



Réponses physiologiques liées à une immersion en eau froide et à une cryostimulation-cryothérapie en corps entier : effets sur la récupération après un exercice musculaire

Christophe Hausswirth, François Bieuzen, E. Barbiche, Jeanick Brisswalter

► To cite this version:

Christophe Hausswirth, François Bieuzen, E. Barbiche, Jeanick Brisswalter. Réponses physiologiques liées à une immersion en eau froide et à une cryostimulation-cryothérapie en corps entier : effets sur la récupération après un exercice musculaire. *Science & Sports*, 2010, 25 (3), pp.121-131. 10.1016/j.scispo.2009.12.001 . hal-01759924

HAL Id: hal-01759924

<https://insep.hal.science/hal-01759924>

Submitted on 5 Apr 2018

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

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

MISE AU POINT

Réponses physiologiques liées à une immersion en eau froide et à une cryostimulation-cryothérapie en corps entier : effets sur la récupération après un exercice musculaire

Physiological responses after a cold-water immersion and a whole-body cryostimulation: Effects on recovery after a muscular exercise

C. Hausswirth^{a,*}, F. Bieuzen^a, E. Barbiche^b, J. Brisswalter^c

^a Mission recherche, laboratoire de biomécanique et physiologie, institut national du sport et de l'éducation physique (Insep), 11, avenue du Tremblay, 75012 Paris, France

^b 24, avenue Georges-Pompidou, 40130 Capbreton, France

^c UFR-STAPS de Nice, laboratoire motricité humaine éducation santé, Nice, France

MOTS CLÉS

Récupération ;
Inflammation ;
Immersion en eau froide ;
Immersion en eau contrastée ;
Cryothérapie en corps entier

Résumé

Objectifs. – Cette revue examine tout d'abord l'efficacité de la récupération musculaire par l'immersion en eau froide ou eau contrastée (chaud–froid) et détaille les différents protocoles scientifiques afin d'obtenir des applications pratiques pour les athlètes. Ensuite, cette revue propose une synthèse sur les effets de la cryothérapie en corps entier et les bénéfices ou non apportées par cette modalité relativement récente.

Actualités. – La multitude des protocoles ayant investigué les effets de la récupération par immersion en eau froide et/ou contrastée expliquent les résultats hétérogènes rapportés par les différents travaux menés sur les effets de cette technique sur la récupération musculaire. Cette méthode semble être préconisée largement après des exercices de musculation ou des exercices à forte contrainte énergétique, lorsqu'elle est programmée dans les 20 minutes qui succèdent l'exercice fatigant. L'immersion en eau chaude fait rarement l'unanimité scientifique, surtout si l'exercice préalable est à prédominance anaérobie ; seule la profondeur de l'immersion paraît vraiment essentielle, une immersion jusqu'au cou semble donner des résultats concluants. Pour ce qui est de la cryothérapie en corps entier, peu de données actuelles sont disponibles concernant la récupération avec cette modalité suite à un exercice. Cependant, la littérature

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : christophe.hausswirth@insep.fr (C. Hausswirth).

KEYWORDS

Recovery;
Inflammation;
Cold water immersion
technique;
Contrast water
therapy;
Whole-body
cryotherapy

scientifique nous donne des indications sur des effets bénéfiques de certains paramètres de l'inflammation lorsque cette pratique est réalisée, sur une possible augmentation du statut antioxydant, ainsi que sur une large augmentation de l'humeur et des syndromes dépressifs.

Perspectives et projets. — Il apparaît principalement que des études complémentaires d'avantage ciblées sur l'activité physique sont à mener pour nous renseigner sur la capacité ou non des athlètes à mieux récupérer en utilisant la cryothérapie en corps entier.

Summary

Aims. — This review focuses first of all on the effects of the cold and/or contrast water immersion techniques on muscular recovery to determine practical implications for athletes. Then, the present review summarizes the effects of whole-body cryotherapy and its potential benefits.

Actualities. — The multitude of protocols concerning the cold water immersion technique and the contrast water technique explains the large variety of the results reported in the literature on this topic. This recovery strategy seems mainly recommended after strength training and anaerobic solicitations, when it is planned during the 20 min following the fatiguing task. Immersion in warm water is not supported by the literature; only the depth of the immersion looks essential, an immersion to the neck is associated with positive effects. Concerning the whole-body cryotherapy, few data are available about its benefits on recovery after exercise. Nevertheless, the literature reports interesting results on its positive impact relating to inflammatory factors, antioxidant status, mood and syndromes of depression.

Perspectives and prospects. — Further studies are needed to investigate the potential positive effects of whole-body cryotherapy on recovery by athletes.

1. Introduction

La récupération musculaire est un facteur clé de la performance. Actuellement, le monde sportif a considérablement progressé dans le domaine de la programmation des charges d'entraînement. Cependant, les modalités de récupération sont souvent laissées à la charge de l'athlète et leur absence régulière dans l'enchaînement des entraînements amène progressivement l'athlète dans le secteur de la surcharge, voire du surentraînement [39]. Sans programmation minutieuse de ces différentes modalités de récupération, il est bien établi que le maintien de la haute-performance pour un athlète est d'ores et déjà compromis. C'est souvent le repos qui est alors préconisé afin de rendre des charges d'entraînement acceptables, reliées aux différentes intensités et aux différents volumes souhaités.

Depuis quelques années, différents accents ont été mis sur la possibilité pour un athlète de mieux récupérer. Cette accélération de la récupération permet à certains athlètes de pouvoir continuer à s'entraîner ou à maintenir un état compétitif stable. Relié à cela, il y a une apparition, depuis quelques années, de modalités de récupération comme les massages chaud-froid, l'oxygénation par hyperbarie, l'accélération du retour veineux, l'électromyostimulation, et ce dans le but d'accélérer véritablement la régénération globale des athlètes [12]. Parmi les différentes méthodes utilisées, la cryothérapie locale et l'immersion en eau froide attirent l'attention du monde sportif et scientifique, comme moyens efficaces de lutte contre l'inflammation musculaire. En effet, la plupart des traumatismes chroniques résultant de la pratique sportive intensive se manifeste par la douleur et la tuméfaction, donc par les symptômes de l'inflammation. Cette inflammation décrit les mécanismes réactionnels de défense par lesquels l'organisme reconnaît, détruit et élimine toutes substances qui lui sont étran-

gères. Depuis très longtemps, il est connu que pour remédier à l'inflammation, l'abaissement de la température est un moyen efficace lorsqu'il est appliqué au niveau du traumatisme [14]. Ce type de récupération est souvent préconisé dans les sports où les contacts sont répétés tout au long des entraînements et des compétitions. Cependant, s'il apparaît évident que son efficacité est souvent montrée en tant qu'analgésique, il n'y a pas toujours unanimité sur son utilisation [13]. Plus récemment, une autre modalité de récupération a fait son apparition : la cryothérapie en corps entier (CCE). Toutefois, si quelques études montrent actuellement son efficacité sur les aspects traumatiques ou immunitaires, peu de données semblent disponibles sur la performance et les capacités de récupération liées à son utilisation.

Le but de cette revue est d'examiner l'efficacité de la récupération musculaire par l'immersion en eau froide ou eau contrastée (chaud-froid), et d'en détailler les différents protocoles scientifiques afin d'obtenir des applications pratiques pour les athlètes. La seconde partie de notre revue est reliée aux effets de la CCE et une synthèse est faite sur les bénéfices ou non apportés par cette modalité relativement récente.

