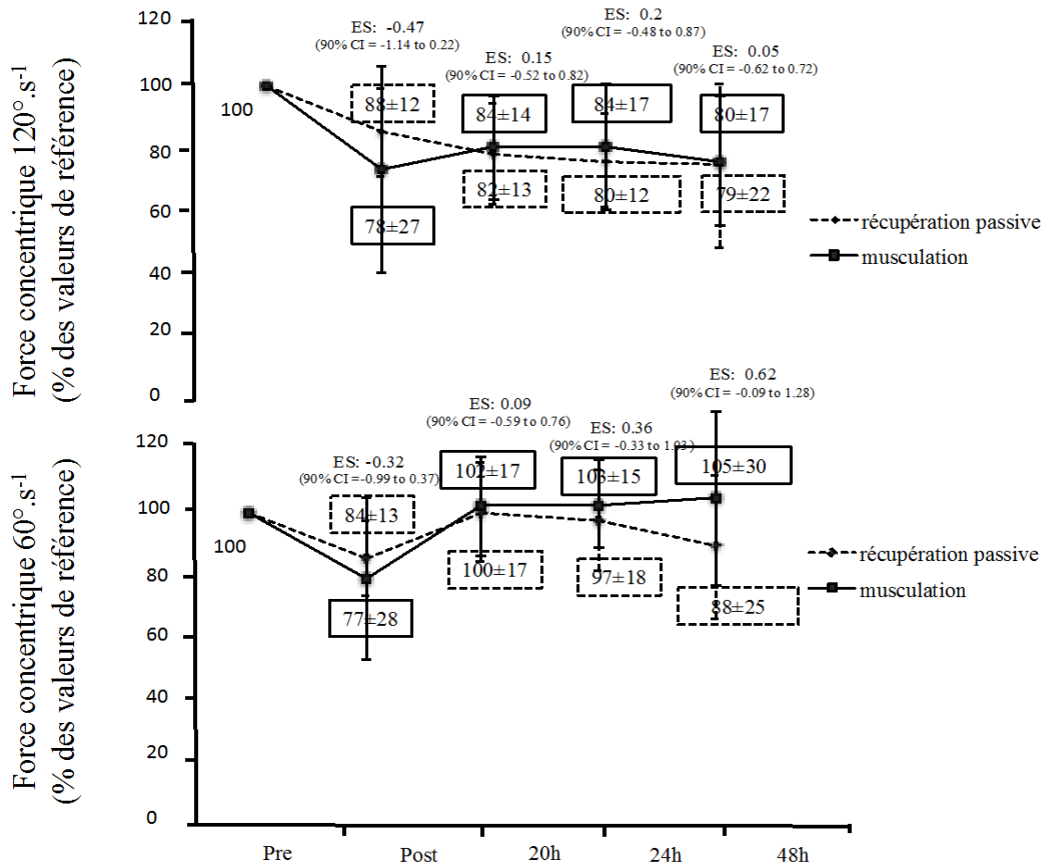
### *Comparaison entre séance de musculation et récupération passive (étude 2)*

Les résultats indiquent qu'il n'y avait pas d'effet significatif de l'interaction entre le temps et la condition pour chaque variable mesurée : force concentrique à  $60^{\circ}.s^{-1}$  ( $p = 0,45$ ), force concentrique à  $120^{\circ}.s^{-1}$  ( $p = 0,94$ ), force excentrique à  $120^{\circ}.s^{-1}$  ( $p = 0,93$ ), force isométrique à  $60^{\circ}$  ( $p = 0,94$ ), CMJ-1J ( $p = 0,99$ ), puissance sur une jambe ( $P = 0,98$ ), [CK] ( $p = 0,61$ ), circonférence de la cuisse à 1/3 ( $p = 0,99$ ), 2/3 ( $p = 0,99$ ), 1/2 ( $p = 0,99$ ) et les douleurs musculaires ( $p = 0,67$ ).

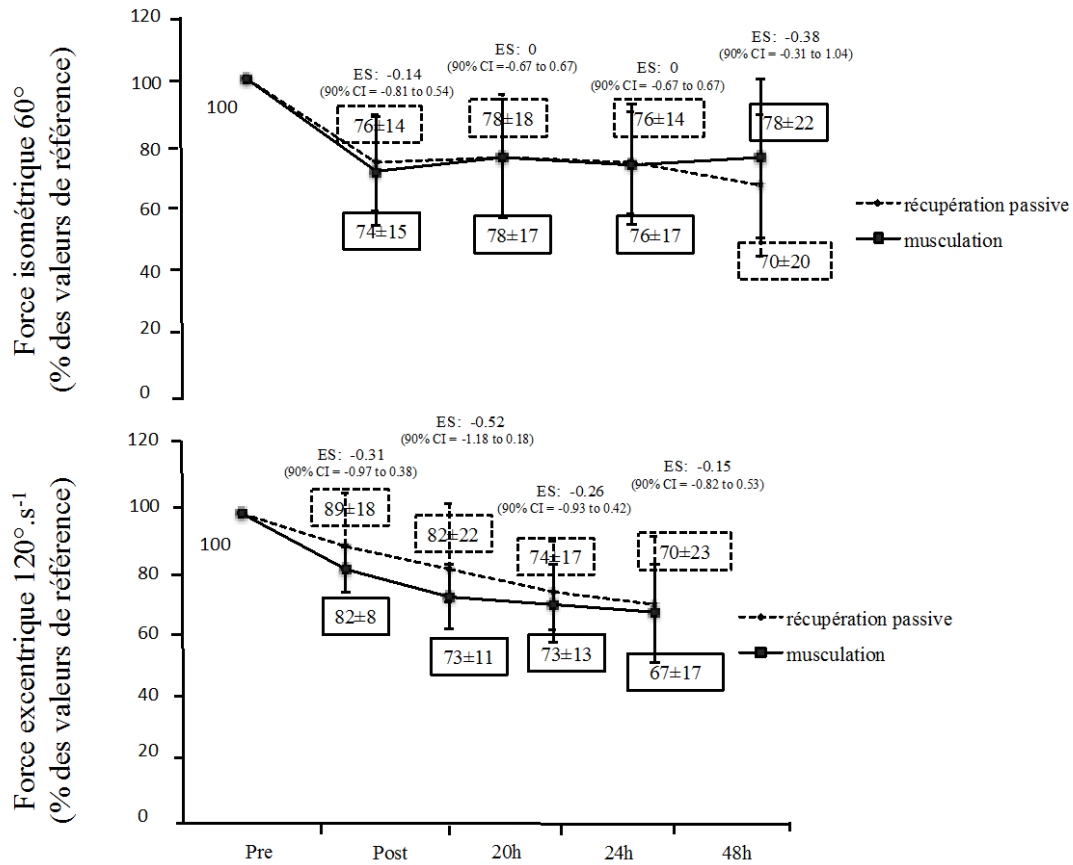
Les résultats des effets de la condition sont présentés sur la figure 7 pour la force concentrique à  $60^{\circ}.s^{-1}$  et  $120^{\circ}.s^{-1}$ , la figure 8 pour la force excentrique à  $120^{\circ}.s^{-1}$  et la force isométrique, la figure 9 pour la détente en CMJ-1J et la puissance sur une jambe, la figure 10 pour les douleurs et la figure 11 pour les [CK]. Les figures montrent que les niveaux de force ne sont pas revenus à leurs valeurs de référence 48h après l'exercice inducteur de dommages musculaires sauf la force concentrique à  $60^{\circ}.s^{-1}$  dans la condition musculation. La détente et la puissance ne varient pas au cours du temps. Le niveau de douleurs augmente de manière continue au cours des 48h qui suivent l'exercice inducteur de dommages musculaires.

Les résultats montrent un effet modéré de la condition 48h après l'exercice inducteur de dommages musculaires pour la force concentrique à  $60^{\circ}.s^{-1}$  ( $ES = 0,65$  ;  $IC_{90\%} = -0,06$  à  $1,32$ ) alors que des effets triviaux à petits étaient observés avant, immédiatement après, 20h, 24h et 48h après exercice (figure 8). Des effets triviaux à petits de la condition ont été observés avant, immédiatement après, 20h, 24h et 48h après exercice pour les autres variables mesurées : force concentrique à  $120^{\circ}.s^{-1}$ , force excentrique à  $120^{\circ}.s^{-1}$ , force isométrique à  $60^{\circ}$ , CMJ-1J, puissance sur une jambe, [CK] et les douleurs musculaires.

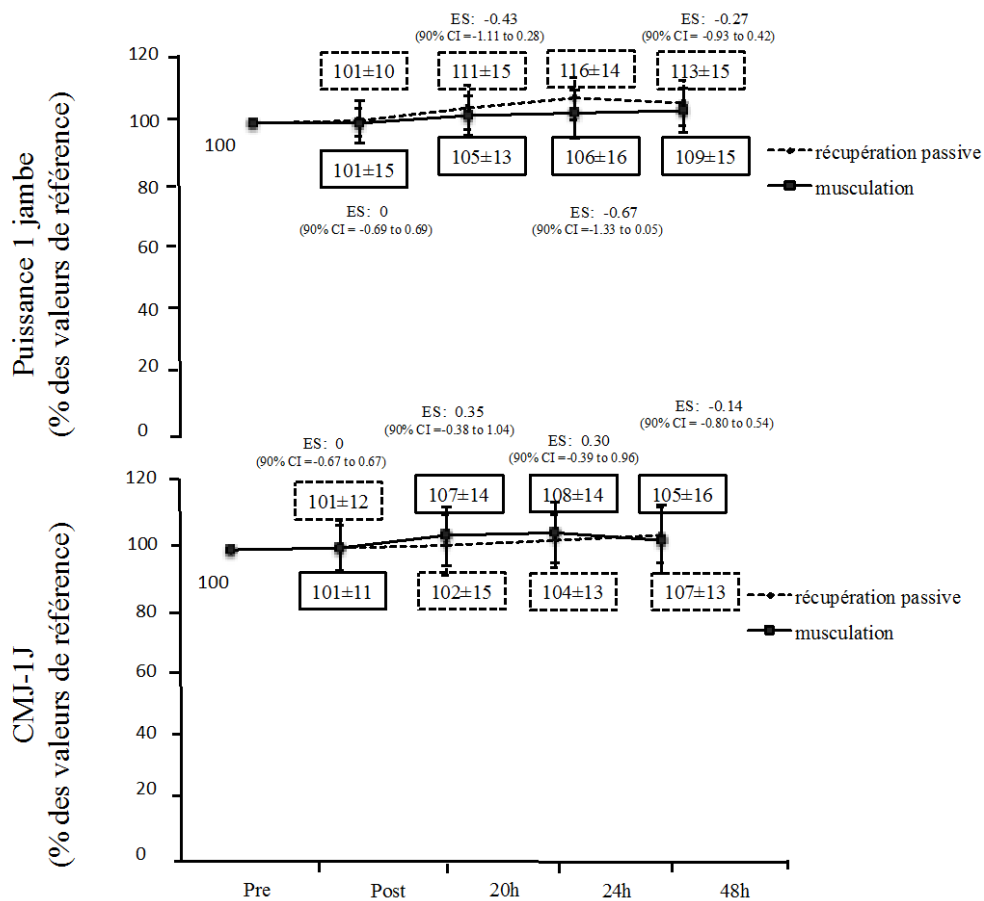
Pour la circonférence de la cuisse, un petit effet de la condition était observé pour 1/3 ( $ES$  48h vs 48h =  $0,31$  ( $90\% CI = -0,37$  à  $0,98$ )), 2/3 ( $ES$  48h vs 48h =  $0,4$  ( $IC_{90\%} = -0,29$  à  $1,06$ )) et 1/2 ( $ES$  48h vs 48h =  $0,48$  ( $IC_{90\%} = -0,21$  à  $1,15$ )).



**Figure 7** : Evolution de la force concentrique à 60°·s<sup>-1</sup> et 120°·s<sup>-1</sup> dans les conditions récupération passive et séance de musculation avant (Pre), immédiatement après (Post), 20h, 24h et 48h après l'exercice inducteur de dommages musculaires. ES = effect size entre la récupération passive et la séance de musculation.