2. Immersion en eau froide ou contrastée : effets sur la récupération

2.1. Mécanismes de la récupération par immersion

Avant d'être utilisée comme technique de récupération suite à un exercice physique, l'immersion en eau froide a d'abord été proposée dans un but thérapeutique. Avec le froid, les objectifs visés étaient avant tout analgésiques et les traitements prescrits concernaient principalement

les blessures aiguës du muscle squelettique. Depuis les années 1990–2000, on observe un intérêt accru pour cette technique en vue d'optimiser la récupération des sportifs [15,65]. L'objectif final étant de diminuer les temps de récupération totale entre les matches et/ou entraînements mais également au sein d'une même séance entre les séries d'exercices afin de réitérer le plus rapidement possible une performance. Dans ce cadre, la récupération par immersion en eau froide s'appuie sur un plus grand nombre de mécanismes que lorsque celle-ci était utilisée comme thérapie : les effets du froid et les effets de la pression hydrostatique. Le premier mécanisme, lié à la température de l'eau généralement comprise entre 4 et 16 °C selon les études, permettrait de diminuer la température corporelle, de générer une vasoconstriction locale, d'altérer la transmission nerveuse ou encore de diminuer la réponse inflammatoire. Le deuxième mécanisme est induit par l'utilisation de l'eau qui permettrait d'associer au froid les effets de la pression hydrostatique sur la ou les parties du corps immergées. En effet, la pression de l'eau exerce une pression supérieure à celle de l'air sur le corps provoquant un mouvement des gaz, substances et fluides. Cette spécificité permettrait notamment de réduire la taille de l'œdème produit par l'exercice mais également de limiter l'influx nerveux par compression des muscles et des nerfs. Cependant, toutes les études n'appliquent pas les mêmes procédures d'immersion générant plus ou moins de pression sur le corps modifiant alors les adaptations physiologiques. Cela a notamment été montré par Farhi et Linnarsson [20] qui ont observé des variations très importantes de la fréquence cardiaque en modulant les profondeurs d'immersion à température constante de 35 °C. Ainsi, dans certaines études sur la récupération, les sujets sont immergés jusqu'à la crête iliaque en position assise [56] alors que dans d'autres, ils sont immergés debout avec de l'eau jusqu'au cou [62]. Cette spécificité pourrait expliquer pour une part les différents résultats observés. Il existe également un troisième mécanisme physiologique recherché grâce à une autre technique d'immersion utilisant l'eau contrastée. Cette technique, dont la popularité est grandissante auprès de la communauté scientifique et des praticiens du sport, s'appuie sur l'immersion alternée en eaux froides et chaudes. L'objectif visé au travers cette modalité de récupération est de générer successivement des vasoconstrictions et vasodilatations ayant pour effet de stimuler le flux sanguin tout en réduisant la réponse inflammatoire ainsi que sa durée. Ainsi, ce mécanisme de *vaso-pumping*, en plus des précédents, permettrait le mouvement des substances métaboliques, la réparation du muscle soumis à l'exercice et la diminution des processus métaboliques au sein du muscle [15]. Ces mouvements augmenteraient notamment la translocation des métabolites vers le sang et réduirait le volume du liquide intracellulaire. D'un point de vue pratique, les temps d'immersion relevés dans la littérature pour cette technique varient de 30 à 120 secondes par immersion sur deux à cinq répétitions pendant une durée totale de deux à 15 minutes. Cependant, l'eau froide peut également engendrer des effets négatifs. En effet, celle-ci induit une dépense énergétique anormale pour le maintien de la température corporelle. Il est admis que le maintien de la température corporelle a un coût métabolique plus élevé car il augmente la fréquence respiratoire et la consommation d'oxygène. De

plus, les vasoconstrictions associées à une diminution de la fréquence cardiaque (FC) peuvent s'avérer délétères, voire dangereuses pour la santé. On note également que la médiation de la FC par les bêta 2 adrénergiques a été diminuée après traitement par le froid [34]. Cependant, la plupart de ces effets – bénéfiques ou non – sont souvent reliés à des marqueurs biologiques pluriels.

2.2. Effets sur les marqueurs biologiques

Afin de tester l'efficacité de ces méthodes de récupération, un certain nombre d'auteurs s'est principalement intéressé aux marqueurs biologiques reliés aux lésions musculaires tels que la créatine kinase (CK) ou la lactate déshydrogénase (LDH) [9], ainsi que leurs éventuelles relations avec le maintien de la performance (Section 2.3). Il a donc été suggéré que l'immersion en eau froide pourrait induire de nombreux mouvements métaboliques et permettrait notamment de faire diminuer l'augmentation de la concentration plasmatique en créatine kinase (CK). Cependant, peu d'études ont validé cette hypothèse [19,23,29,62]. Parmi le peu d'études qui indiquent des résultats positifs, Vaile et al. [62] montrent que 24 heures après un exercice induisant des dommages musculaires suivis d'une immersion complète du corps dans une eau à 15 °C pendant 14 minutes, l'augmentation de la CK est limitée à 3,6% alors que celle-ci augmente de plus de 300% après une récupération passive. De la même façon, 36 heures après la fin d'un match de rugby, le taux de récupération de la CK plasmatique est de plus de 50% suite à neuf minutes d'exposition alternant 1 minute en eau froide (8–10 °C) et deux minutes en eau chaude (40–42 °C) alors qu'il n'est que d'environ 20% suite à une récupération passive (Fig. 1) [23]. En revanche, un beaucoup plus grand nombre d'études a montré l'absence d'effet de l'immersion en eau froide sur la cinétique de restauration de l'activité enzymatique de la CK [2,21,24,26,31,32,50,56,61]. Ainsi, à 24 heures, Vaile et al. [61] ne montrent aucun effet d'une récupération par contraste de température (CWT) suite à un exercice excentrique des jambes (cinq séries de dix répétitions à 140% de 1RM) comparativement à une récupération passive. La seule observation positive en faveur

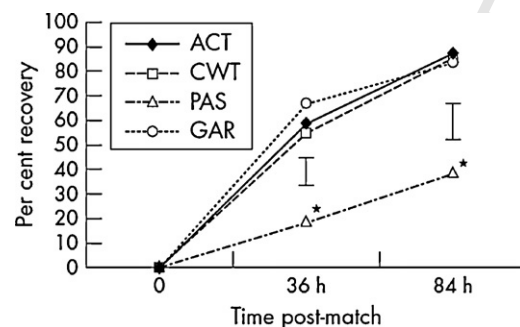


Figure 1 Pourcentage de récupération après un match de rugby sur l'activité créatine kinase interstitielle à 0,36 et 84 heures, regroupées par stratégie de récupération. ACT : récupération active ; CWT : récupération par contraste de température ; GAR : compression ; PAS : récupération passive.* Significativement différent ($p < 0,05$) des autres interventions.

Extrait de Gill et al., 2006 [23].

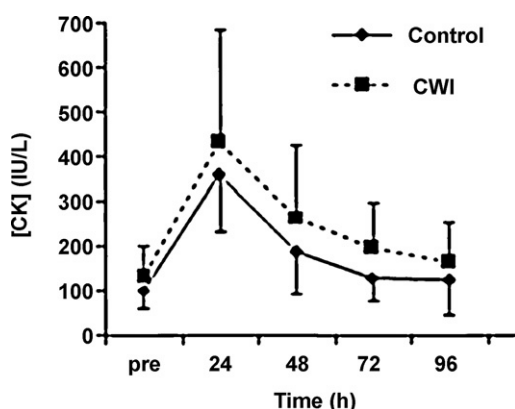


Figure 2 Activité de la créatine kinase plasmatique avant et après un exercice excentrique par stratégie de récupération. Control : récupération passive ; CWI : immersion en eau froide (12 minutes à 15 °C).

Extrait de Sellwood et al., 2009.

de la récupération dans cette étude est la précocité du pic de concentration qui apparaît 24 heures plus tôt grâce à la technique CWT. De façon similaire, Sellwood et al. [56] ne montrent pas d'effet d'une récupération par immersion en eau froide (3×1 minute à 5 °C) sur l'activité enzymatique CK suite à un exercice excentrique des jambes comparativement à une immersion identique en eau tempérée (24 °C) (Fig. 2).