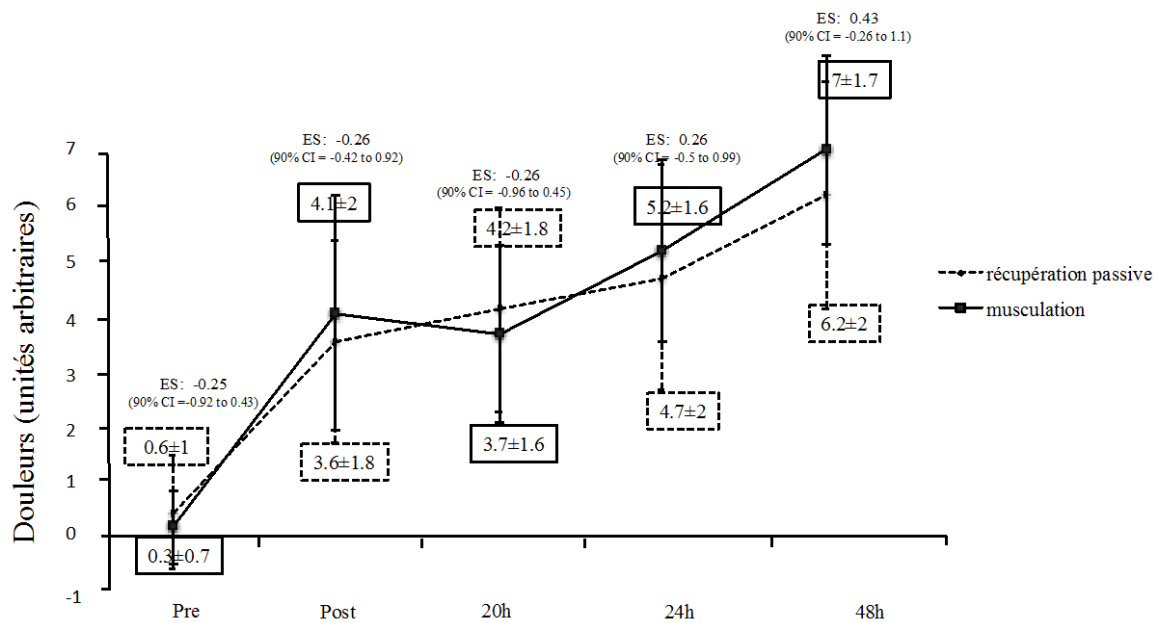


**Figure 8** : Evolution de la force excentrique à 120°.s<sup>-1</sup> et isométrique à 60° dans les conditions récupération passive et séance de musculation avant (Pre), immédiatement après (Post), 20h, 24h et 48h après l'exercice inducteur de dommages musculaires. ES = effect size entre la récupération passive et la séance de musculation.

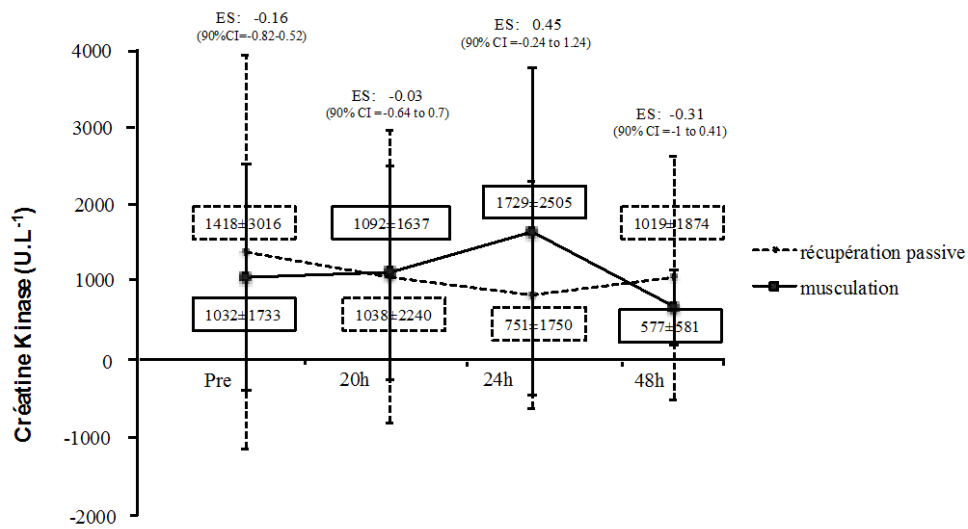


**Figure 9 :** Evolution de la détente en CMJ-1J et la puissance sur une jambe dans les conditions récupération passive et séance de musculation avant (Pre), immédiatement après (Post), 20h, 24h et 48h après l'exercice inducteur de dommages musculaires. ES = effect size entre la récupération passive et la séance de musculation.





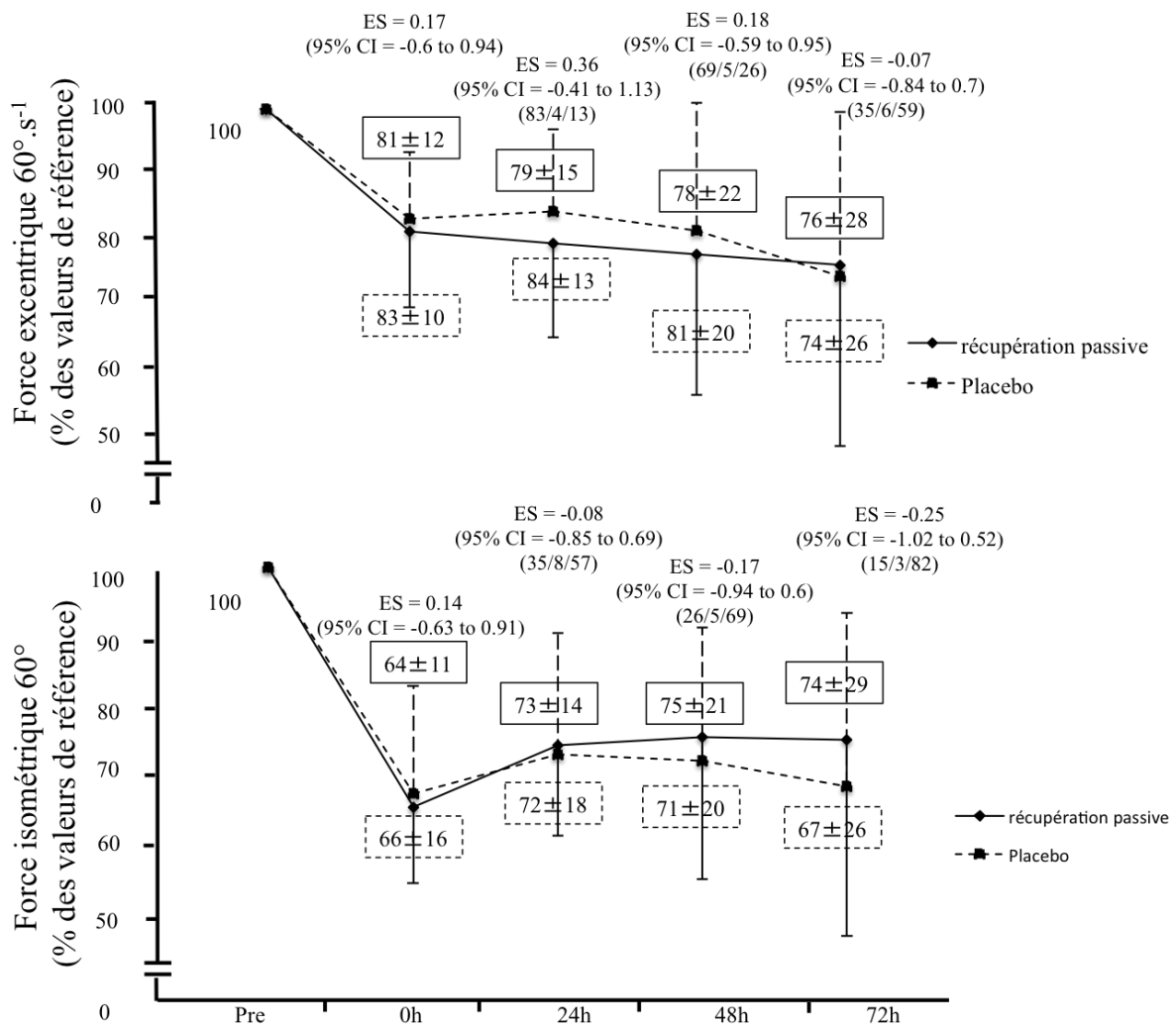
**Figure 10** : Evolution du niveau de douleurs dans les conditions récupération passive et séance de musculation avant (Pre), immédiatement après (Post), 20h, 24h et 48h après l'exercice inducteur de dommages musculaires. ES = effect size entre la récupération passive et la séance de musculation.



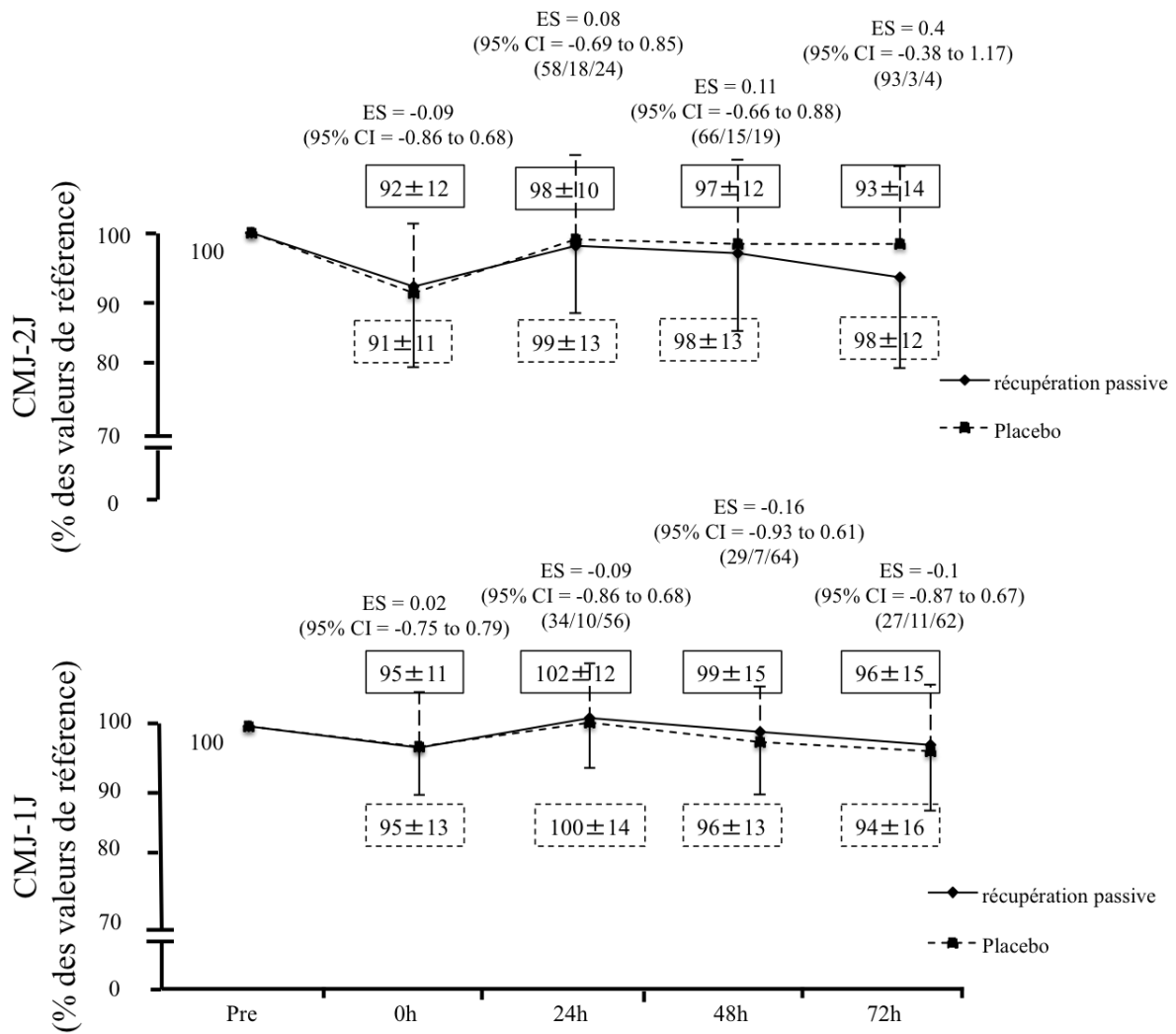
**Figure 11** : Evolution des concentrations en créatine kinase dans les conditions récupération passive et séance de musculation avant (Pre), immédiatement après (Post), 20h, 24h et 48h après l'exercice inducteur de dommages musculaires. ES = effect size entre la récupération passive et la séance de musculation.