Cette observation se retrouve également suite à des exercices moins spécifiques et plus complexes. Ainsi, Rowsell et al. [50] ont montré qu'une immersion répétée (5×60 secondes) dans une eau à 10 °C, après quatre matches de football en cinq jours, ne modifiait pas l'augmentation de l'activité enzymatique de la CK comparativement à une immersion en eau tempérée (34 °C). Cette dispersion des résultats s'observe également sur l'activité enzymatique de la LDH ou ces derniers auteurs observent les mêmes résultats que pour l'activité de la CK. Cela se traduit notamment dans les études de Rowsell et al. [50] et Vaile et al. [62] qui observent une cinétique de la LDH non différenciée selon la technique de récupération utilisée. L'ensemble de ces résultats est cependant à prendre avec précautions lorsque le niveau d'activité de ces enzymes dans le sang est utilisé comme indicateur des éventuels dommages musculaires. En effet, leurs niveaux d'activité ne reflètent que le rapport entre leur libération et leur élimination dans le sang. Or, l'exercice induit des hémococoncentrations ou hémofusions ainsi que des altérations de la clairance des tissus dues aux flux sanguins qui peuvent affecter la concentration enzymatique dans le sang. Ainsi, ces mesures d'activités enzymatiques peuvent ne pas refléter avec exactitude les dommages musculaires ou la fatigue [64].

Si les marqueurs des dommages musculaires ont été régulièrement étudiés dans la littérature s'intéressant à la récupération par le froid, la réponse inflammatoire a, quant à elle, été peu observée. Ainsi, seuls quelques auteurs se sont attachés à mesurer les paramètres tels que la protéine C-réactive (CRP) ou les cytokines pro- et/ou anti-inflammatoires [26,31,42,50,62]. Excepté pour Montgomery et al. [42] qui observent une très faible diminution des cytokines IL-6 et IL-10 après immersion en eau froide, les

résultats de ces études ne montrent aucun effet de ces techniques de récupération sur la réponse inflammatoire.

Les quelques études, qui se sont également intéressées au lactate et à son évolution après l'exercice en fonction de la méthode de récupération utilisée, présentent des résultats variés [16,17,26,27,44]. En effet, Morton [44], qui a demandé à ses sujets de réaliser quatre tests de Wingate (30 secondes) puis de s'immerger alternativement dans des bains à 36 °C et 12 °C, a ainsi pu observer une diminution significative de la concentration plasmatique de lactate produite au cours de l'effort. De façon similaire, Coffey et al. [16], après une course menée jusqu'à épuisement, ont observé une diminution du lactate sanguin après 15 minutes de traitement alternant une immersion en eau froide (10 °C) pendant 60 secondes et en eau chaude (42 °C) pendant 120 secondes par rapport à une récupération passive. Enfin, deux autres études très récentes ont démontré, suite à une immersion en eau froide (13–14 °C) pendant 15 minutes, une diminution significative des concentrations en lactate sanguin après un exercice de pédalage de 30 secondes à intensité maximale [17] ou un exercice d'escalade [27] comparativement à une récupération passive. Au contraire, Halson et al. [26] ne montrent pas de modification des concentrations en lactate sanguin après un exercice de 40 minutes suivi d'une récupération par immersion en eau froide. Cette apparente dispersion des résultats s'explique principalement par les durées écoulées entre la fin de l'exercice et l'utilisation de la technique de récupération. En effet, dans les trois études présentant une efficacité positive de l'intervention sur la lactatémie, l'immersion est réalisée soit immédiatement après la fin de l'exercice [16,44] soit immédiatement après une légère récupération active [17], alors que dans l'étude de Halson et al. [26], la procédure de récupération n'est effective que 20 minutes après la fin de l'exercice. Or il a été montré qu'après 20 minutes de récupération passive, l'élimination du lactate a déjà atteint plus de 75 % de sa valeur pic après un exercice sous maximal [3]. À partir de ces travaux, il semblerait que l'immersion en eau froide alternée ou non permette une clairance plus rapide du lactate lorsque l'intervention est appliquée immédiatement après l'exercice. Cela pourrait ainsi favoriser la réitération des performances au sein d'une même période.

2.3. Effets sur la performance

Bien que la majorité des études ait tenté d'établir une relation entre les paramètres biologiques et les performances, très peu ont observé des résultats allant dans le même sens. Les auteurs se sont donc attachés à observer les effets de l'immersion en eau froide sur la restauration de nombreux indicateurs de la performance caractérisant à la fois les différentes filières énergétiques mais aussi les différentes modalités de contraction musculaire. Ainsi, la plus grande partie des études a testé différents types d'interventions sur la capacité de production de force généralement en relation avec les concentrations sanguines enzymatiques [2,11,19,21,24,28,31,32,46,47,56,61,62]. La majorité de ces études observe alors que l'immersion en eau froide ne permet pas d'atténuer la perte de force après un exercice fatigant. Ainsi, Howatson et al. [28] montrent

que 96 heures après l'exercice le groupe témoin et le groupe ayant utilisé l'immersion sont respectivement capables de ne reproduire que 96 et 93 % de leur capacité initiale de production de force isométrique des extenseurs du genou. De la même façon, Bailey et al. [2] observent que la récupération de la force maximale volontaire isométrique des extenseurs du genou n'est pas affectée par la modalité de récupération employée après un exercice de 90 minutes suivi de dix minutes d'immersion à 10 °C. Les hypothèses explicatives de cette absence de résultats seraient liées, d'une part, à l'incapacité à contenir la réponse inflammatoire et, d'autre part, à la diminution de la conduction nerveuse par le froid. Cela empêcherait alors pendant un temps l'athlète de produire une puissance maximale [51] et une force maximale qu'elle soit volontaire ou stimulée [46]. En effet, certains travaux montrent qu'il existe une corrélation entre la diminution de la température du muscle et le signal électromyographique [36]. De plus, la comparaison après immersion des deux modes de contraction volontaire maximale ou stimulée permet de penser que la perte de fonction neuromusculaire serait périphérique plutôt que centrale [46]. Enfin, une étude sur les réflexes conclut également que le froid induit une diminution de la performance musculaire via une augmentation de l'excitabilité du pool de motoneurones [45]. Cependant, certains travaux ont réussi à mettre en évidence un effet positif de l'immersion en eau froide sur la récupération des capacités de production de force. Ainsi, Bailey et al. [2] qui n'observaient aucun effet sur l'extension du genou montrent, en revanche, une diminution de la perte de force isométrique de la flexion du genou après utilisation de l'immersion en eau froide. Ce résultat original se retrouve dans quelques autres études. Ainsi, Peiffer et al. [48] notent une diminution de la perte de force après récupération par immersion (cinq minutes à 14 °C) après un exercice de 90 minutes de cyclisme suivi d'un contre la montre de 16,1 km. Une autre étude récente appuie ces précédents résultats [31]. En effet, Ingram et al. [31] ont pu mettre en évidence une diminution de la perte de force isométrique, à la fois des extenseurs et fléchisseurs du genou, après des exercices simulant un sport d'équipe suivi d'une immersion de deux fois cinq minutes à 10 °C. En revanche, l'utilisation de la méthode alternant eau chaude/eau froide n'a apporté aucun résultat positif significatif. Dans ces cas de figure, les hypothèses explicatives s'appuient sur une réduction de l'œdème musculaire associée à une diminution de la réponse inflammatoire mais non liées à la température de l'eau ou à la durée d'exposition au froid.

D'autres indicateurs de la performance ont également été testés caractérisant notamment le métabolisme anaérobie aux travers de mesures de sauts verticaux ou de sprints courts en course à pied ou sur bicyclette [2,21,31,36,43,55,61,62]. Une grande diversité des résultats est alors observée. Parmi les études témoignant d'un effet positif de l'immersion en eau froide, certains indiquent une réduction de la diminution de la performance lors de saut verticaux de type *squat jump* après un exercice de type excentrique induisant des courbatures suivi d'une récupération CWT [61,62]. D'autres observent que les performances de sprints ou de sauts sont maintenues au cours de plusieurs jours d'exercice seulement pour le groupe utilisant la récupération par immersion en eau froide [43]. Enfin, certaines

études présentent des résultats indiquant une accélération du retour à un niveau initial grâce à l'utilisation des techniques de récupération par immersion en eau froide [31,61]. Toutefois, quelques études empêchent de statuer définitivement sur un potentiel effet bénéfique de l'immersion en eau froide sur la récupération. En effets, les travaux de Bailey et al. [2], French et al. [21], Kinugasa et Kilding [36], Peiffer et al. [47] ou encore Rowsell et al. [50] n'indiquent pas de différence entre un groupe ayant utilisé une autre méthode de récupération ou aucune méthode et le groupe ayant pratiqué l'immersion. Ces résultats s'observent principalement sur la capacité à reproduire des sprints courts de 10 à 30 m peu de temps après une immersion. L'hypothèse évoquée serait alors de nouveau liée à la réduction de la conduction nerveuse comme évoquée précédemment.

Si de nombreuses études se sont intéressées à la possibilité de répéter une performance de très courte durée, en revanche, peu de travaux se sont intéressés aux effets de la récupération sur la reproduction d'une performance d'une durée supérieure à une minute. Seuls quelques auteurs comme Peiffer et al. [48] ou Vaile et al. [63] ont tenté de mesurer les effets d'une récupération par immersion sur la répétition d'un contre la montre sur bicyclette de 4 km et de neuf minutes, respectivement. Ainsi, Peiffer et al. [48] observent une moindre diminution de la puissance de sortie moyenne pour le groupe ayant été immergé dans l'eau froide par rapport au groupe témoin induisant pour le premier groupe une meilleure performance. Vaile et al. [63] vont plus loin en montrant que la performance peut être maintenue grâce à la récupération par immersion en eau froide (Fig. 3).

Pour expliquer ces résultats, on retrouve les hypothèses explicatives classiquement avancées et notamment la diminution de la perception de la douleur et/ou de la fatigue. Ainsi, cette technique de récupération permet-

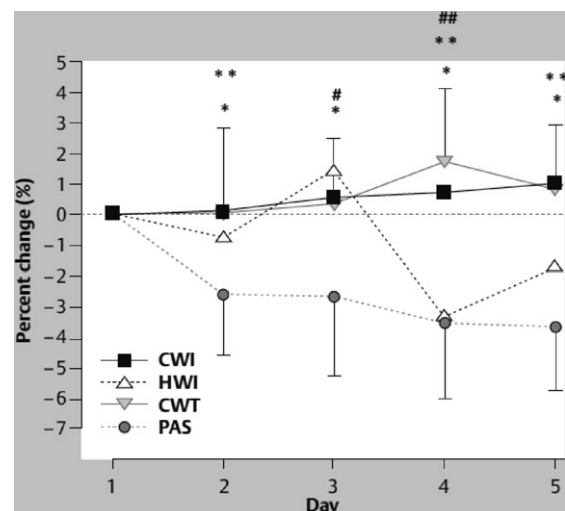


Figure 3 Variation des performances lors de contre la montre sur bicyclette de neuf minutes (puissance moyenne, pourcentage de variation par rapport au premier jour) au cours de cinq jours de tests consécutifs. CWI : immersion en eau froide. **, indique une différence significative avec la condition passive (PAS) ($p < 0,05$).

Extrait de Vaile et al., 2008 [63].

trait de réduire, via une vasoconstriction, la perméabilité des vaisseaux aux cellules immunitaires diminuant ainsi l'œdème et le processus d'inflammation, ce qui réduirait la perception de douleur [2]. Par ailleurs, une diminution de l'activité nerveuse aurait un impact positif car elle permettrait la diminution significative de la perception de fatigue après immersion [30] et de ce fait, augmenterait la capacité des sujets à maintenir un effort plus longtemps ou à parcourir une distance plus rapidement. L'étude récente de Heyman et al. [27] renforce ce résultat. En effet, ces auteurs mettent en évidence que 15 minutes d'immersion en eau froide (3×5 minutes) permet de préserver les performances liées à des parcours d'escalade pour une population féminine. Ces résultats sont identiques à une récupération active, mais supérieurs à une récupération passive ou par électromyostimulation (type TENS).

En conclusion, sur cette partie liée à l'immersion, il semblerait que la littérature sur l'utilisation d'une intervention de type immersion en eau froide et/ou contrastée sur la récupération ne propose pas de consensus pour les athlètes. Il semblerait que cela dépende de l'activité pratiquée ainsi que de son intensité. En revanche, il apparaît que celle-ci serait bénéfique lorsqu'elle est appliquée immédiatement après la fin de l'exercice sur : la clairance du lactate, la restauration des capacités de production de force et la répétition d'exercices de moyenne ou longue durée. En revanche, cette technique de récupération ne semble pas apporter de bénéfice lorsqu'elle est appliquée plus de 20 minutes après l'exercice ou entre des séries de sprints courts. Pour des études où les récupérations interviennent plus de 20 minutes après la fin de l'exercice, la CCE pourrait être préconisée.

3. Effets de la cryothérapie en corps entier sur l'organisme

Les premiers traitements utilisant les chambres de froid à de basses températures ont été introduits dans les années 1980 par Yamauchi [66], qui a pu construire la première chambre cryogénique au Japon afin de traiter les rhumatismes. La CCE est fréquemment utilisée pour soulager l'inflammation ainsi que pour les arthrites [22] et

polyarthrites rhumatoïdes [41], ainsi que pour ses effets bénéfiques sur de multiples scléroses et psoriasis [22].

Il a été démontré que la CCE – appliquée sur de courtes périodes d'exposition (deux à trois minutes) – stimule les réactions physiologiques de l'organisme qui entraînent une analgésie et anti-tuméfaction [67]. Il a été montré récemment que ce procédé à -110°C faisait baisser significativement de $-0,63^\circ\text{C}$ la température interne, cinq minutes après l'exposition, et que la valeur de référence était retrouvée au bout de 20 minutes [54]. À des températures proches de -100°C , la CCE est souvent préconisée dans le traitement des blessures. La cryostimulation limiterait les dommages des différents tissus musculaires [60]. Son rôle serait donc également de prévenir différentes blessures de l'athlète et pourrait être appliqué avant d'importantes périodes d'entraînement.

3.1. Réponses des médiateurs de l'inflammation

Dans ce contexte d'exposition au froid, certains auteurs

se sont attachés à mesurer les différents marqueurs de l'inflammation. Banfi et al. [6] ont montré qu'il existait une diminution des cytokines pro-inflammatoires (IL-2 et IL-8) associée à une augmentation des cytokines anti-inflammatoires (IL-10) après une semaine de CCE chez des rugbymen de haut-niveau. Selon ces derniers auteurs, la technique de CCE permettrait donc d'améliorer la récupération musculaire sans toutefois la mesurer. Dix rugbymen de haut-niveau ont été placés en chambre cryogène à -60°C pendant 30 secondes, puis à -110°C pendant 120 secondes, et ce sur cinq jours consécutifs. Les sujets devaient poursuivre leur trois heures d'entraînement journalier sans

modifier leur charge. Si aucune différence significative n'a été observée pour les immunoglobulines et la CRP, témoin d'inflammations aiguës, les auteurs montrent, par ailleurs, en absence de groupe témoin, que la concentration de CK et de prostaglandines (PGE2) sont significativement diminuées après cinq jours d'exposition en CCE (Fig. 4). Sans toutefois mesurer le noradrénaline (NA) plasmatique, les auteurs expliquent la baisse de CK par une stimulation probable de la NA lors d'une exposition au froid comme démontré dans l'étude de Ronsen et al. [49]. Associée à la diminution de CK, Banfi et al. [6] observent une diminution