### *Comparaison entre placebo et récupération passive (étude 3)*

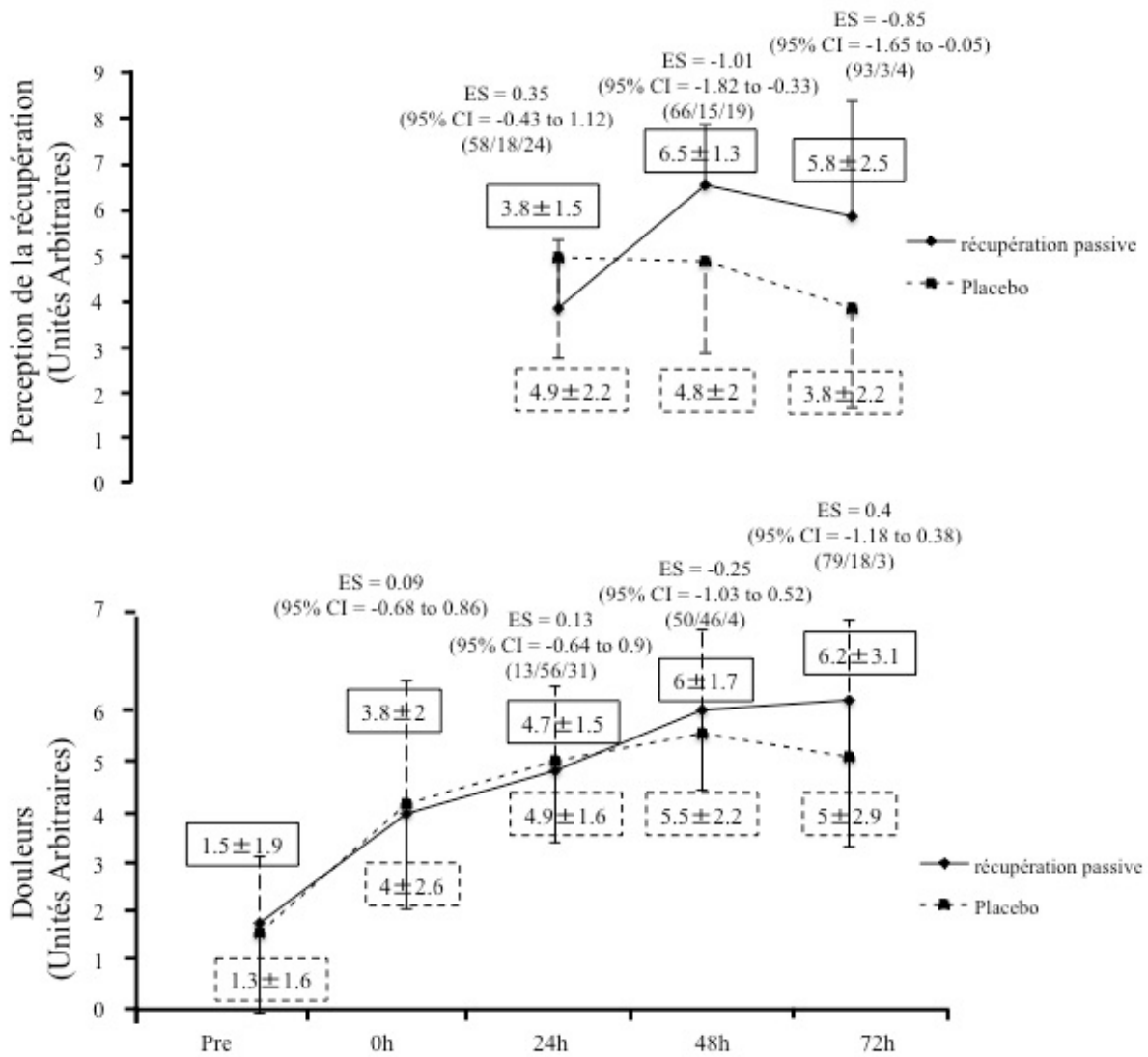
Les ES et IC<sub>90%</sub> pour l'effet de la condition ainsi que les probabilités de chance d'avoir un effet sont également présentées sur la figure 12 pour la force excentrique à 60°.s<sup>-1</sup> et la force isométrique, la figure 13 pour la hauteur de saut lors de CMJ-1J et CMJ-2J, la figure 14 pour les données subjectives et la figure 15 pour les concentrations en créatine kinase. Les niveaux de force ont diminué immédiatement après l'exercice inducteur de dommages musculaires et ne sont pas revenus aux valeurs de référence 72h après l'exercice. La performance en CMJ-1J connaît une baisse immédiatement après l'exercice inducteur de dommages musculaires et revient aux valeurs de référence 24h après l'exercice. Pour le CMJ-2J, 72h après exercice les valeurs sont proches des valeurs de référence dans la condition placebo contrairement à la condition contrôle. Les douleurs musculaires et le [CK] augmentent de manière continue au cours des 72h qui suivent l'exercice inducteur de dommages musculaires. Un petit effet de la condition en faveur de la condition placebo pour CMJ-2J et les douleurs était probable 72h après exercice (figure 13 et 14). Un possible petit effet était détectable en faveur de la condition placebo pour les douleurs 48h après exercice (figure 14). Un petit effet de la condition en faveur de la condition récupération passive pour la perception de la récupération 24h après exercice. Un effet modéré très probable était observé en faveur du placebo pour la perception de la récupération 48h et 72h après exercice (figure 14).



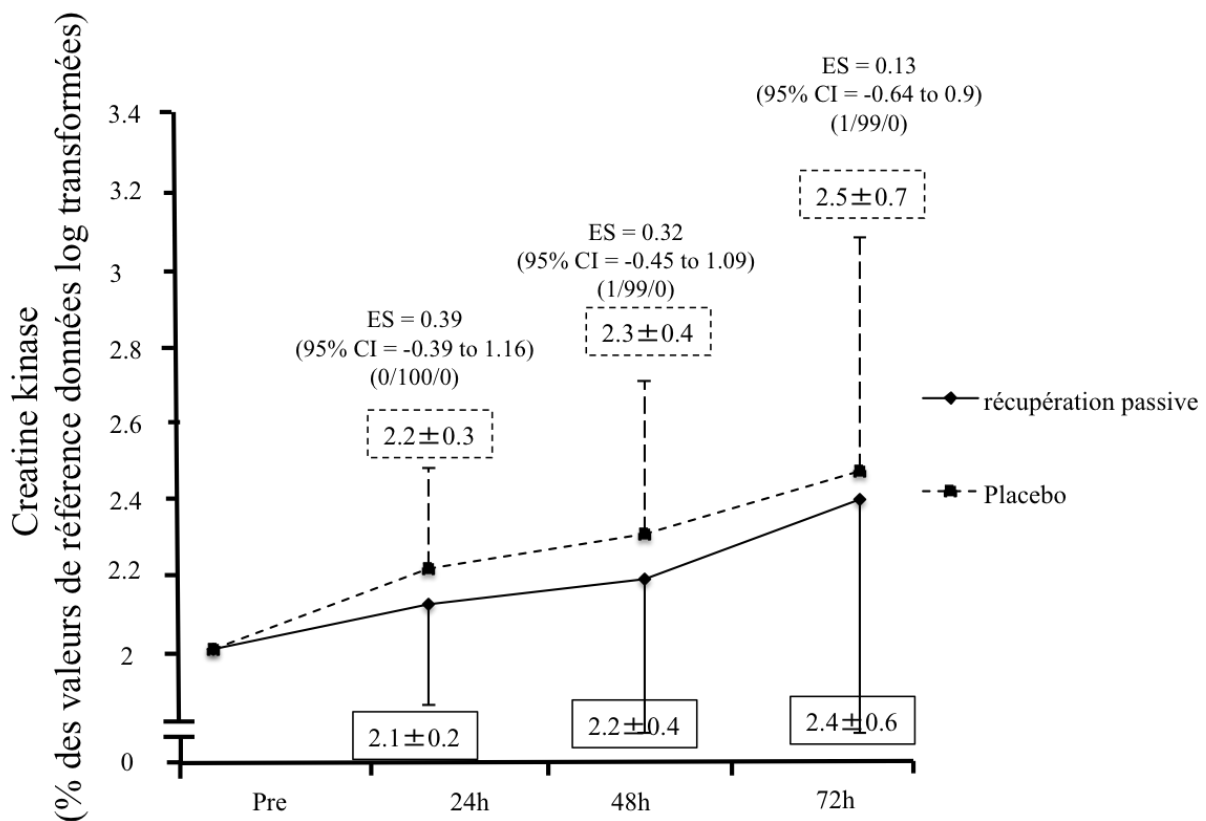
**Figure 12** : Evolution de la force excentrique à 60°.s<sup>-1</sup> et de la force isométrique dans les conditions placebo et récupération passive avant (Pre), immédiatement après (0h), 24h, 48h et 72h après l'exercice inducteur de dommages musculaires. ES = effect size entre le placebo et la récupération passive. Les probabilités d'avoir un effet sont présentées comme suit : placebo/trivial/récupération passive.



**Figure 13 :** Evolution de la détente en CMJ-1J et CMJ-2J dans les conditions placebo et récupération passive avant (Pre), immédiatement après (0h), 24h, 48h et 72h après l'exercice inducteur de dommages musculaires. ES = effect size entre le placebo et la récupération passive. Les probabilités d'avoir un effet sont présentées comme suit : placebo/trivial/récupération passive.



**Figure 14 :** Evolution des douleurs et de la perception de la récupération dans les conditions placebo et récupération passive avant (Pre), immédiatement après (0h), 24h, 48h et 72h après l'exercice inducteur de dommages musculaires. ES = effect size entre le placebo et la récupération passive. Les probabilités d'avoir un effet sont présentées comme suit : placebo/trivial/récupération passive.



**Figure 15 :** Evolution des douleurs et de la perception de la récupération dans les conditions placebo et récupération passive avant (Pre), immédiatement après (0h), 24h, 48h et 72h après l'exercice inducteur de dommages musculaires. ES = effect size entre le placebo et la récupération passive. Les probabilités d'avoir un effet sont présentées comme suit : placebo/trivial/récupération passive.

## 2.2.6. Perception de l'effort

### Etude 1

Une taille d'effet triviale (ES : -0,09 (IC<sub>90%</sub> = -0,96 to 0,79) était observée pour la différence entre les valeurs moyennes de perception de l'effort collectées après exercice dans la condition bain froid (6,3±2,4) et dans la condition cryothérapie corps entier (6,5±2,1).

### Etude 2

La valeur moyenne de la perception de l'effort relevée après exercice dans la condition de musculation (6,4±1) n'était pas significativement différente de celle relevée dans la condition récupération passive (6,1±1,3) (p=0,257, ES: 0,29 (IC<sub>90%</sub> = -0,40 to 0,95)).

### *Etude 3*

Une petite taille de l'effet (ES : -0.26; IC<sub>95%</sub> = -0.91 to 0.39) était observée pour la différence entre les valeurs moyennes de perception de l'effort collectées après exercice dans la condition placebo (6,8±1,2) et dans la condition récupération passive (7,2±1,8).



### 2.3. Discussion générale

Le but général de cette thèse était d'étudier les effets de différentes stratégies sur les cinétiques de récupération après un exercice inducteur de dommages musculaires. Pour répondre à cette problématique, trois études ont été menées avec pour objectifs de:

- 1) comparer les effets du bain froid (10 minutes à 10°C) et de la cryothérapie corps entier (3 minutes à -110°C) sur la récupération ;
- 2) évaluer les effets d'une séance de musculation du haut du corps réalisée le lendemain d'un exercice des membres inférieurs sur leur récupération;
- 3) étudier les effets de la consommation d'un placebo en comparaison avec une condition contrôle sur les cinétiques de récupération.

Dans ces études, un modèle expérimental constitué d'un exercice inducteur de dommages musculaires (75 contractions excentriques) et d'un modèle d'évaluation des cinétiques de récupération au cours des jours qui suivaient le match a été mis en place.

L'analyse de la fatigue induite par le modèle expérimental indique que l'exercice était suffisant pour induire des dommages musculaires plus importants qu'après la participation à une simulation de match de football (figures 3, 7, 8, 12). Pour que ce protocole soit pertinent, il était important de proposer un exercice induisant effectivement des dommages musculaires. La baisse du niveau de force est considérée comme un des meilleurs outils pour quantifier les dommages musculaires (Warren, 1999). Les résultats confirment l'efficacité de l'exercice choisi puisqu'un effet large à très large du temps était observé à chaque point dans les deux conditions des différentes études (tableaux 15, 16 et 17) et avec des baisses de force allant de -11% à -34% (figures 3, 7, 8, 12). Pour la force excentrique à 60°.s<sup>-1</sup>, la baisse moyenne de force, immédiatement après l'exercice inducteur de dommages musculaires, était de -19,5±1%. Pour la force isométrique à 60°, la baisse moyenne de force était de -30,5±5%.

La mise en place d'un modèle expérimental permet de standardiser l'exercice. L'analyse de la variabilité des réponses, suite à l'exercice inducteur de dommages musculaires mis en place dans cette thèse, montre une variation interindividuelle et intra-individuelle élevée (CV > 10% ; Atkinson et Nevill, 1998). Cela indique que, malgré la standardisation de l'exercice, les réponses individuelles à l'exercice varient de manière forte. Cette variabilité concorde avec l'étude d'Hubal et al. (2007), dans laquelle les participants devaient réaliser un exercice

composé de 50 contractions excentriques maximales des fléchisseurs du coude. Dans cette étude, certains sujets présentaient une baisse de force isométrique de plus de 50% immédiatement après exercice, alors que d'autres sujets présentaient une baisse de force inférieure à 20%. Dans cette thèse, pour évaluer la variabilité intra-individuelle, la performance réalisée lors du premier passage était comparée à celle lors du deuxième passage. Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette variabilité. Premièrement, lors d'un exercice unilatéral, il peut y avoir un effet croisé des adaptations musculaires sur le membre au repos (Starbuck et Eston, 2012). La réalisation d'un exercice sur une jambe entraîne un effet protecteur sur la jambe opposée (Starbuck et Eston, 2012). Deuxièmement, comme le montre le tableau 10, l'ordre de passage de la jambe sollicitée peut influencer le niveau de fatigue. Pour la force isométrique et pour la détente en CMJ-2J, le fait de réaliser l'exercice avec la jambe dominante entraîne un niveau de fatigue moins élevé immédiatement après exercice. Dans le cadre des études de la présente thèse, l'ordre de passage était randomisé et équilibré pour la jambe et la condition, et ce afin d'éviter une influence de ces facteurs sur les cinétiques de récupération.

Les résultats de la première étude ont montré qu'en comparaison avec une exposition à de la cryothérapie corps entier, un effet modéré très probable en faveur du bain froid pour accélérer la récupération de la détente lors d'un test de CMJ-1J et CMJ-2J 72h après exercice. Un effet modéré probable en faveur du bain froid était également observé pour un niveau de douleur plus faible 48h après exercice et une meilleure perception de la récupération 24h après exercice. Un effet large très probable et un effet modéré très probable en faveur du bain froid étaient observés pour de plus basses [CK] respectivement 24h et 72h après exercice. Pour la force excentrique et la force isométrique l'effet était incertain au cours des 72h de récupération.

Les résultats de la deuxième étude ont montré que la mise en place d'une séance de musculation le lendemain d'un exercice n'était ni bénéfique ni délétère pour la récupération de la performance. Aucune différence n'a été trouvée entre la condition contrôle et la condition expérimentale pour les différentes variables. La séance de musculation n'a pas ralenti les cinétiques de récupération.

Les résultats de la troisième étude ont montré une probabilité plus élevée de diminuer les douleurs musculaires 48h et 72h après exercice, dans la condition placebo. De plus, les sujets ont présenté une meilleure perception de la récupération dans cette condition avec un effet

modéré très probable. Un petit effet très probable était également observé dans la condition placebo, en comparaison avec une récupération passive, pour accélérer la récupération de la performance sur CMJ-2J 72h après l'exercice. Pour la force excentrique, la force isométrique et les concentrations en créatine kinase, l'effet de la condition était incertain.

#### *Comparaison des effets du bain froid et de la cryothérapie corps entier (étude 1)*

En comparant les deux stratégies, les résultats montrent qu'il était très probable que le bain froid accélère les cinétiques de récupération de la performance en CMJ-1J et CMJ-2J 72h après exercice. La récupération de la puissance musculaire évaluée lors d'un test de détente était plus rapide après un bain froid qu'après une exposition à de la cryothérapie corps entier. L'effet plus large du bain froid sur les cinétiques de récupération peut être en partie expliqué par le transfert de chaleur (Q). L'eau (0,58 W/(m-K)) a un coefficient de transfert de chaleur (k) 24,2 fois plus élevé que l'air (0,024 W/(m-K)). Cela signifie que l'eau est plus efficace pour transférer la chaleur du corps que l'air (Bleakley et al., 2014). De plus, contrairement à l'air, l'eau exerce une pression hydrostatique sur le corps (Wilcock et al., 2006). De précédents travaux ont montré que l'immersion en bain froid et l'immersion en bain chaud étaient efficaces pour améliorer la récupération de la force musculaire en comparaison avec une récupération passive, mais l'immersion en bain froid est plus efficace que l'immersion en bain chaud (Vaile et al., 2008). Ces données indiquent que la combinaison du froid et de la pression hydrostatique peut agir pour améliorer les cinétiques de récupération de la performance. Il peut être émis comme hypothèse que les cinétiques de récupération plus rapides suite à l'immersion en bain froid soient liées en partie avec la capacité de l'eau à transférer la chaleur combinée à la pression hydrostatique. Etant donné que les cinétiques de récupération de la force musculaire n'étaient pas différentes entre les deux conditions, on peut supposer que le bain froid a agi sur la composante vitesse de manière plus importante que la cryothérapie corps entier puisque la puissance développée est le produit de la force par la vitesse.

La cryothérapie corps entier et l'immersion en bain froid sont tous deux efficaces pour diminuer les douleurs musculaires au cours des 72h qui suivent un exercice (Bleakley et al., 2012, Costello et al., 2015). Les résultats suggèrent que le bain froid était plus efficace pour diminuer les douleurs musculaires 48h après exercice et que la perception de la récupération était meilleure 24h après exercice. Ces résultats confirment ceux de Bleakley et al. (2012) dans une méta-analyse qui ont trouvé une perception de la fatigue plus faible chez des sujets

ayant réalisé un bain froid en comparaison avec une récupération passive. Pour ce qui est des mécanismes potentiels, Algafly et George (2007) ont montré que le seuil ainsi que la tolérance à la douleur étaient augmentés et la vitesse de conduction nerveuse du nerf tibial était ralentie suite à une application directe de glace sur la cheville. L'application d'une pression avec des vêtements de compression sur les muscles est une méthode permettant de réduire les douleurs musculaires (Hill et al., 2014). Du fait de la capacité de l'eau froide à diminuer la température cutanée pendant une période plus longue que l'air (Costello et al., 2012) et du fait de la pression qu'elle exerce sur le corps, il peut être émis comme hypothèse que cette baisse de température plus longue en combinaison avec la pression hydrostatique de l'eau aurait augmenté la tolérance à la douleur.

Comme observé dans d'autres études (Hauswirth et al., 2011), les [CK] étaient augmentées après l'exercice inducteur de dommages musculaires. Un effet large du temps était observé 24h et 72h après exercice et un effet modéré du temps était observé 48h après exercice dans la condition bain froid. Des effets très large et large étaient observés respectivement 24h, 48h et 72h post-exercice dans la condition cryothérapie corps entier. Pour ce qui est de l'effet de la condition, un effet large très probable et un effet modéré probable respectivement 24h et 72h après exercice en faveur du bain froid suggèrent une meilleure efficacité du bain froid en comparaison avec la cryothérapie corps entier.

Cette étude présente certaines limites. Premièrement, l'échantillon était trop petit pour certaines variables mesurées. Un test de puissance statistique a été réalisé, de manière rétrospective, pour les variables suivantes : force excentrique (puissance = 1), force isométrique (puissance = 1), CMJ-1J (puissance = 0,18) et CMJ-2J (puissance = 0,35). Deuxièmement, du fait du design de l'étude, avec le fait que les sujets ont réalisé l'exercice sur une jambe, il n'était pas possible de mettre en place une condition contrôle. Le fait d'avoir une condition contrôle aurait permis d'analyser l'efficacité de chaque stratégie de récupération en comparaison avec une récupération passive. Troisièmement, les températures musculaire et cutanée n'ont pas été mesurées dans cette étude et auraient pu fournir des informations utiles sur les échanges de chaleurs occasionnés par les stratégies de récupération. Selon une étude Costello et al. (2012b), dans laquelle les auteurs ont comparé l'effet d'un bain froid et de la cryothérapie corps entier sur la baisse de température cutanée de la cuisse et la température musculaire du vaste latéral, une baisse de 2°C de la température musculaire peut être observée 60 minutes après exposition aux deux stratégies. Dans la condition bain froid, une baisse de 9°C de la température cutanée peut être observée immédiatement après

exposition et une baisse de 5°C peut être observée 60 minutes après exposition. Dans la condition cryothérapie corps entier une baisse de 12°C peut être observée immédiatement après exposition et une baisse de 4°C peut être observée 60 minutes après exposition. L'IC pour la force était très large et chevauchait tous les niveaux d'amplitude (délétère, bénéfique, trivial), caractéristique d'un résultat incertain (Batterham et Hopkins, 2006).

### *Effets d'une séance de musculation sur les cinétiques de récupération*

Les résultats de la deuxième étude ont montré un effet modéré en faveur de la musculation sur la force concentrique à 60°.s<sup>-1</sup>, 48h après exercice. Un effet trivial à petit a été observé sur la force concentrique à 120°.s<sup>-1</sup>, la force excentrique à 120°.s<sup>-1</sup> et la force isométrique à 60°. Les résultats obtenus montrent également que la force concentrique à 60°.s<sup>-1</sup> retourne aux valeurs de référence 20h et 24h après l'exercice inducteur de dommages musculaires dans les deux conditions (musculation et passive) mais 48h après l'exercice inducteur de dommages musculaires, la force concentrique à 60°.s<sup>-1</sup> diminue uniquement dans la condition récupération passive. Certaines études ont montré que, suite à un exercice n'utilisant qu'un seul membre, des adaptations croisées ont lieu (Starbuck et Eston, 2012). La récupération du membre controlatéral est plus rapide suite à un exercice sur un seul membre. Dans ce contexte, et pour éviter les effets de ces adaptations dans la présente étude, la moitié des sujets ont réalisé la musculation en premier et la récupération passive en second et vice versa. Ainsi, les résultats obtenus ne peuvent être expliqués par l'influence de ces adaptations. Ces résultats peuvent être expliqués par l'augmentation des concentrations hormonales induites par la séance de musculation (Kraemer et al., 1990 ; Simão et al., 2012). Le processus naturel de régénération musculaire commence immédiatement après un exercice excentrique et est caractérisé par la prolifération et l'activation de cellules satellites (Hawke et Garry, 2001 ; Chargé et Rudnicki, 2004). L'hormone de croissance, l'IGF-1 et la testostérone sont impliquées dans ce processus en stimulant la prolifération, l'activation et la fusion des cellules satellites avec les fibres musculaires endommagées (Hawke et Garry, 2001 ; Chargé et Rudnicki, 2004). Bien qu'il y ait un pic des concentrations hormonales immédiatement après un exercice excentrique, cette sécrétion hormonale est limitée dans le temps et les valeurs des concentrations hormonales reviennent à leur niveau de repos après quelques heures (Libardi et al., 2013). Il peut être suggéré que la réalisation d'une séance de musculation identique à celle réalisée dans cette étude le jour après un exercice excentrique maintienne le muscle dans un milieu anabolique qui accélère la vitesse de régénération musculaire et en conséquence les cinétiques de récupération. Les résultats de la présente étude montrent que la mise en place

d'une séance de musculation le lendemain de l'exercice a un effet modéré sur les cinétiques de récupération de la force concentrique à  $60^{\circ}.s^{-1}$  48h après exercice. La séance de musculation n'avait pas d'effet néfaste sur la récupération des autres variables mesurées. Une des hypothèses qui peut expliquer ces résultats est que la sécrétion hormonale induite par la séance de musculation a donné lieu à un processus de régénération. Dans cette étude il n'était pas possible de confirmer cette hypothèse du fait de l'absence de mesures des concentrations sanguines en hormones.

Un effet modéré de la condition 48h après exercice a été observé uniquement pour la force concentrique à  $60^{\circ}.s^{-1}$ , mais pas pour la force isométrique, excentrique et concentrique à une vitesse élevée. Ces résultats peuvent être la conséquence de différences dans le mode de recrutement des fibres musculaires. Lors de la réalisation d'un exercice excentrique, les dommages musculaires générés sont plus élevés dans les fibres de type II (Friden et Lieber, 1992). De plus, Cermak et al. (2013) ont montré que, après un exercice des extenseurs du genou, la prolifération des cellules satellites était augmenté dans les fibres de type II mais pas dans les fibres de type I ce qui laisse penser que les fibres de type I étaient moins endommagées que les fibres de type II. Les résultats de cette étude convergent avec ceux de Friden et al. (1983) qui ont trouvé une récupération de la force plus rapide pour des vitesses lentes en comparaison avec des vitesses élevées ou avec la force isométrique. Le fait que la force concentrique à  $60^{\circ}.s^{-1}$  ait été la force la plus lente peut expliquer pourquoi le retour aux valeurs de référence était observé dans les deux conditions 20h et 24h post exercice.

Le saut en contremouvement et le test sur tapis roulant non-motorisé sont utilisés pour mesurer la puissance des membres inférieurs. Etant donné que les ischio-jambiers sont impliqués dans ce type de mouvement (Higashihara et al., 2010 ; Padulo et al., 2013) il a été posé comme hypothèse qu'un exercice excentrique des fléchisseurs du genou diminuerait la performance sur ce type de test. Un effet trivial à large en faveur d'une amélioration de la performance a montré que l'exercice inducteur de dommages musculaires n'était pas suffisant pour induire une baisse de puissance. Un effet modéré de la condition était observé en faveur de la condition contrôle 24h après l'exercice mettant en avant l'absence d'effet de la séance de musculation sur la récupération de ce paramètre.

En concordance avec d'autres études, le niveau de douleurs musculaires était augmenté en continu au cours du temps dans les deux conditions (Nosaka et al., 2002). En comparant les deux conditions (musculation et passive) un petit effet de la condition est observé à chaque

point. Les douleurs musculaires sont un marqueur indirect des dommages qui peut être absent suite à un exercice (Nosaka et al., 2002). L'amplitude de la baisse de la force musculaire est influencée par l'intensité de l'exercice, ce qui fait de ce critère un bon indicateur des dommages musculaires (Warren, 1999 ; Nosaka et al., 2002). Il est possible que les dommages musculaires persistent en absence de douleurs musculaires (Nosaka et al., 2002). La stratégie de récupération utilisée dans cette étude n'avait pas d'effet positif sur les douleurs musculaires.

Dans certaines études évaluant les dommages musculaires, les [CK] étaient augmentées après exercice (Eston et Peters, 1999) ce qui diffère des résultats obtenus dans cette étude. Du fait du haut niveau d'intensité à développer pendant l'exercice, une augmentation des [CK] était attendue mais aucun changement significatif des [CK] n'a été observé au cours du temps après l'exercice inducteur de dommages musculaires. Ces résultats peuvent être expliqués par la grande variabilité observée entre les sujets. Etant donné que les sujets participant à cette étude étaient familiarisés avec la réalisation de contractions excentriques sur les ischio-jambiers, il se peut que leurs [CK] étaient plus basses que celles de sujets non-entraînés et non familiarisés avec la réalisation de contractions excentriques sur les ischio-jambiers. Il a été montré que le niveau de [CK] était plus élevé chez les sujets non-entraînés en comparaison avec les sujets entraînés (Brancaccio et al., 2007). La circonférence de la cuisse représente l'œdème musculaire qui peut apparaître après un exercice inducteur de dommages musculaires. Dans cette étude, ni le temps, ni la condition, n'ont affecté ce paramètre. Ces résultats sont cohérents avec ceux d'autres études dans lesquelles l'effet du temps n'a pas été observé (Howatson et al., 2009). L'exercice inducteur de dommages musculaires utilisé dans cette étude n'était pas suffisant pour induire un œdème dans le muscle.