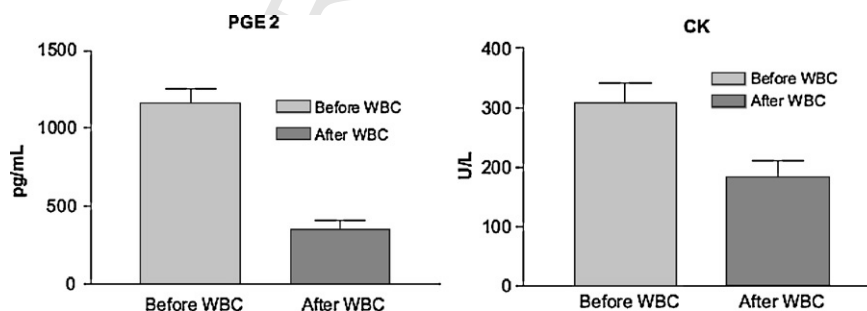


Figure 4 Variation des concentrations sériques de marqueurs de dommages musculaires. Le graphe de gauche représente une diminution significative pour les prostaglandines PGE2 ($p < 0,0001$) entre la condition avant CCE (par exemple, *before WBC*) et la condition après CCE (par exemple, *after WBC*). Le graphe de droite représente une diminution significative pour les valeurs de créatine kinase (CK) ($p < 0,01$) entre la condition avant CCE (par exemple, *before WBC*) et la condition après CCE (par exemple, *after WBC*).

des PGE2. La PGE2 est synthétisée sur différents sites du foyer inflammatoire où elle agit comme un vasodilatateur en synergie avec d'autres médiateurs comme l'histamine ou des bradykinines, et favorisant ainsi l'augmentation de la perméabilité vasculaire et la formation des œdèmes. Sa diminution après cinq jours de CCE apparaît être un bon témoin d'une meilleure récupération musculaire. Cependant, l'absence de groupe témoin dans leur étude ne permet pas de conclure rigoureusement sur l'efficacité de la technique de CCE pour la récupération.

3.2. Réponses hormonales

La grande majorité des études liée à la CCE s'est attachée à suivre la cinétique des marqueurs biologiques et/ou à l'évolution de différentes hormones en réponse à une exposition. Une étude récente de Smolander et al. [59] a comparé une exposition en CCE (-110°C , deux minutes) et une immersion en eau froide ($0-2^{\circ}\text{C}$, 20 secondes). Les deux groupes pratiquaient, une fois par semaine pendant 12 semaines, l'une ou l'autre situation. Différentes hormones comme l'hormone de croissance (GH), la prolactine ou les hormones thyroïdiennes (TSH, T3, T4) ont été analysées. Les auteurs concluent à une absence de variation significative pour le groupe CCE, et ce pour toutes les hormones étudiées. Une exposition prolongée au froid ne semble donc pas induire de modifications de ces hormones. Cette absence de résultats significatifs permet de conclure à une procédure reliée à l'éthique sportive. Cela est renforcé par l'étude récente de Banfi et al. [5] qui indique que — pour une population de dix sportifs — aucune valeur hématologique (par exemple, globules rouges, globules blancs, hémocrite, hémoglobine, plaquettes...) n'est modifiée que par cinq expositions de deux minutes en une semaine. Dans une étude antérieure, Leppäluoto et al. [37] mettent en évidence que l'exposition à la CCE (trois fois par semaine, sur 12 semaines) permettrait une augmentation significative de la NA plasmatique (Fig. 5). Les auteurs expliquent que les augmentations relevées de NA — après chaque instant de mesure tout au long des 12 semaines — pourraient avoir un rôle dans le soulagement de la douleur ressentie par les sujets d'autres études et soumis à des exercices traumatisants. Cependant, aucune échelle de perception de la douleur n'a été proposée dans cette étude puisqu'elle ne fût que descriptive (par exemple, simple exposition en CCE).

3.3. Réponses du système immunitaire

Si aucune étude ne traite de la cinétique d'évolution du système immunitaire après exposition en CCE, le modèle de la nage en eau froide et/ou de l'immersion en eau froide est depuis quelques années bien utilisé dans les pays nordiques et peuvent nous renseigner sur l'évolution des défenses immunitaires. Cette pratique, développée à partir de bases plutôt culturelles que scientifiques, a toujours permis de penser à une amélioration quant aux résistances aux infections. Dans ce contexte, Jansky et al. [33] ont immergé dix patients dans une eau à 14°C pendant une heure. Le principe fut répété trois fois par semaine pendant six semaines afin d'en étudier les effets. Parmi plusieurs marqueurs de l'immunité mesurés, les auteurs observent une augmenta-

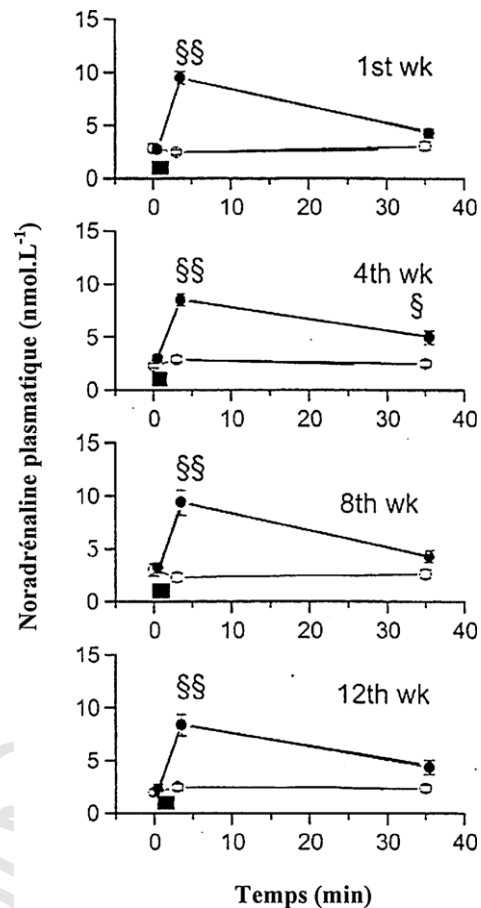


Figure 5 Variation des concentrations plasmatiques en noradrénaline après une, quatre huit et 12 semaines de cryothérapie en corps entier (CCE). Les ronds blancs (○) désignent le groupe témoin et les ronds noirs (●) désignent le groupe CCE. §§ indique une différence significative avec la valeur initiale ($p < 0,01$).

Extrait de Leppäluoto et al., 2008 [37].

tion significative des lymphocytes CD25 et des monocytes CD14. Les valeurs d'interleukine-6 (IL-6), facteur stimulant la production des lymphocytes T, ne montrent qu'une tendance à l'augmentation. Bien que sans groupe témoin, cette étude préliminaire nous oriente vers une possibilité d'amélioration du système immunitaire par une exposition au froid. Dugué et Leppänen [18] ont pu renforcer ces résultats par une étude où les taux plasmatiques d'IL-6, de monocytes et de leucocytes étaient plus élevés pour une population pratiquant régulièrement la nage en eau froide que ceux ne la pratiquant pas. Les auteurs concluent que les nageurs en eau froide présentent un système immunitaire mieux préparé à la réponse inflammatoire et qu'une exposition répétée au froid (en immersion ou non) pourrait être à l'origine d'une meilleure défense aux infections. Il peut être suggéré ainsi que des expositions répétées dans les chambres de froid (par exemple, CCE) stimulent le système immunitaire de telle manière que la prédisposition aux infections soit moindre chez les individus acclimatés. De nouvelles études sur la CCE devraient permettre d'éclaircir ces hypothèses.