Ce protocole expérimental présente quelques limites. Premièrement, les concentrations hormonales sanguines avant et après la séance de musculation n'ont pas été mesurées. Avec cette mesure les mécanismes sous-tendant les résultats auraient pu être décrits. Les cinétiques de récupération étaient évaluées au cours des 48h qui ont suivi l'exercice, alors que d'autres études ont montré que certaines stratégies de récupération étaient efficaces 72h après exercice (Vaile et al., 2008). L'évaluation de la performance peut être plus pertinente après 72h ou plus pour avoir plus de possibilités d'observer un effet lorsque celui-ci existe. Les sujets de cette étude n'étaient pas familiarisés avec ce type de séance de musculation. Ils pratiquaient la musculation deux fois par semaine mais avec des charges différentes de celles utilisées dans cette étude. Les sujets entraînés en force sont capables de sécréter des plus haut niveau

d'hormones après une séance de musculation en comparaison avec des sujets qui ne sont pas habitués à ce type d'entraînement (Kraemer et Ratamess, 2005). Ces données indiquent que les sujets entraînés en force auraient secrété des niveaux plus élevés d'hormones et auraient pu récupérer plus vite que les sujets non entraînés en force. Bien que les résultats de cette étude montrent un effet modéré de la condition sur les cinétiques de récupération de la force concentrique à vitesse lente, l'IC inclut le 0. Les échantillons sanguins n'ont pas été répliqués deux ou trois fois pour calculer le coefficient de variation de la créatine kinase. Avec ces données il aurait été possible d'avoir une information précise de la variabilité pour ce groupe de sujets. L'IC pour de nombreuses variables évaluées était très large et chevauchait tous les niveaux d'amplitude (délétère, bénéfique, trivial), ce qui caractérise un résultat incertain du fait d'un petit effectif (Page, 2014). De plus le niveau de puissance statistique pour l'effet de la condition pour la force concentrique à  $60^{\circ}.s^{-1}$  (puissance = 0,58), la force concentrique à  $120^{\circ}.s^{-1}$  (puissance = 0,03), la force excentrique à  $120^{\circ}.s^{-1}$  (puissance = 0,06) et la force isométrique à  $60^{\circ}$  (puissance = 0,24) était faible ce qui indique que l'échantillon était trop faible.

#### *Effets d'un placebo sur les cinétiques de récupération*

Historiquement, les effets du placebo ont été observés d'abord chez des patients pour l'effet analgésique et pour améliorer leur confort (De Craen et al., 1999). La présente étude est la première à avoir analysé les effets d'un placebo sur les cinétiques de récupération en comparaison avec une récupération passive. Elle est également la première à montrer que les douleurs musculaires et la perception de la récupération sont deux variables subjectives influencées par l'effet placebo. Le niveau de douleurs musculaires était possiblement et très probablement plus faible avec un petit effet de taille dans la condition placebo, respectivement 48h et 72h après l'exercice. Le placebo avait également un effet bénéfique sur la perception de la récupération. Entre 48h et 72h après exercice, la récupération était mieux perçue dans la condition placebo, ce qui concorde avec d'autres études (Broatch et al., 2014). Ces résultats confirment que les croyances relatives aux pilules consommées influencent le processus de récupération (Price et al., 2008).

La comparaison des deux conditions a montré une probabilité plus grande d'accélérer la récupération de la détente lors CMJ-2J, 72h après l'exercice, dans la condition placebo. Dans cette étude, le placebo était présenté comme un supplément constitué d'ingrédients pouvant limiter la dégradation musculaire et stimuler la régénération musculaire. Ces explications



données par l'investigateur et le médecin de l'étude pourraient avoir créé un conditionnement chez les participants (Koshi and Short, 2007; Pozgain et al., 2014).

Pour la première fois, cette étude a évalué les effets d'un placebo sur la puissance musculaire après un exercice inducteur de dommages musculaires en comparaison avec une récupération passive. L'effet bénéfique du placebo sur la performance lors d'un CMJ-2J était petit. Cependant, les bénéfices de certaines stratégies de récupération traditionnelles, comme le bain froid, sont également petits (Poppendieck et al., 2013). Dans une méta-analyse, Poppendieck et al. (2013) ont montré que l'amélioration moyenne de la performance en utilisant le bain froid était de 3% pour la performance en saut, avec une petite taille d'effet. Dans la présente étude, la différence de performance en CMJ-2J entre la condition placebo et la récupération passive était de 5,1%, ce qui est plus élevé que le plus petit effet détectable. D'après ces résultats, cette amélioration peut être suffisante dans le cadre d'une pratique sportive, puisque le plus petit effet détectable pour ce type d'effort dans cette étude était de 3,7%. Cela indique que, suite à la consommation du placebo, les sujets étaient capables d'améliorer leur performance à un niveau plus élevé que ce qui est nécessaire pour avoir un effet pratique.

Comme dans l'étude 2, le seul paramètre fonctionnel affecté par la stratégie de récupération était la performance en saut. Cette concordance entre les résultats semble indiquer que le saut serait un marqueur plus sensible pour détecter l'influence d'une stratégie de récupération. L'évaluation de la force pourrait être plus stable et moins sensible aux effets des stratégies de récupération.

Les mesures des concentrations en créatine kinase n'ont montré aucune différence entre les conditions. Cela peut être dû à la variabilité élevée de ce marqueur (Brancaccio et al., 2007) comme l'indiquent les coefficients interindividuels de 9,3%, 15,5%, et 23,3% pris respectivement à 24h, 48h et 72h.

### **3. CONCLUSION GENERALE**

Les études réalisées au cours de cette thèse ont montré les intérêts et les limites de l'utilisation de certaines stratégies de récupération. Les résultats de la première étude montrent que le bain froid est plus efficace que la cryothérapie corps entier pour accélérer les cinétiques de récupération pour la détente sur une jambe et sur deux jambes 72h après exercice. Bien qu'il n'y ait pas eu de différence pour la récupération de la force entre les deux stratégies, le bain froid a permis de diminuer les douleurs musculaires et d'améliorer la perception de la récupération au cours des 24-48h qui suivaient l'exercice.

La deuxième étude a montré que la réalisation d'une séance de musculation, après un exercice inducteur de dommages musculaires, peut influencer la performance de la force concentrique à  $60^{\circ} \cdot s^{-1}$  48h après exercice. Bien qu'il n'y avait pas d'effet bénéfique additionnel sur la force concentrique à vitesse élevée, la force excentrique et la force isométrique, l'addition d'une séance de musculation du haut du corps le lendemain d'un exercice inducteur de dommages musculaires n'affecte pas négativement les cinétiques de récupération.

La troisième étude a mis en évidence que l'effet placebo est un mécanisme impliqué dans la récupération suite à un exercice inducteur de dommages musculaires. Les résultats confirment que le placebo peut influencer les douleurs, la perception de la récupération et la récupération de la performance des mouvements impliquant la puissance musculaire comme les sauts. Bien que cet effet soit petit, celui-ci est suffisant pour être supérieur au plus petit effet détectable dans cette population et, par conséquent, être bénéfique à la récupération. De plus, le placebo implémenté dans cette étude avait un effet bénéfique sur les marqueurs subjectifs, ce qui indique la capacité du placebo à influencer les facteurs perceptifs de la récupération.

Les résultats obtenus dans cette thèse permettent d'envisager de nouveaux travaux de recherche dans le domaine de la récupération. D'autres techniques utilisant le froid peuvent être utilisées pour la récupération comme la consommation de glace pilée après un exercice. Cette stratégie permet de diminuer la température centrale (Siegel et al., 2010) et est utilisée

afin d'améliorer la performance lors de compétitions en environnement chaud (Racinais et al., 2015), mais aucune étude ne s'est intéressée aux effets sur la récupération.

L'entraînement par occlusion est une technique d'entraînement en musculation dont le principe est d'utiliser des charges légères avec un garrot limitant le flux sanguin vers les muscles (Loenneke et al., 2012). La réalisation de ce type d'exercices entraîne une augmentation des concentrations sanguines en hormone de croissance (Takarada et al., 2000) et pourrait ainsi influencer le processus de cicatrisation musculaire après un exercice. A ce jour, aucune étude n'a analysé les effets d'une telle séance sur les cinétiques de récupération.

Concernant l'effet placebo, les résultats de l'étude 3 ont mis en évidence l'implication de facteurs psychologiques sur la récupération. D'autres études sont nécessaires pour comprendre de manière plus précise les mécanismes psychologiques sous-jacents. Il peut également être envisagé d'étudier les effets d'un placebo sur les mécanismes centraux et périphériques de la fatigue.

## **4. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

1. Ahtiainen JP, Häkkinen K. Strength athletes are capable to produce greater muscle activation and neural fatigue during high-intensity resistance exercise than nonathletes. *J Strength Cond Res.* 2009;23(4):1129-34.
2. Algafly AA, George KP. The effect of cryotherapy on nerve conduction velocity, pain threshold and pain tolerance. *Br J Sports Med.* 2007;41(6):365-9.
3. Altman DG, Bland JM. Standard deviations and standard errors. *BMJ.* 2005 15;331(7521):903.
4. Andersson, H, Raastad, T, Nilsson, J, Paulsen, G, Garthe, I, and Kadi, F. Neuromuscular Fatigue and Recovery in Elite Female Soccer: Effects of Active Recovery. *Med Sci Sports Exerc* 2008, 40, No. 2: 372–380.
5. Andrzejewski M, Chmura J, Pluta B, Strzelczyk R, Kasprzak A. Analysis of sprinting activities of professional soccer players. *J Strength Cond Res.* 2013;27(8):2134-40.
6. Ardern CL, Taylor NF, Feller JA, Whitehead TS, Webster KE. Psychological responses matter in returning to preinjury level of sport after anterior cruciate ligament reconstruction surgery. *Am J Sports Med.* 2013;41(7):1549-58.
7. Ardern CL. Anterior Cruciate Ligament Reconstruction-Not Exactly a One-Way Ticket Back to the Preinjury Level: A Review of Contextual Factors Affecting Return to Sport After Surgery. *Sports Health.* 2015;7(3):224-30.
8. Armstrong RB, Warren GL, Warren JA. Mechanisms of exercise-induced muscle fibre injury. *Sports Med.* 1991;12(3):184-207.
9. Ascensão A, Rebelo A, Oliveira E, Marques F, Pereira L, Magalhães J. Biochemical impact of a soccer match - analysis of oxidative stress and muscle damage markers throughout recovery. *Clin Biochem.* 2008;41(10-11):841-51.

10. Ascensão A, Leite M, Rebelo AN, Magalhães S, Magalhães 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): 217-225.
11. Asp S, Dugaard JR, Kristiansen S, Kiens B, Richter EA. Exercise metabolism in human skeletal muscle exposed to prior eccentric exercise. *J Physiol*. 1998;15;509:305-13.
12. Atkinson G and Nevill M. Statistical Methods For Assessing Measurement Error (Reliability) in Variables Relevant to Sports Medicine. *Sports Med*. 1998;26 (4): 217-238.
13. Bahnert A, Norton K, Lock P. Association between post-game recovery protocols, physical and perceived recovery, and performance in elite Australian Football League players. *J Sci Med Sport*. 2013;16(2):151-6.
14. Bailey DM, Erith SJ, Griffin PJ, Dowson A, Brewer DS, Gant N, Williams C. Influence of cold-water immersion on indices of muscle damage following prolonged intermittent shuttle running. *J Sports Sci*. 2007;25(11):1163-70.
15. Banfi G, Lombardi G, Colombini A and Melegati G. Whole-body cryotherapy in athletes. *Sports Med*. 2010;40(6):509-517.
16. Bangsbo J, Mohr M, Krstrup P. Physical and metabolic demands of training and match-play in the elite football player. *J Sports Sci*. 2006;24(7):665-74.
17. Bassett DR Jr, Howley ET. Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Med Sci Sports Exerc*. 2000;32(1):70-84.
18. Batterham AM, Hopkins WG. Making meaningful inferences about magnitudes. *Int J Sports Physiol Perform*. 2006;1(1):50-7.
19. Beedie CJ, Foad AJ. The placebo effect in sports performance: a brief review. *Sports Med*. 2009;39(4):313-29.

20. Benedetti F, Carlino E, Pollo A. How placebos change the patient's brain. *Neuropsychopharmacology*. 2011;36(1):339-54.
21. Benedetti F, Dogue S. Different Placebos, Different Mechanisms, Different Outcomes: Lessons for Clinical Trials. *PLoS One*. 2015;10(11):e0140967.
22. Biau DJ. In brief: Standard deviation and standard error. *Clin Orthop Relat Res*. 2011 ;469(9):2661-4.
23. Bigland-Ritchie B, Johansson R, Lippold OC, Smith S, Woods JJ. Changes in motoneurone firing rates during sustained maximal voluntary contractions. *J Physiol*. 1983;340:335-46.
24. Bishop PA, Jones E, Woods AK. Recovery from training: a brief review: brief review. *J Strength Cond Res*. 2008;22(3):1015-24.
25. Black GM, Gabbett TJ, Naughton GA, McLean BD. The effect of intense exercise periods on physical and technical performance during elite Australian Football match-play: A comparison of experienced and less experienced players. *J Sci Med Sport*. 2016;19(7):596-602.
26. Blanch P, Gabbett TJ. Has the athlete trained enough to return to play safely? The acute chronic workload ratio permits clinicians to quantify a player's risk of subsequent injury. *Br J Sports Med*. 2016;50(8):471-5.
27. 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;15;2:CD008262.
28. Bleakley CM, Bieuzen F, Davison GW, Costello JT. Whole-body cryotherapy: empirical evidence and theoretical perspectives. *Open Access J Sports Med*. 2014;10;5:25-36.
29. Bloomfield J, Polman R, O'Donoghue P. Physical Demands of Different Positions in FA Premier League Soccer. *J Sports Sci Med*. 2007;1;6(1):63-70.