3.4. Réponses sur la fonction respiratoire

L'incidence d'une exposition à une ambiance thermique froide sur la fonction respiratoire a fait l'objet de quelques travaux. Il est admis classiquement que l'organisme réagit au froid par une stimulation du système nerveux sympathique, et cette stimulation est à l'origine d'une bronchodilatation [40]. Bandopadhyay et Selvamurthy [4] ont étudié la fonction respiratoire de dix sujets exposés en Arctique pendant neuf semaines. Les résultats ont montré que dans les premiers jours le volume expiré maximal par seconde (VEMS) est significativement diminué pour recouvrer son niveau initial après quatre semaines d'exposition. À la fin des neuf semaines, les auteurs observent une amélioration significative de la VEMS, sans toutefois perdurer dans le temps. Ces conséquences respiratoires au froid ont été étudiées récemment par Smolander et al. [59] en positionnant 25 sujets non fumeurs en CCE. Ces sujets pratiquaient trois séances de CCE par semaine et ce pendant 12 semaines, à raison de deux minutes par séance. Le *peak flow* (PF) et le VEMS étaient mesurés deux minutes et 30 minutes après chaque séance. Aucune modification n'a été enregistrée au cours des trois mois d'étude pour le PF et le VEMS mesurés deux minutes après les séances. En revanche, les valeurs de PK et de VEMS étaient significativement réduits à la fin du premier mois, et ce lorsque celui-ci était mesuré 30 minutes après les séances. Les auteurs expliquent que l'effet sympathique, réflexe au froid, semble rattrapé à 30 minutes, puis dépassé par le système parasympathique. Les auteurs concluent que la CCE doit être utilisée avec précaution chez les personnes ayant des difficultés respiratoires.

3.5. Réponses sur le statut antioxydant

Il est aujourd'hui admis que l'exercice physique se caractérise par une augmentation du volume d'oxygène consommé. Ce volume élevé d'oxygène consommé va engendrer une augmentation concomitante de la production de radicaux libres [33,57]. L'exercice d'intensité élevée et/ou à forte dominante excentrique peut alors s'apparenter à un véritable « stress » ayant des conséquences métaboliques importantes qui portent atteinte aux structures cellulaires. Ces espèces radicalaires libres et dérivées de l'oxygène (RLO) – impliquées dans le stress oxydant – peuvent avoir différentes structures. Ces espèces sont des éléments chi-

miques extrêmement réactives qui, une fois produites, vont venir oxyder différents composants de la cellule. Le résultat de ces perturbations est un dysfonctionnement cellulaire menant notamment à des désordres inflammatoires. Dans un contexte relié à une diminution de ce stress oxydant, la CCE a été quelquefois utilisée comme procédé pouvant agir sur cette réduction. Les premiers travaux furent conduits par Siems et Brenke [58], ces auteurs ayant pu montrer que l'exposition aiguë à une CCE de une à cinq minutes provoquait un stress oxydatif chez les nageurs expérimentés. Une heure après l'exposition au froid, ces derniers augmentaient significativement leur concentration intra-érythrocytaire en glutathion oxydé – marqueur de stress oxydatif – comparée à une population témoin. Ces résultats étaient concomitants d'une réduction des concentrations en acide urique, véritable piègeur de radicaux libres oxygénés [1]. Ils postulèrent de ce fait que cette augmentation globale de protection anti-oxydante était le résultat à long terme de sollicitations légères de l'organisme en termes de stress oxydant. De plus, lors du refroidissement et de la stimulation de l'organisme, les mitochondries du corps exposées à des conditions de basses températures produisent dix fois plus d'anions superoxyde, souvent synonyme d'une peroxydation lipidique [8]. Une étude récente de Dugué et Leppänen [18] a mis en exergue une augmentation de l'activité totale anti-oxydante plasmatique (TAOP) après des expositions répétées en chambre froide pendant 12 semaines à raison de trois fois par semaine. Ces résultats sont contradictoires par rapport à leur hypothèse de départ où les auteurs pensaient trouver des valeurs qui diminueraient activement, synonyme d'une meilleure protection. En effet, l'augmentation de la protection anti-oxydante présumée par l'exposition au froid répétée n'a jamais été prouvée par cette étude. La plupart des études s'intéressant à la cryostimulation et à son influence sur les RLO et la peroxydation lipidique s'est souvent focalisée sur le traitement des arthrites rhumatoïdes [40,66]. Une seule étude s'est réellement intéressée à l'influence d'une session en CCE (à 130 °C) sur la balance prooxydante–antioxydante [38]. Les auteurs ont pu montrer que le statut oxydatif total (SOT) dans le plasma, résultant d'une exposition de trois minutes en CCE, était significativement plus faible 30 minutes après l'exposition au froid (Fig. 6). Le lendemain, le niveau de SOT demeurait toujours significativement plus faible comparé au niveau initial de pré-exposition en CCE. De plus, les valeurs du statut anti-

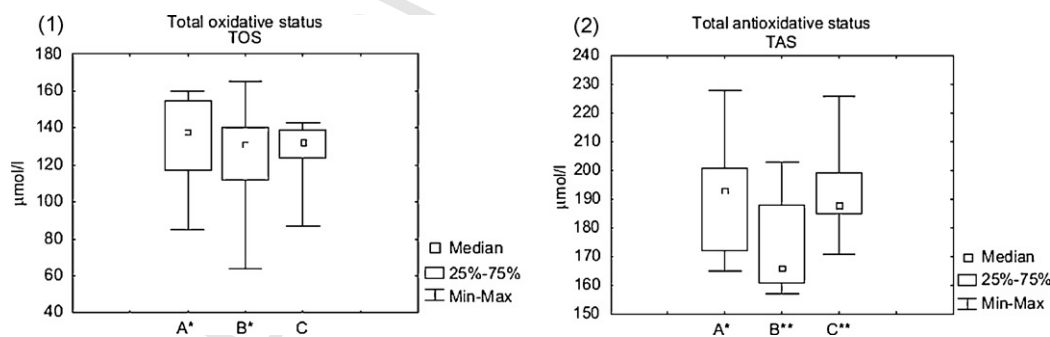


Figure 6 Variation des concentrations plasmatiques du statut oxydatif total (SOT) chez les sujets au repos (A), 30 minutes après la cryostimulation (B) et le matin du jour d'après (C). * $p < 0,05$: différence significative B vs A.

Extrait de Lubkowska et al., 2008 [38].

oxydant total (SAT) étaient significativement plus faibles 30 minutes après exposition au froid mais les valeurs du lendemain n'étaient plus différentes des valeurs initiales. Cependant, dans le cas des athlètes, la cryostimulation est accompagnée d'exercice physique dans le cadre de leur entraînement régulier et il apparaît donc difficile de savoir si la peroxydation lipidique est le simple résultat de l'entraînement et/ou de la cryostimulation associée [10,60].

3.6. Réponses sur les symptômes dépressifs

Certaines études se sont intéressées aux effets du froid sur la médecine somatique et certaines évidences semblent apparaître quant aux modifications de l'humeur. Les premières études sur ce sujet ont pu démontrer qu'une courte exposition en CCE entraînait une amélioration du sommeil, de la sensation de la relaxation profonde et de l'humeur générale. Ces effets semblent persister quelques heures, voire quelques jours après [25]. Dans une étude plus récente encore, Rymaszewska et al. [53] ont étudié 23 patients dépressifs qu'ils ont positionnés en CCE (-150°C , 160 secondes, dix fois en deux semaines) tout en continuant le traitement médicamenteux anti-dépression. En utilisant les 21 items de l'échelle de Hamilton Depression Rating Scale, (HRDS), ils ont pu conclure en faveur d'effets positifs de l'exposition à la CCE sur les scores établis sur cette échelle. Les auteurs concluent sur le soulagement du symptôme dépressif apporté par les différentes séances de CCE pendant deux semaines. Sur la base de ces résultats, ces auteurs ont publié très récemment une étude très proche de leur précédente mais en incluant cette fois 34 patients en termes de groupe témoin [52]. Après trois semaines de CCE, les 26 patients atteints d'un syndrome dépressif ont diminué de 34,6 % les scores atteints sur l'échelle HRDS, alors que le groupe témoin ne diminuait son score que de 2,9 %. L'une des hypothèses neurobiologiques de la dépression étant le dérèglement de l'axe hypothalamique-pituitaire-adrénargique (HPA), les auteurs attribuent à cet axe la meilleure régulation de l'humeur et un meilleur scoring au test HRDS. Il semblerait de plus que la CCE induise des effets positifs sur les rythmes biologiques des patients. Tous ces résultats pourraient apporter des réponses aux troubles psychologiques passagers que peuvent rencontrer les athlètes au quotidien dans leur entraînement.

3.7. La cryothérapie en corps entier et la récupération du sportif

Une étude préliminaire [7] a évalué les effets de la CCE sur les courbatures musculaires ressenties par des patients en période de renforcement musculaire intense suite à une opération des ligaments croisés antérieurs. Les sujets ($n = 17$) étaient exposés à la CCE durant trois minutes sur une période de trois semaines à raison d'une séance par jour. Les résultats révèlent une tendance à la baisse des douleurs musculaires ressenties par les patients ayant été positionnés en CCE par rapport à un groupe témoin ($p = 0,07$). D'autres

4. Conclusion

D'après les différents travaux traitant des méthodes de récupération, il apparaît que les résultats sont souvent dépendants des protocoles envisagés et des durées proposées. La récupération par immersion en eau froide et/ou contrastée semble être préconisée largement après des exercices de musculation ou des exercices à forte contrainte énergétique. L'immersion dans l'eau chaude fait rarement l'unanimité scientifique, surtout si l'exercice est très anaérobie au préalable; seule la profondeur de l'immersion

paraît vraiment essentielle, une immersion jusqu'au cou semble donner des résultats concluants. Pour ce qui est de la CCE, il existe peu de données actuelles sur la récupération avec cette modalité suite à un exercice. Cependant, la littérature scientifique nous donne des indications sur des effets bénéfiques de certains paramètres de l'inflammation lorsque cette pratique est réalisée, sur une possible augmentation du statut antioxydant, ainsi que sur une large amélioration de l'humeur et des syndromes dépressifs. Des études complémentaires davantage ciblées sur l'activité physique devraient pouvoir nous renseigner sur la capacité ou non des athlètes à mieux récupérer en utilisant cette modalité assez récente.

Conflit d'intérêt

Aucun.

Référence non citée

[35].

Références

- [1] Ames BN, Cathcart R, Schwiers E, Hochstein P. Uric acid provides an antioxidant defense in humans against oxidant and radical caused aging and cancer: a hypothesis. *Proc Natl Acad Sci* 1982;78:6858–62.
 - [2] Bailey DM, Erith SJ, Griffin PJ, Dowson A, Brewer DS, Gant N, et al. Influence of cold-water immersion on indices of muscle damage following prolonged intermittent shuttle running. *J Sports Sci* 2007;25(11):1163–70.
 - [3] Baldari C, Videira M, Madeira F, Sergio J, Guidetti L. Lactate removal during active recovery related to the individual anaerobic and ventilatory thresholds in soccer players. *Eur J Appl Physiol* 2004;93(1–2):224–30.
 - [4] Bandopadhyay P, Selvamathy W. Respiratory changes due to extreme cold in the Arctic environment. *Int J Biometeorol* 2003;18:178–81.
 - [5] Banfi G, Krajewska M, Melegati G, Patacchini M. Effects of whole-body cryotherapy on haematological values in athletes. *Br J Sports Med* 2008;42:558.
 - [6] Banfi G, Melegati G, Barassi A, Dogliotti G, Melzi d'Eril G, Dugué B, et al. Effects of whole-body cryotherapy on serum mediators of inflammation and serum muscle enzymes in athletes. *J Thermal Biol* 2008;34:55–9.
 - [7] Barbiche E. Intérêt de la cryothérapie du corps entier dans la récupération du sportif de haut niveau en phase de compétition. *Ann Inst Supérieur de la Santé* 2008;100:1–10.
- études complémentaires sont nécessaires pour confirmer ces

r
é
s
ul
ta
ts
s
u
r
u
n
é
c
h
a
n
ti
ll
o
n
pl
u
s
gr
a
n
d
e
t
e
x
pl
iq
u
e
r
c
e
t
ef
fe
t
p
o
si
ti
f
d
e
la
C
C
E
s
u
r
la
r
é
d
u
ct
io
n

des courbatures.

de Médecine générale, CERS Capbreton, p. 121.
[8] Bartosz C. Another face of oxygen: free radicals in nature.
Warszawa: PWN; 2003.