30. Bond P. Regulation of mTORC1 by growth factors, energy status, amino acids and mechanical stimuli at a glance. *J Int Soc Sports Nutr.* 2016;13:8.
31. Borg G. Perceived exertion as an indicator of somatic stress. *Scand J Rehabil Med.* 1970; 2(2):92-8.
32. Bradley PS, Sheldon W, Wooster B, Olsen P, Boanas P and Krstrup P. High-intensity running in English FA Premier League soccer matches. *J Sports Sci.* 2009;27;2:159-68.
33. Brancaccio P, Maffulli N, Limongelli FM. Creatine kinase monitoring in sport medicine. *Br Med Bull.* 2007;81-82:209-30.
34. Brewer C, Dawson B, Heasman J, Stewart G, Cormack S. Movement pattern comparisons in elite (AFL) and sub-elite (WAFL) Australian football games using GPS. *J Sci Med Sport.* 2010;13(6):618-23.
35. Brisswalter J, Nosaka K. Neuromuscular factors associated with decline in long-distance running performance in master athletes. *Sports Med.* 2013;43(1):51-63.
36. 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.
37. Brodsky IG, Balagopal P, Sreekumaran Nair K. Effects of testosterone replacement on muscle mass and muscle protein synthesis in hypogonadal men – a clinical research center study. *J Clin Endocrinol Metab* 1996;81:3469-75.
38. Brondino N, Lanati N, Giudici S, Arpesella M, Roncarolo F, and Vandoni M. Testosterone level and its relationship with outcome of sporting activity. *Journal of Men's Health.* 2013;10(2): 40-47.
39. Bruton A, Conway JH, Holgate ST. Reliability: What is it and how is it measured? *Physiotherapy,* 2000;86,2:94-9.

40. Buchheit M, Allen A, Poon TK, Modonutti M, Gregson W, Di Salvo V. Integrating different tracking systems in football: multiple camera semi-automatic system, local position measurement and GPS technologies. *J Sports Sci.* 2014;32(20):1844-57.
41. Buford TW, MacNeil RG, Clough LG, Dirain M, Sandesara B, Pahor M, Manini TM, Leeuwenburgh C. Active muscle regeneration following eccentric contraction-induced injury is similar between healthy young and older adults. *J Appl Physiol (1985).* 2014;116(11):1481-90.
42. Burd NA, Gorissen SH, van Loon LJ. Anabolic resistance of muscle protein synthesis with aging. *Exerc Sport Sci Rev.* 2013;41(3):169-73.
43. Byrne C, Twist C, Eston R. Neuromuscular function after exercise-induced muscle damage: theoretical and applied implications. *Sports Med.* 2004;34(1):49-69.
44. Cannon JG, Meydani SN, Fielding RA, Fiatarone MA, Meydani M, Farhangmehr M, Orencole SF, Blumberg JB, Evans WJ. Acute phase response in exercise. II. Associations between vitamin E, cytokines, and muscle proteolysis. *Am J Physiol.* 1991;260(6 Pt 2):R1235-40.
45. Cannon JG, Fiatarone MA, Fielding RA, Evans WJ. Aging and stress-induced changes in complement activation and neutrophil mobilization. *J Appl Physiol (1985).* 1994;76(6):2616-20.
46. Cannon JG, St Pierre BA. Cytokines in exertion-induced skeletal muscle injury. *Mol Cell Biochem.* 1998;179(1-2):159-67.
47. Carling C, Bloomfield J, Nelsen L, Reilly T. The role of motion analysis in elite soccer: contemporary performance measurement techniques and work rate data. *Sports Med.* 2008;38(10):839-62.
48. Carling, C. Interpreting physical performance in professional soccer match-play: should we be more pragmatic in our approach? *Sports Med.* 2013;43(8):655-63.

49. Castellano J, Blanco-Villaseñor A, Alvarez D. Contextual variables and time-motion analysis in soccer. *Int J Sports Med.* 2011;32(6):415-21
50. Cermak NM, Snijders T, McKay BR, Parise G, Verdijk LB, Tarnopolsky MA, Gibala MJ and Van Loon LJC. Eccentric Exercise Increases Satellite Cell Content in Type II Muscle Fibers. *Med Sci Sports Exerc.* 2013;45(2):230-37.
51. Chakravarthy MV, Davis BS, Booth FW. IGF-1 restores satellite cell proliferative potential in immobilized old skeletal muscle. *J Appl Physiol.* 2000;89:1365-79.
52. Chargé SBP, and Rudnicki MA. Cellular and molecular regulation of muscle regeneration. *Physiol Rev.* 2004;84:209-38.
53. Chen TC, Nosaka K, Sacco P. Intensity of eccentric exercise, shift of optimum angle, and the magnitude of repeated-bout effect. *J Appl Physiol (1985).* 2007;102(3):992-9.
54. Child R, Brown S, Day S, Donnelly A, Roper H, Saxton J. Changes in indices of antioxidant status, lipid peroxidation and inflammation in human skeletal muscle after eccentric muscle actions. *Clin Sci (Lond).* 1999;96(1):105-15.
55. Clarkson PM, Nosaka K, Braun B. Muscle function after exercise-induced muscle damage and rapid adaptation. *Med Sci Sports Exerc.* 1992;24(5):512-20.
56. Clarkson PM, Hubal MJ. Exercise-induced muscle damage in humans. *Am J Phys Med Rehabil.* 2002;81(11 Suppl):S52-69.
57. Costello JT, Algar LA, Donnelly AE. Effects of whole-body cryotherapy (-110 °C) on proprioception and indices of muscle damage. *Scand J Med Sci Sports.* 2012;22(2):190-8.
58. Costello JT, Culligan K, Selfe J, Donnelly AE. Muscle, skin and core temperature after -110°C cold air and 8°C water treatment. *PLoS One.* 2012b;7(11):e48190.

59. 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;18;9:CD010789.
60. Costill DL, Pascoe DD, Fink WJ, Robergs RA, Barr SI, Pearson D. Impaired muscle glycogen resynthesis after eccentric exercise. *J Appl Physiol (1985).* 1990;69(1):46-50.
61. Courneya KS, Carron AV. The home advantage in sport competitions: a literature review. *J Sport Exerc Psychol.* 1992;14:13-27
62. Cramer RM, Aagaard P, Qvortrup K, Langberg H, Olesen J, Kjaer M. Myofibre damage in human skeletal muscle: effects of electrical stimulation versus voluntary contraction. *J Physiol.* 2007;15;583(Pt 1):365-80.
63. Crewther BT, Cook CJ. Effects of different post-match recovery interventions on subsequent athlete hormonal state and game performance. *Physiol Behav.* 2012;106(4):471-5.
64. Damas F, Phillips S, Vechin FC, Ugrinowitsch C. A review of resistance training-induced changes in skeletal muscle protein synthesis and their contribution to hypertrophy. *Sports Med.* 2015;45(6):801-7.
65. de Craen AJ, Roos PJ, Leonard de Vries A, Kleijnen J. Effect of colour of drugs: systematic review of perceived effect of drugs and of their effectiveness. *BMJ.* 1996;21-28;313(7072):1624-6.
66. de Craen AJ, Kaptchuk TJ, Tijssen JG, Kleijnen J. Placebos and placebo effects in medicine: historical overview. *J R Soc Med.* 1999; 92(10):511-5.
67. de Craen AJ, Tijssen JG, de Gans J, Kleijnen J. Placebo effect in the acute treatment of migraine: subcutaneous placebos are better than oral placebos. *J Neurol.* 2000;247(3):183-8.

68. Delextrat A, Baker J, Cohen DD, Clarke ND. Effect of a simulated soccer match on the functional hamstrings-to-quadriceps ratio in amateur female players. *Scand J Med Sci Sports*. 2013;23(4):478-86.
69. Di Salvo V, Baron R, Tschan H, Calderon Montero FJ, Bachl N, Pigozzi F. Performance characteristics according to playing position in elite soccer. *Int J Sports Med*. 2007;28(3):222-7.
70. Doering TM, Reaburn PR, Phillips SM, Jenkins DG. Postexercise Dietary Protein Strategies to Maximize Skeletal Muscle Repair and Remodeling in Masters Endurance Athletes: A Review. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*. 2016;26(2):168-78.
71. Draganidis D, Chatzinikolaou A, Avloniti A, Barbero-Álvarez JC, Mohr M, Malliou P,ourgoulis V, Deli CK, Douroudos II, Margonis K, Gioftsidou A, Flouris AD, Jamurtas AZ, Koutedakis Y, Fatouros IG. Recovery kinetics of knee flexor and extensor strength after a football match. *PLoS One*. 2015; 4;10(6):e0128072.
72. Drust B, Atkinson G, Reilly T. Future perspectives in the evaluation of the physiological demands of soccer. *Sports Med*. 2007;37(9):783-805.
73. Dupont G, Millet GP, Guinhouya C, Berthoin S. Relationship between oxygen uptake kinetics and performance in repeated running sprints. *Eur J Appl Physiol*. 2005;95(1):27-34.
74. Dupont G, Nedelec M, McCall A, McCormack D, Berthoin S, Wisløff U. Effect of 2 soccer matches in a week on physical performance and injury rate. *Am J Sports Med*. 2010; 38:1752-58.
75. Easthope CS, Hausswirth C, Louis J, Lepers R, Vercruyssen F, Brisswalter J. Effects of a trail running competition on muscular performance and efficiency in well-trained young and master athletes. *Eur J Appl Physiol*. 2010;110(6):1107-16.

76. Edwards, RTH. Biochemical bases of fatigue in exercise performance: catastrophe theory of muscular fatigue. *Biochemistry of exercise* VHG Knuttgen, JA Vogel and JR Poortmans. Champaign, Human Kinetics Publ. 1983:3-28.
77. Ekstrand J, Waldén M, Hägglund M. A congested football calendar and the wellbeing of players: correlation between match exposure of European footballers before the World Cup 2002 and their injuries and performances during that World Cup. *Br J Sports Med.* 2004 38:493-7.
78. Endoh T, Nakajima T, Sakamoto M, Komiyama T. Effects of muscle damage induced by eccentric exercise on muscle fatigue. *Med Sci Sports Exerc.* 2005;37(7):1151-6.
79. Eston R and Peters D. Effects of cold water immersion on the symptoms of exercise-induced muscle damage. *J Sports Sci.* 1999;17(3):231-8.
80. Fatouros IG, Chatzinikolaou A, Douroudos II, Nikolaidis MG, Kyparos A, Margonis K, Michailidis Y, Vantarakis A, Taxildaris K, Katrabasas I, Mandalidis D, Kouretas D, Jamurtas AZ. Time-course of changes in oxidative stress and antioxidant status responses following a soccer game. *J Strength Cond Res.* 2010;24(12):3278-86.
81. Fell J, Williams D. The effect of aging on skeletal-muscle recovery from exercise: possible implications for aging athletes. *J Aging Phys Act.* 2008;16(1):97-115.
82. Ferreira-Junior JB, Bottaro M, Vieira A, Siqueira AF, Vieira CA, Durigan JL, Cadore EL, Coelho LG, Simões HG, Bembem MG. One session of partial-body cryotherapy (-110 °C) improves muscle damage recovery. *Scand J Med Sci Sports.* 2015;25(5):e524-30.
83. Fonda B, Sarabon N. Effects of whole-body cryotherapy on recovery after hamstring damaging exercise: a crossover study. *Scand J Med Sci Sports.* 2013;23(5):e270-8.
84. Fortington LV, Berry J, Buttifant D, Ullah S, Diamantopoulou K, Finch CF. Shorter time to first injury in first year professional football players: A cross-club comparison in the Australian Football League. *J Sci Med Sport.* 2016;19(1):18-23.

85. Foster C, Florhaug JA, Franklin J, Gottschall L, Hrovatin LA, Parker S, Doleshal P, and Dodge C. A new approach to monitoring exercise training. *J Strength Cond Res.* 2001;15(1): 109-15.
86. Fowler P, Duffield R, Vaile J. Effects of simulated domestic and international air travel on sleep, performance, and recovery for team sports. *Scand J Med Sci Sports.* 2015;25(3):441-51.
87. Fridén J, Sjöström M, Ekblom B. Myofibrillar damage following intense eccentric exercise in man. *Int J Sports Med.* 1983;4(3):170-6.
88. Fridén, J and Lieber, RL. Structural and mechanical basis of exercise-induced muscle injury. *Med Sci Sports Exerc.* 1992;24(5): 521-30.
89. Fröhlich M, Faude O, Klein M, Pieter A, Emrich E, Meyer T. Strength training adaptations after cold-water immersion. *J Strength Cond Res.* 2014;28(9):2628-33.
90. Fullagar HH, Duffield R, Skorski S, Coutts AJ, Julian R, Meyer T. Sleep and Recovery in Team Sport: Current Sleep-Related Issues Facing Professional Team-Sport Athletes. *Int J Sports Physiol Perform.* 2015;10(8):950-7.
91. Gabbett TJ. The training-injury prevention paradox: should athletes be training smarter and harder? *Br J Sports Med.* 2016;50(5):273-80.
92. Gandevia SC. Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiol Rev.* 2001;81(4):1725-89.
93. Gregson W, Drust B, Atkinson G, Salvo VD. Match-to-match variability of high-speed activities in premier league soccer. *Int J Sports Med.* 2010;31(4):237-42.
94. Gulbin JP, Gaffney PT. Identical twins are discordant for markers of eccentric exercise-induced muscle damage. *Int J Sports Med.* 2002;23(7):471-6.

95. Hall JL, Mazzeo RS, Podolin DA, Cartee GD, Stanley WC. Exercise training does not compensate for age-related decrease in myocardial GLUT-4 content. *J Appl Physiol* (1985). 1994;76(1):328-32.
96. Hampson DB, St Clair Gibson A, Lambert MI, Noakes TD. The influence of sensory cues on the perception of exertion during exercise and central regulation of exercise performance. *Sports Med*. 2001;31(13):935-52.
97. Harper LD, Hunter R, Parker P, Goodall S, Thomas K, Howatson G, West DJ, Stevenson E, Russell M. Test-retest reliability of physiological and performance responses to 120 minutes of simulated soccer match-play. *J Strength Cond Res*. 2016 Mar 3. [Epub ahead of print].
98. Hausswirth C, Louis J, Bieuzen F, Pournot H, Fournier J, 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.
99. Hawke, TJ, and Garry, DJ. Myogenic satellite cells: physiology to molecular biology. *J Appl Physiol*. 2001;91:534-51.
100. Higashihara, A, Ono, T, Kubota, J, Okuwaki, T and Fukubayashi, T. Functional differences in the activity of the hamstring muscles with increasing running speed, *J Sports Sci*. 2010;28(10):1085-92.
101. Hill J, Howatson G, van Someren K, Leeder J, Pedlar C. Compression garments and recovery from exercise-induced muscle damage: a meta-analysis. *Br J Sports Med*. 2014;48(18):1340-6.
102. Hooper SL, Mackinnon LT. Monitoring overtraining in athletes. Recommendations. *Sports Med*. 1995;20(5):321-7.
103. Hopkins WG. A scale of magnitudes for effect statistics. In: *A New view of Statistics*, 2002a. Available at <http://www.sportsci.org/resource/stats/effectmag.html>. Accessed 15 April, 2015.



104. Hopkins, WG. Precision of measurement. In: A New view of Statistics, 2002b. Available at <http://www.sportsci.org/resource/stats/precision.html>. Accessed 15 April, 2015.
105. Hopkins WG, Marshall SW, Batterham AM, Hanin J. Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Med Sci Sports Exerc.* 2009;41(1):3-13.
106. Hørder M, Jørgensen PJ, Hafkenschied JC, Carstensen CA, Bachmann C, Bauer K, Neuwald C, Rosalki SB, Foo AY, Vogt W. Creatine kinase determination: a European evaluation of the creatine kinase determination in serum, plasma and whole blood with the Reflotron system. *Eur J Clin Chem Clin Biochem.* 1991;29(10): 691-6.
107. Howatson G, Van Someren K, Hortobágyi T. Repeated bout effect after maximal eccentric exercise. *Int J Sports Med.* 2007 ;28(7):557-63.
108. Howatson G, van Someren KA. The prevention and treatment of exercise-induced muscle damage. *Sports Med.* 2008;38(6):483-503.
109. Howatson, G, Goodall, S, Van Someren, KA. The influence of cold water immersions on adaptation following a single bout of damaging exercise. *Eur J Appl Physiol.* 2009;105:615-21.
110. Howatson G, Milak A. Exercise-induced muscle damage following a bout of sport specific repeated sprints. *J Strength Cond Res.* 2009;23(8):2419-24.
111. Howland RH. Understanding the placebo effect. Part 1: placebo use in clinical trials. *J Psychosoc Nurs Ment Health Serv.* 2008;46(5):17-20.
112. Hunkin SL, Fahrner B, Gatin PB. Creatine kinase and its relationship with match performance in elite Australian Rules football. *J Sci Med Sport.* 2014;17(3):332-6.

113. Ingram J, Dawson B, Goodman C, Wallman K, Beilby J. Effect of water immersion methods on post-exercise recovery from simulated team sport exercise. *J Sci Med Sport* 2009;12(3): 417-21.
114. Ispirlidis I, Fatouros IG, Jamurtas AZ, Nikolaidis MG, Michailidis I, Douroudos I, Margonis K, Chatzinikolaou A, Kalistratos E, Katrabasas I, Alexiou V, Taxildaris K. Time-course of changes in inflammatory and performance responses following a soccer game. *Clin J Sport Med*. 2008. 18(5):423-31.
115. Johnston RD, Gabbett TJ, Jenkins DG. The Influence of Physical Fitness and Playing Standard on Pacing Strategies During a Team-Sport Tournament. *Int J Sports Physiol Perform*. 2015;10(8):1001-8.
116. Kerksick CM, Zuhl M. Mechanisms of Oxidative Damage and Their Impact on Contracting Muscle. In: Lamprecht M, editor. *Source Antioxidants in Sport Nutrition*. Boca Raton (FL): CRC Press/Taylor & Francis; 2015. Chapter 1.
117. Kharraz Y, Guerra J, Mann CJ, Serrano AL, Muñoz-Cánoves P. Macrophage plasticity and the role of inflammation in skeletal muscle repair. *Mediators Inflamm*. 2013;2013:491497.
118. King M, Duffield R. The effects of recovery interventions on consecutive days of intermittent sprint exercise. *J Strength Cond Res*. 2009;23(6):1795-802.
119. Knicker AJ, Renshaw I, Oldham AR, Cairns SP. Interactive processes link the multiple symptoms of fatigue in sport competition. *Sports Med*. 2011;41(4):307-28.
120. Koch AJ, Pereira R, Machado M. The creatine kinase response to resistance exercise. *J Musculoskelet Neuronal Interact*. 2014;14(1):68-77.
121. Koshi EB, Short CA. Placebo theory and its implications for research and clinical practice: a review of the recent literature. *Pain Pract*. 2007;7(1):4-20.

122. Kraemer WJ, Marchitelli L, Gordon SE, Harman E, Dziados JE, Mello R, Frykman P, McCurry D and Fleck S. Hormonal and growth factor responses to heavy resistance exercise protocols. *J Appl Physiol.* 1990;69(4):1442-50.
123. Kraemer WJ and Ratamess NA. Hormonal responses and adaptations to resistance exercise and training. *Sports Med.* 2005;35(4):339-61.
124. Krustup P, Mohr M, Steensberg A, Bencke J, Kjaer M, Bangsbo J. Muscle and blood metabolites during a soccer game: implications for sprint performance. *Med Sci Sports Exerc.* 2006;38(6):1165-74.
125. Laurent CM, Green JM, Bishop PA, Sjøkvist J, Schumacker RE, Richardson MT and Curtner-Smith, M. A practical approach to monitoring recovery: development of a perceived recovery status scale. *J Strength Cond Res.* 2011;25(3): 620-28.
126. Lavender AP, Nosaka K. Responses of old men to repeated bouts of eccentric exercise of the elbow flexors in comparison with young men. *Eur J Appl Physiol.* 2006;97(5):619-26.
127. 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.
128. Leeder J DC, van Someren KA, Gaze D, Jewell A, Deshmukh NI, Shah I, Barker J, Howatson G. Recovery and adaptation from repeated intermittent-sprint exercise. *Int J Sports Physiol Perform.* 2014;9(3):489-96.
129. Le Moal E, Groussard C, Paillard T, Chaory K, Le Bris R, Plantet K, Pincemail J, Zouhal H. Redox status of professional soccer players is influenced by training load throughout a season. *Int J Sports Med.* 2016;37(9):680-6.
130. Libardi CA, Nogueira FR, Vechin FC, Conceição MS, Bonganha V, Chacon-Mikahil MP. Acute hormonal responses following different velocities of eccentric exercise *Clin Physiol Funct Imaging.* 2013; 33:450-4.

131. Loenneke JP, Wilson JM, Marín PJ, Zourdos MC, Bembien MG. Low intensity blood flow restriction training: a meta-analysis. *Eur J Appl Physiol.* 2012;112(5):1849-59.
132. MacIntyre DL, Reid WD, Lyster DM, McKenzie DC. Different effects of strenuous eccentric exercise on the accumulation of neutrophils in muscle in women and men. *Eur J Appl Physiol.* 2000;81(1-2):47-53.
133. MacIntyre DL, Sorichter S, Mair J, Berg A, McKenzie DC. Markers of inflammation and myofibrillar proteins following eccentric exercise in humans. *Eur J Appl Physiol.* 2001;84(3):180-6.
134. Magalhães J, Rebelo A, Oliveira E, Silva JR, Marques F, Ascensão A. Impact of Loughborough Intermittent Shuttle Test versus soccer match on physiological, biochemical and neuromuscular parameters. *Eur J Appl Physiol.* 2010;108(1):39-48.
135. Malm C. Exercise-induced muscle damage and inflammation: fact or fiction? *Acta Physiol Scand.* 2001;171(3):233-9.
136. McCaulley GO, McBride JM, Cormie P, Hudson MB, Nuzzo JL, Quindry JC, Travis Triplett N. Acute hormonal and neuromuscular responses to hypertrophy, strength and power type resistance exercise. *Eur J Appl Physiol.* 2009;105(5):695-704.
137. McHugh MP, Connolly DA, Eston RG, Gleim GW. Exercise-induced muscle damage and potential mechanisms for the repeated bout effect. *Sports Med.* 1999 ;27(3):157-70.
138. McHugh MP. Recent advances in the understanding of the repeated bout effect: the protective effect against muscle damage from a single bout of eccentric exercise. *Scand J Med Sci Sports.* 2003;13(2):88-97.
139. McLester JR, Bishop PA, Smith J, Wyers L, Dale B, Kozusko J, Richardson M, Nevett ME, Lomax R. A series of studies--a practical protocol for testing muscular endurance recovery. *J Strength Cond Res.* 2003;17(2):259-73.

140. Mehta PH, Josephs RA. Testosterone change after losing predicts the decision to compete again. *Horm Behav.* 2006;50(5):684-92.
141. Miller FG, Colloca L, Kaptchuk TJ. The placebo effect: illness and interpersonal healing. *Perspect Biol Med.* 2009; 52(4):518-39.
142. Millet GY. Can neuromuscular fatigue explain running strategies and performance in ultra-marathons?: the flush model. *Sports Med.* 2011;41(6):489-506.
143. Miyama M, Nosaka K. Influence of surface on muscle damage and soreness induced by consecutive drop jumps. *J Strength Cond Res.* 2004;18(2):206-11.
144. Mohr M, Krstrup P, Bangsbo J. Match performance of high-standard soccer players with special reference to development of fatigue. *J Sports Sci.* 2003;21(7):519-28.
145. Murray NB, Gabbett TJ, Chamari K. Effect of different between-match recovery times on the activity profiles and injury rates of national rugby league players. *J Strength Cond Res.* 2014 ;28(12):3476-83.
146. Nédélec M, McCall A, Carling C, Legall F, Berthoin S, Dupont G. Recovery in Soccer Part II—Recovery Strategies. *Sports Med.* 2013a;43: 9-22.
147. Nédélec M, McCall A, Carling C, Le Gall F, Berthoin S, Dupont G. Physical performance and subjective ratings after a soccer-specific exercise simulation: comparison of natural grass versus artificial turf. *J Sports Sci.* 2013b;31(5):529-36.
148. Nédélec M, Wisloff U, McCall A, Berthoin S, Dupont G. Recovery after an intermittent test. *Int J Sports Med.* 2013c;34(6):554-8.
149. Nédélec, M, McCall, A, Carling, C, Legall, F, Berthoin, S, and Dupont, G. The influence of soccer playing actions on the recovery kinetics after a soccer match. *J Strength Cond Res.* 2015a;28(6):1517-23.