719

720

721



- [9] Brancaccio P, Maffulli N, Buonauro R, Limongelli FM. Serum enzyme monitoring in sports medicine. *Clin Sports Med* 2008;27(1):1–18.
- [10] Bloomer RJ, Falvo MJ, Fry AC, Schilling BK, Smith WA, Moore CA. Oxidative stress response in trained men following squats or sprints. *Med Sci Sports Exerc* 2006;38:1436–42.
- [11] Burke DG, Macneil SA, Holt LE, Mackinnon NC, Rasmussen RL. The effect of hot or cold water immersion on isometric strength training. *J Strength Condition Res* 2000;14(1):21–5.
- [12] Calder R. Recovery training: In: Reaburn P, Jenkins D (Eds.). *Training for speed and endurance*. Sydney, Allen and Unwin.
- [13] Cheung K, Hurne PA, Maxwell L. Delayed onset muscle soreness: treatment strategies and performance factors. *Sports Med* 2003;33:145–64.
- [14] Clarke DH. Effect of immersion in hot and cold water upon recovery of muscular strength following fatiguing isometric exercises. *Arch Phys Med Rehab* 1963;44:565–8.
- [15] Cochrane DJ. Alternating hot and cold water immersion for athlete recovery: a review. *Phys Ther Sport* 2004;5(1):26–32.
- [16] Coffey V, Leveritt M, Gill N. Effect of recovery modality on 4-hour repeated treadmill running performance and changes in physiological variables. *J Sci Med Sport* 2004;7(1):1–10.
- [17] Crowe MJ, O'Connor D, Rudd D. Cold water recovery reduces anaerobic performance. *Int J Sports Med* 2007;28(12):994–8.
- [18] Dugué B, Leppänen E. Adaptation related to cytokines in man: effect of regular swimming in ice-cold water. *Clin Physiol* 1999;2:114–21.
- [19] Eston R, Peters D. Effects of cold water immersion on the symptoms of exercise-induced muscle damage. *J Sports Sci* 1999;17(3):231–8.
- [20] Farhi LE, Linnarsson D. Cardiopulmonary readjustments during graded immersion in water at 35 degrees C. *Respir Physiol* 1977;30(1–2):35–50.
- [21] French DN, Thompson KG, Garland SW, Barnes CA, Portas MD, Hood PE, et al. The effects of contrast bathing and compression therapy on muscular performance. *Med Sci Sports Exerc* 2008;40(7):1297–306.
- [22] Fricke R. Ganzkörperkältetherapie in einer Kältekammer mit Temperaturen um -110°C . *Z Phys Med Baln Med Klin* 1989;18:1–10.
- [23] Gill ND, Beaven CM, Cook C. Effectiveness of post-match recovery strategies in rugby players. *Br J Sports Med* 2006;40(3):260–3.
- [24] Goodall S, Howatson G. The effects of multiple cold water immersions on indices of muscle damage. *J Sports Sci Med* 2008;7(2):235–41.
- [25] Gregorowicz H, Zagrobelny Z. Whole-body cryotherapy – indications and contraindications, the procedure and its clinical and physiological effects. *Acta Bio-Optica Informatica Med* 1998;4:119–31.
- [26] Halson SL, Quod MJ, Martin DT, Gardner AS, Ebert TR, Laursen PB. Physiological responses to cold water immersion following cycling in the heat. *Int J Sports Physiol Perform* 2008;3(3):331–46.
- [27] Heyman E, Deg B, Mertens I, Meeusen R. Effects of four recovery methods on repeated maximal rock climbing performance. *Med Sci Sports Exerc* 2009;41(6):1303–10.
- [28] 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(4):615–21.
- [29] Howatson G, Van Someren KA. Ice massage. Effects on exercise-induced muscle damage. *J Sports Med Phys Fitness* 2003;43(4):500–5.
- [30] Howatson G, van Someren KA. The prevention and treatment of exercise-induced muscle damage. *Sports Med* 2008;38(6):483–503.
- [31] 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* 2008;12(3):417–21.
- [32] Jakeman JR, Macrae R, Eston R. A single 10-min bout of cold-water immersion therapy after strenuous plyometric exercise has no beneficial effect on recovery from the symptoms of exercise-induced muscle damage. *Ergonomics* 2009;52(4):456–60.
- [33] Jansky L, Pospisilova D, Honzova S, Ulicny B, Sramek P, Zeman V, et al. Immune system of cold-exposed and cold-adapted humans. *Eur J Appl Physiol* 1996;72:445–50.
- [34] Jansky L, Vybiral S, Trubacova M, Okrouhlik J. Modulation of adrenergic receptors and adrenergic functions in cold adapted humans. *Eur J Appl Physiol* 2008;104(2):131–5.
- [35] Jenkins RR. Free radical chemistry, relationship to exercise. *Sports Med* 1988;5:156–70.
- [36] Kinugasa T, Kilding AE. A comparison of post-match recovery strategies in youth soccer players. *J Strength Condition Res* 2009;23(5):1402–7.
- [37] Leppäluoto J, Westerlund T, Huttunen P, Oksa J, Smolander J, Dugué B, et al. Effects of long-term whole-body cold exposures on plasma concentrations of ACTH, beta-endorphin, cortisol, catecholamines and cytokines in healthy females. *Scand J Clin Labor Invest* 2008;68(2):145–53.
- [38] Lubkowska A, Chudecka M, Klimek A, Szygula Z, Fraczek B. Acute effect of a single whole-body cryostimulation or prooxidant-antioxidant balance in blood of healthy, young men. *J Therm Biol* 2008;33:464–7.
- [39] Mackinnon J. Overtraining: National Sports Research program. State of the art review. Canberra-Australian Institute of Sport, n° 26.
- [40] Marieb EN. *Anatomie et physiologie humaines*. 4^e Ed De Boeck Université; 1999. p. 608.
- [41] Metzger D, Zwingmann C, Protz W, Jackel WH. Whole-body cryotherapy in rehabilitation of patients with rheumatoid diseases: pilot study. *Rehabilitation (Stuttg)* 2000;39:93–100.
- [42] Montgomery PG, Pyne DB, Cox AJ, Hopkins WG, Minahan CL, Hunt PH. Muscle damage, inflammation, and recovery interventions during a 3-day basketball tournament. *Eur J Sport Sci* 2008;8(5):241–50.
- [43] Montgomery PG, Pyne DB, Hopkins WG, Dorman JC, Cook K, Minahan CL. The effect of recovery strategies on physical performance and cumulative fatigue in competitive basketball. *J Sports Sci* 2008;26(11):1135–45.
- [44] Morton RH. Contrast water immersion hastens plasma lactate decrease after intense anaerobic exercise. *J Sci Med Sport* 2007;10(6):467–70.
- [45] Oksa J, Rintamäki H, Rissanen S, Rytty S, Tolonen U, Komi PV, et al. Whole body cooling and local warming. *Aviat Space Environ Med* 2000;71(2):156–61.
- [46] Peiffer JJ, Abbiss CR, Nosaka K, Peake JM, Laursen PB. Effect of cold water immersion after exercise in the heat on muscle function, body temperatures, and vessel diameter. *J Sci Med Sport* 2009;12(1):91–6.
- [47] Peiffer JJ, Abbiss CR, Watson G, Nosaka K, Laursen PB. Effect of cold water immersion on repeated 1-km cycling performance in the heat. *J Sci Med Sport*, sous presse.
- [48] Peiffer JJ, Abbiss CR, Wall BA, Watson G, Nosaka K, Laursen PB. Effect of a 5 min cold water immersion recovery on exercise performance in the heat. *Br J Sports Med*, sous presse.
- [49] Ronsén O, Børsheim E, Bahr R, Klarlund D, Pedersen B. Immunoendocrine and metabolic responses to long distance ski racing in world-class male and female cross-country. *Scand J Med Sci Sports* 2004;14:39–48.
- [50] Rowsell GJ, Coutts AJ, Reaburn P, Hill-Haas S. Effects of cold-water immersion on physical performance between successive matches in high-performance junior male soccer players. *J Sports Sci* 2009;27(6):565–73.

- [51] Rutkove SB. Effects of temperature on neuromuscular electrophysiology. *Muscle Nerve* 2001;24(7):867–82.
- [52] Rymaszewska J, Ramsey D, Chladzinska-keijna S. Whole-body cryotherapy as adjunct treatment of depressive and anxiety disorders. *Arch Immunol Ther Exp* 2008;56:63–8.
- [53] Rymaszewska J, Tulczynski A, Zagrobelny Z, Kiejna A, Hadrys T. Influence of whole-body cryotherapy on depressive symptoms – preliminary study. *Acta Neuropsychiatrica* 2003;15:122–8.
- [54] Savalli L, Olave P, Hernandez Sendin MI, Laboute E, Trouvé P, Puig PL. Cryothérapie corps entier à -110°C . Mesure des températures cutanées et centrales chez le sportif. *Sci Sports* 2006;21:36–8.
- [55] Schniepp J, Campbell TS, Powell KI, Pincivero DM. The effects of cold-water immersion on power output and heart rate in elite cyclists. *J Strength Condition Res* 2002;16(4):561–7.
- [56] Sellwood KL, Brukner P, Williams D, Nicol A, Hinman R. Ice-water immersion and delayed-onset muscle soreness: a randomised controlled trial. *Br J Sports Med* 2007;41(6):392–7.
- [57] Sen CK. Oxidants and antioxidants in exercise. *J Appl Physiol* 1995;79:675–86.
- [58] Siems W, Brenke R. Changes in the glutathione system of erythrocytes due to enhanced formation of oxygen free radicals during short-term whole body cold stimulus. *Arct Med Res* 1992;51:3–9.
- [59] Smolander J, Leppäluoto J, Westerlund T, Oksa J, Dugué B, Mikkelson M, et al. Effects of repeated whole-body cold exposures on serum concentrations of growth hormone, thyrotropin, prolactin and thyroid hormones in healthy women. *Cryobiology* 2009;58:275–8.
- [60] Swenson C, Swand L, Karlsson J. Cryotherapy in sports medicine. *Scand J Med Sci Sports* 2004;6:193–200.
- [61] Vaile JM, Gill ND, Blazeovich AJ. The effect of contrast water therapy on symptoms of delayed onset muscle soreness. *J Strength Cond Res* 2007;21(3):697–702.
- [62] Vaile J, Halson S, Gill N, Dawson B. Effect of hydrotherapy on the signs and symptoms of delayed onset muscle soreness. *Eur J Appl Physiol* 2008;102(4):447–55.
- [63] Vaile J, Halson S, Gill N, Dawson B. Effect of hydrotherapy on recovery from fatigue. *Int J Sports Med* 2008;29(7):539–44.
- [64] Warren GL, Lowe DA, Armstrong RB. Measurement tools used in the study of eccentric contraction-induced injury. *Sports Med* 1999;27(1):43–59.
- [65] Wilcock IM, Cronin JB, Hing WA. Physiological response to water immersion: a method for sport recovery? *Sports Med* 1996;36(9):747–56.
- [66] Yamauchi T. Whole-body cryotherapy is a method of extreme cold -175°C treatment initially used for rheumatoid arthritis. *Z Phys Med Baln Med Klin* 1989;15:311.
- [67] Zagrobelny Z. Local and whole body cryotherapy. Wrocław:Wydawnictwo Medyczne Urban and Partner;2003.