150. Nédélec M, Halson S, Abaidia AE, Ahmaidi S, Dupont G. Stress, Sleep and Recovery in Elite Soccer: A Critical Review of the Literature. *Sports Med.* 2015b;45(10):1387-400.
151. Nevill AM, Holder RL. Home advantage in sport: an overview of studies on the advantage of playing at home. *Sports Med.* 1999;28(4):221-36.
152. Newton MJ, Morgan GT, Sacco P, Chapman DW, Nosaka K. Comparison of responses to strenuous eccentric exercise of the elbow flexors between resistance-trained and untrained men. *J Strength Cond Res.* 2008;22(2):597-607. Niess AM, Simon P. Response and adaptation of skeletal muscle to exercise--the role of reactive oxygen species. *Front Biosci.* 2007 Sep 1;12:4826-38.
153. Noakes TD, St Clair Gibson A, Lambert EV. From catastrophe to complexity: a novel model of integrative central neural regulation of effort and fatigue during exercise in humans: summary and conclusions. *Br J Sports Med.* 2005;39(2):120-4.
154. Nosaka K, Clarkson PM, McGuiggin ME, Byrne JM. Time course of muscle adaptation after high force eccentric exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1991;63(1):70-6.
155. Nosaka K, Clarkson PM. Muscle damage following repeated bouts of high force eccentric exercise. *Med Sci Sports Exerc.* 1995;27(9):1263-9.
156. Nosaka K, Sakamoto K. Effect of elbow joint angle on the magnitude of muscle damage to the elbow flexors. *Med Sci Sports Exerc.* 2001;33(1):22-9.
157. Nosaka, K, Newton, M, Sacco, P. Delayed-onset muscle soreness does not reflect the magnitude of eccentric exercise-induced muscle damage. *Scand J Med Sci Sports.* 2002;12: 337-46.
158. Osgnach C, Poser S, Bernardini R, Rinaldo R, di Prampero PE. Energy cost and metabolic power in elite soccer: a new match analysis approach. *Med Sci Sports Exerc.* 2010;42(1):170-8

159. Owen A, Dunlop G, Rouissi M, Chtara M, Paul D, Zouhal H, Wong del P. The relationship between lower-limb strength and match-related muscle damage in elite level professional European soccer players. *J Sports Sci.* 2015;33(20):2100-5.
160. Padulo J, Tiloca A, Powell D, Granatelli G, Bianco A, Paoli A. EMG amplitude of the biceps femoris during jumping compared to landing movements. SpringerPlus, 2: 520, 2013.
161. Page P. Beyond statistical significance: clinical interpretation of rehabilitation research literature. *Int J Sports Phys Ther.* 2014;9(5):726-36.
162. Paulsen G, Cramer R, Benestad HB, Fjeld JG, Mørkrid L, Hallén J, Raastad T. Time course of leukocyte accumulation in human muscle after eccentric exercise. *Med Sci Sports Exerc.* 2010;42(1):75-85.
163. Paulsen G, Mikkelsen UR, Raastad T, Peake JM. Leucocytes, cytokines and satellite cells: what role do they play in muscle damage and regeneration following eccentric exercise? *Exerc Immunol Rev.* 2012;18:42-97.
164. Peake J, Della Gatta P, Cameron-Smith D. Aging and its effects on inflammation in skeletal muscle at rest and following exercise-induced muscle injury. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol.* 2010;298(6):R1485-95.
165. Pointon M, Duffield R. Cold water immersion recovery after simulated collision sport exercise. *Med Sci Sports Exerc.* 2012;44(2):206-16.
166. Poppendieck W, Faude O, Wegmann M, Meyer T. Cooling and performance recovery of trained athletes: a meta-analytical review. *Int J Sports Physiol Perform.* 2013;8(3):227-42.
167. Pournot H, Bieuzen F, Duffield R, Lepretre PM, Cozzolino C, Hauswirth C. Short term effects of various water immersions on recovery from exhaustive intermittent exercise. *Eur J Appl Physiol.* 2011;111(7):1287-95.

168. Požgain I, Požgain Z, Degmečić D. Placebo and nocebo effect: a mini-review. *Psychiatr Danub.* 2014;26(2):100-7.
169. Prasartwuth O, Taylor JL, Gandevia SC. Maximal force, voluntary activation and muscle soreness after eccentric damage to human elbow flexor muscles. *J Physiol.* 2005;15;567(Pt 1):337-48.
170. Price DD, Finniss DG, Benedetti F. A comprehensive review of the placebo effect: recent advances and current thought. *Annu Rev Psychol.* 2008;59:565-90.
171. Racinais S, Alonso JM, Coutts AJ, Flouris AD, Girard O, González-Alonso J, Hausswirth C, Jay O, Lee JK, Mitchell N, Nassis GP, Nybo L, Pluim BM, Roelands B, Sawka MN, Wingo JE, Périard JD. Consensus recommendations on training and competing in the heat. *Scand J Med Sci Sports.* 2015;25 Suppl 1:6-19.
172. Rahnema N, Reilly T, Lees A. Injury risk associated with playing actions during competitive soccer. *Br J Sports Med.* 2002 Oct;36(5):354-9.
173. Rampinini E, Bosio A, Ferraresi I, Petruolo A, Morelli A, Sassi A. Match-related fatigue in soccer players. *Med Sci Sports Exerc.* 2011;43(11):2161-70.
174. Rattray B, Argus C, Martin K, Northey J, Driller M. Is it time to turn our attention toward central mechanisms for post-exertional recovery strategies and performance? *Front Physiol.* 2015;6:79.
175. Roberts LA, Raastad T, Markworth JF, Figueiredo VC, Egner IM, Shield A, Cameron-Smith D, Coombes JS, Peake JM. Post-exercise cold water immersion attenuates acute anabolic signalling and long-term adaptations in muscle to strength training. *J Physiol.* 2015;593(18):4285-301.
176. 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.



177. Russell M, Northeast J, Atkinson G, Shearer DA, Sparkes W, Cook CJ, Kilduff LP. Between-Match Variability of Peak Power Output and Creatine Kinase Responses to Soccer Match-Play. *J Strength Cond Res.* 2015;29(8):2079-85.
178. Samuels CH. Jet lag and travel fatigue: a comprehensive management plan for sport medicine physicians and high-performance support teams. *Clin J Sport Med.* 2012;22(3):268-73.
179. Saw AE, Main LC, Gastin PB. Impact of Sport Context and Support on the Use of a Self-Report Measure for Athlete Monitoring. *J Sports Sci Med.* 2015;14(4):732-9.
180. Sayers SP, Knight CA, Clarkson PM. Neuromuscular variables affecting the magnitude of force loss after eccentric exercise. *J Sports Sci.* 2003;21(5):403-10.
181. Scheller J, Chalaris A, Schmidt-Arras D, Rose-John S. The pro- and anti-inflammatory properties of the cytokine interleukin-6. *Biochim Biophys Acta.* 2011;1813(5):878-88.
182. Schoenfeld BJ. The mechanisms of muscle hypertrophy and their application to resistance training. *J Strength Cond Res.* 2010;24(10):2857-72.
183. Schoenfeld, BJ. Post-exercise hypertrophic adaptations: a re-examination of the hormone hypothesis and its applicability to resistance training program design. *J Strength Cond Res.* 2013;27(6):1720-30.
184. Silva JR, Ascensão A, Marques F, Seabra A, Rebelo A, Magalhães J. Neuromuscular function, hormonal and redox status and muscle damage of professional soccer players after a high-level competitive match. *Eur J Appl Physiol.* 2013;113(9):2193-201.
185. Silva JR, Rebelo A, Marques F, Pereira L, Seabra A, Ascensão A, Magalhães J. Biochemical impact of soccer: an analysis of hormonal, muscle damage, and redox markers during the season. *Appl Physiol Nutr Metab.* 2014;39(4):432-8.

186. Simão R, Leite RD, Fina Speretta GF, Souto Maior A, Freitas de Salles B, Pessoa de Souza Junior T, Vingren JL, and Willardson JM. Influence of upper-body exercise order on hormonal responses in trained men. *Appl Physiol Nutr Metab.* 2013;38:177-8.
187. Sinha-Hikim I, Roth SM, Lee MI, and Bhasin S. Testosterone-induced muscle hypertrophy is associated with an increase in satellite cell number in healthy, young men. *Am J Physiol Endocrinol Metab.* 2013;285: E197-E205.
188. Smith LL, Anwar A, Fragen M, Rananto C, Johnson R, Holbert D. Cytokines and cell adhesion molecules associated with high-intensity eccentric exercise. *Eur J Appl Physiol.* 2000;82(1-2):61-7.
189. Smith C, Kruger MJ, Smith RM, Myburgh KH. The inflammatory response to skeletal muscle injury: illuminating complexities. *Sports Med.* 2008;38(11):947-69.
190. Starbuck C and Eston R. Exercise-induced muscle damage and the repeated bout effect: evidence for cross transfer. *Eur J Appl Physiol.* 2012;112:1005-13.
191. Stegemann S. Colored Capsules – a Contribution to Drug Safety. *Pharm. Ind.* 2005;6(9): 1088-95.
192. Stephens JM, Halson S, Miller J, Slater GJ, Askew CD. Cold Water Immersion for Athletic Recovery: One Size Does Not Fit All. *Int J Sports Physiol Perform.* 2016 Jun 13. [Epub ahead of print].
193. Stølen T, Chamari K, Castagna C, Wisløff U. Physiology of soccer: an update. *Sports Med.* 2005;35(6):501-36.
194. Stone KJ, Oliver JL, Hughes MG, Stembridge MR, Newcombe DJ, Meyers RW. Development of a soccer simulation protocol to include repeated sprints and agility. *Int J Sports Physiol Perform.* 2011 ;6(3):427-31.

195. Stults-Kolehmainen MA, Bartholomew JB, Sinha R. Chronic psychological stress impairs recovery of muscular function and somatic sensations over a 96-hour period. *J Strength Cond Res.* 2014;28(7):2007-17.
196. Stupka N, Tarnopolsky MA, Yardley NJ, Phillips SM. Cellular adaptation to repeated eccentric exercise-induced muscle damage. *J Appl Physiol (1985).* 2001;91(4):1669-78.
197. Suzuki K, Nakaji S, Yamada M, Totsuka M, Sato K, Sugawara K. Systemic inflammatory response to exhaustive exercise. Cytokine kinetics. *Exerc Immunol Rev.* 2002;8:6-48.
198. Takarada Y, Nakamura Y, Aruga S, Onda T, Miyazaki S, Ishii N. Rapid increase in plasma growth hormone after low-intensity resistance exercise with vascular occlusion. *J Appl Physiol (1985).* 2000;88(1):61-5.
199. Takeda M, Sato T, Hasegawa T, Shintaku H, Kato H, Yamaguchi Y, Radak Z. The effects of cold water immersion after rugby training on muscle power and biochemical markers. *J Sports Sci Med.* 2014;13(3):616-23.
200. Tee JC, Bosch AN, Lambert MI. Metabolic consequences of exercise-induced muscle damage. *Sports Med.* 2007;37(10):827-36.
201. Terry PC, Walrond N, Carron AV. The influence of game location on athletes' psychological states. *J Sci Med Sport.* 1998;1(1):29-37.
202. Thompson D, Nicholas CW, and Williams C. Muscular soreness following prolonged intermittent high-intensity shuttle running. *J Sports Sci.* 1999;17(5):387-95.
203. Thorlund JB, Aagaard P, Madsen K. Rapid muscle force capacity changes after soccer match play. *Int J Sports Med.* 2009;30(4):273-8.
204. Urban RJ, Bodenbun YH, Gilkinson C, Foxworth J, Coggan AR, Wolfe RR and Ferrando A. Testosterone administration to elderly men increases skeletal muscle strength and protein synthesis. *Am J Physiol.* 1995;269:E820-E26.

205. Vaile J, Halson S, Gill N and Dawson B. Effect of hydrotherapy on the signs and symptoms of delayed onset muscle soreness. *Eur J Appl Physiol.* 2008;102:447-55.
206. Versey NG, Halson SL, Dawson BT. Water immersion recovery for athletes: effect on exercise performance and practical recommendations. *Sports Med.* 2013;43(11):1101-30.
207. Velloso CP. Regulation of muscle mass by growth hormone and IGF-I. *Br J Pharmacol.* 2008;154(3):557-68.
208. Vieira A, Bottaro M, Ferreira-Junior JB, Vieira C, Cleto VA, Cadore EL, Simões HG, Carmo JD, Brown LE. Does whole-body cryotherapy improve vertical jump recovery following a high-intensity exercise bout? *Open Access J Sports Med.* 2015;6:49-54.
209. Vincent, WJ. *Statistics in Kinesiology* (2nd ed.). Champaign, IL: Human Kinetics, 1999.
210. Warren GL, Lowe DA, and Armstrong RB. Measurement tools used in the study of eccentric contraction-induced injury. *Sports Med.* 1999;27(1):43-59.
211. White GE, Rhind SG, Wells GD. The effect of various cold-water immersion protocols on exercise-induced inflammatory response and functional recovery from high-intensity sprint exercise. *Eur J Appl Physiol.* 2014;114(11):2353-67.
212. Wilcock IM, Cronin JB, Hing WA. Physiological response to water immersion: a method for sport recovery? *Sports Med.* 2006;36(9):747-65.
213. Yamane M, Teruya H, Nakano M, Ogai R, Ohnishi N, Kosaka M. Post-exercise leg and forearm flexor muscle cooling in humans attenuates endurance and resistance training effects on muscle performance and on circulatory adaptation. *Eur J Appl Physiol.* 2006;96(5):572-80.
214. Yamane M, Ohnishi N, Matsumoto T. Does Regular Post-exercise Cold Application Attenuate Trained Muscle Adaptation? *Int J Sports Med.* 2015 Jul;36(8):647-53.



## **DOCUMENTS ANNEXES**

Liste des activités à ne pas réaliser et des stratégies de récupération à ne pas utiliser lors des protocoles :

- ne réaliser aucune activité physique additionnelle (vélo, course, natation, musculation, etc.) au cours de la période de tests.
- ne pas utiliser de méthode de récupération personnelle (bain froid, massages, chaussettes de compression, électrostimulation, etc.) au cours de la période de tests.
- ne pas consommer médicament, alcool, tabac, café, ou toute boisson contenant de la caféine au cours de la période de tests et d'exercice. Si vous êtes sous traitement médicamenteux, notifiez-le clairement sur cette feuille.
- au cours de la période de tests, veillez à manger au maximum 3 heures avant votre heure de passage sur les tests. Ne pas consommer de jus de cerise, de jus aux fruits rouges et d'acides aminés.
- ne pas consommer de lait et de produits laitiers
- il vous est également demandé d'être dans un état d'hydratation suffisant lors de l'expérimentation et de ne pas arriver en état de déshydratation.
- ne pas réaliser de séance d'étirements au cours de la période incriminée.